

# 유체의 정확한 온도 측정을 위하여 내부 센서를 집적한 마이크로채널 제작

論 文

51C-9-9

## Fabrication of the Microchannel Integrated with the Inner Sensors for Accurate Measuring Fluid Temperature

朴 皓 竣\*\*\* · 林 根 培\*\*\* · 孫 祥 榮\*\*\* · 宋 仁 燮\*\*\* · 朴 政 浩<sup>§</sup>  
(Hojoon Park · Geunbae Lim · Sang Young Son · In-seob Song · Junggho Pak)

**Abstract** - A rectangular straight microchannel, integrated with the resistance temperature detectors(RTDs) for temperature sensing and a micro-heater for generating the temperature gradient along the channel, was fabricated. Its dimension is  $57 \mu\text{m}$  (H) $\times 200 \mu\text{m}$  (W) $\times 48,050 \mu\text{m}$  (L), and RTDs were placed at the inner-channel wall. Si wafer was used as a substrate. For the fabrication of RTDs, 5300 Å thick Pt/Ti layer was sputtered on a Pyrex glass wafer. Finally, the glass wafer was bonded with Si wafer by anodic bonding, so that the RTDs are located inside the microchannel. Temperature coefficient of resistance(TCR) values of the fabricated Pt-RTDs were 2800~2960 ppm/°C and the variation of TCR value in the range of 0~100 °C was less than 0.3 %. Therefore, it was proved that the fabricated Pt-RTDs without annealing were excellent as temperature sensors. The temperature distribution in the microchannel was investigated as a function of mass flow rate and heating power. The temperature increase rate diminished with decreasing the applied power and increasing the mass flow rate. It was confirmed from the comparison with the simulation results that the temperature measured inside the microchannel is more accurate than measuring the temperature measured at the outer wall. The proposed temperature sensing method and microchannel are expected to be useful in microfluidics researches.

**Key Words** : RTD, TCR, microchannel

### 1. 서 론

MEMS 기술을 이용하여 제작된 초소형 시스템은 마이크로 스케일에서의 물리적 현상을 파악하기 위한 새로운 방법들을 제공함으로써 매크로 스케일에서 측정하기 어려운 여러 가지 현상들을 실험적으로 연구할 수 있게 되었다. 특히, microfluidics 분야에 대한 관심이 점차 높아짐에 따라, MEMS 기술로 제작된 마이크로채널의 출현은 화학적 분석 시스템[1], 전기회로의 냉각[2,3], 그리고 DNA chip 등 다양한 응용을 가능하게 하였다.

Microfluidics 분야에서, 측정되고 제어되어야 할 가장 기본적인 변수 중 하나는 채널 내부 유체의 온도이다. 마이크로채널 내 유체 온도의 정확한 측정과 제어는 유체의 특성 변화를 제어할 수 있을 뿐 아니라, 물성치 변화에 따른 영향 파악을 위한 중요한 수단이기 때문이다. 현재까지 마이크로채널 내의 유체 온도 또는 유체로 전달되는 온도 측정을 위하여 가장 일반적으로 사용하는 방법은 마이크로채널이 형성된 기판의 뒷 면에 thermocouples를 부착하여 측정하는 방법[3,4]이다. 이 외에도 실리콘 기판에 마이크로

채널을 형성한 후 뒷면에 다결정 실리콘을 증착하고 선택적으로 주입으로 온도 측정용 저항체를 형성하여 측정하는 방법[5], 챔버가 형성된 실리콘 기판의 뒷면에 백금 박막 측온 저항체를 형성하여 측정하는 방법[6], 그리고 적외선 카메라를 이용하여 측정하는 방법[7] 등이 있다. 하지만 앞선 방법들은 채널 외벽의 온도를 측정하는 것이므로 마이크로채널 내부의 실제 온도와는 차이가 있을 것이다. 특히, 시약의 합성이나 화학적 반응을 위하여 내부 온도의 정확한 측정과 제어가 필요한 생화학적 분석 시스템의 경우, 가공성과 제작비 등을 고려하여 폴리머 재질을 사용하는 추세에 있는데 [8,9] 폴리머 재질은 열전달율이 높지 않으므로 기존의 측정 방법을 사용하게 되면 정확한 분석이 어려울 것이다. 따라서, 마이크로채널 내부의 온도를 측정할 수 있는 보다 개선된 온도 측정방법의 구현이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 최소화하고 채널 내 온도 측정의 신뢰도를 높이기 위해 마이크로채널 내부에 센서를 부착하여 온도를 측정하는 방안을 제시하고, 이에 따라 제작된 온도 센서의 특성을 파악하였다. 또한 상용 프로그램인 Fluent를 이용하여 채널 내부의 온도와 외벽의 온도에 대한 차이를 파악하고, 제작된 마이크로채널을 이용하여 발열량과 공급 유량의 변화에 따라 측정된 마이크로채널 내 유체의 온도분포 결과를 비교, 분석하였다.

### 2. 온도 측정 센서가 부착된 마이크로채널 제작

그림 1은 마이크로히터와 측온저항체 어레이가 집적된 마

\* 正 會 員 : 高麗大 마이크로머시닝學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 三星電機 中央研究所 先任研究員

\*\*\* 正 會 員 : 三星綜合技術院 MEMS lab. 專門研究員

§ 正 會 員 : 高麗大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 10月 16日

最終完了 : 2002年 6月 10日

이크로채널의 제작 공정이다. 유체의 통로가 되는 마이크로 채널은 가공성과 제작비의 장점을 고려하여 직경이 4"이고 두께가  $525 \pm 25 \mu\text{m}$ 인 P형 <100> 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하여 제작하였다.  $57 \mu\text{m}$  (H)× $200 \mu\text{m}$  (W)× $48,050 \mu\text{m}$  (L) 크기의 마이크로채널은 반응성 이온 식각 공정으로 형성하였다. 산화막을 마스크로 하여 실리콘 기판을 Tetra Methyl Ammonium Hydroxide (TMAH) 용액에 넣어 관통 식각을 실시하여 유체의 입구와 출구를 마이크로채널 양 끝에 형성하였다.

마이크로채널 내부 작동 유체의 온도를 측정하기 위해 측온저항체를 사용하였다. 측온저항체는 온도 증가에 따라 저항이 증가하는 성질을 이용한 것으로 온도와 저항간의 관계는 선형적인 특성을 유지하고 있다. 측온저항체 재질로는 백금을 선택하였다. 백금은 저항온도계수가 크고 직선성이 우수하며, 화학적, 열적 안정성이 높고, 고온에서 오랜 시간 사용하더라도 특성이 변화하지 않는 장점을 가지고 있어서 센서분야에 많이 응용되는 재질이다. 측온저항체의 선폭은  $15 \mu\text{m}$ , 저항은 실온에서  $100 \Omega$ 이 되게 하여 마이크로채널 내에  $4 \text{ mm}$  간격으로 10개를 제작하였다. 열유속을 발생하는 마이크로히터는 채널의 출구 주위에 형성하였으며 저항은  $200 \Omega$ 으로 하고 최대발열량을  $11 \text{ W}$ 까지 가능하도록 설계하였다. 마이크로히터와 측온저항체 어레이는 티타늄 박막을 접착층으로 하여  $5000 \text{ \AA}$  두께로 백금 박막을 스퍼터링 하고, lift-off 공정을 이용하여 가시화가 가능한  $1 \text{ mm}$  두께의 파이렉스 7740 글래스 웨이퍼 위에 동시에 제작하였다. 증착된 측온저항체의 면저항 값은  $0.2615 \Omega/\square$ 이다. 마지막으로 마이크로채널이 형성된 실리콘 웨이퍼와, 마이크로 히터와 측온저항체 어레이가 부착된 글래스 웨이퍼를  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 양극 접합을 실시하여 측온저항체 어레이가 구조적으로 마이크로채널 내부에 부착되도록 하였다.

그림 2는 제작된 마이크로채널의 사진이다. 확대된 사진은 마이크로채널 내에 있는 측온저항체와 발열체를 나타낸 것이다. 그림 3은 마이크로채널 단면의 SEM 사진으로서 채널 내부에 측온저항체가 부착되어 있는 것을 확인할 수 있다.

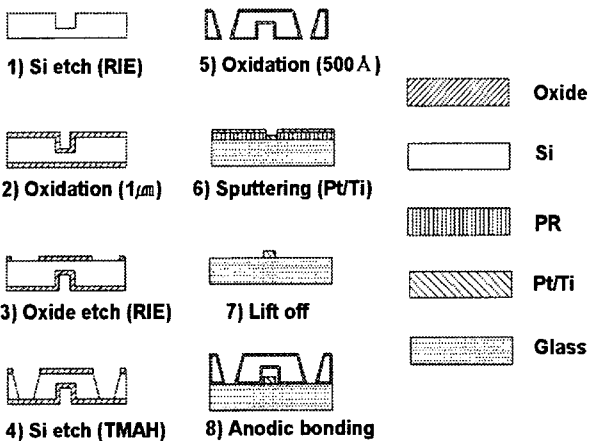


그림 1 마이크로히터와 측온저항체 어레이가 집적된 마이크로채널의 제작 공정  
 Fig. 1 Fabrication process of the microchannel integrated with a micro-heater and RTD array

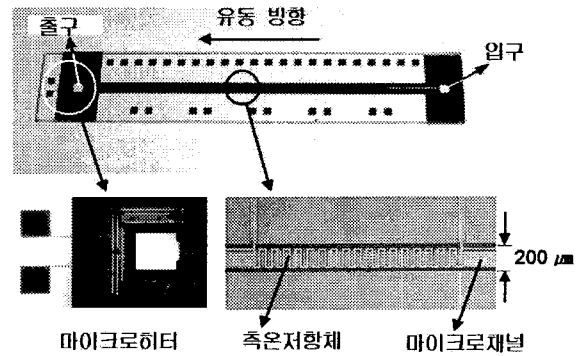


그림 2 제작된 마이크로채널의 사진 (상측도: 마이크로채널 전면 사진, 하 좌측도: 마이크로히터, 하 우측도: 마이크로채널 내의 측온저항체)  
 Fig. 2 Photograph of the fabricated microchannel integrated with RTD sensors and a micro-heater. (Top: top-view of microchannel, Lower left: micro-heater, Lower right: RTD in the microchannel)

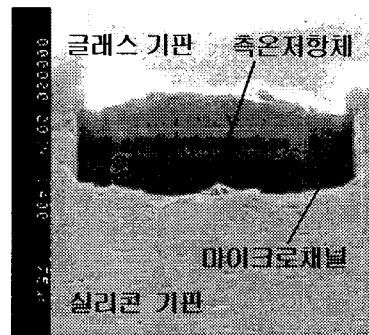


그림 3 마이크로채널 내에 제작된 측온저항체의 SEM 사진 ( $\times 400$ ) (채널 안 쪽의 글래스 웨이퍼 벽면에 측온저항체가 붙어있는 것을 볼 수 있음. 채널 단면의 치수는  $200 \mu\text{m}$ (W),  $57 \mu\text{m}$ (H)임)  
 Fig. 3 SEM photograph of RTD integrated in the micro channel ( $\times 400$ )

### 3. 온도측정방법 및 측정장치

#### 3.1 측온저항체의 온도 측정 원리

측온저항체는 온도의 증가에 따라 저항이 선형적으로 증가하는 특성이 있다. 임의의 온도 구간에서 각각의 온도에 대한 측온저항체 저항을 측정하여 온도와 저항과의 관계식을 수립하면, 수립된 관계식에 의해 측온저항체의 저항을 측정함으로써 온도를 파악할 수 있다. 측온저항체의 저항 측정은 4점 측정법과 voltage follower를 이용하였다.

##### 3.1.1 4점 측정 방법

측온저항체를 이용하여 저항을 측정하기 위해서는 그림 4와 같이 저항체 e의 양단에 각각 2개씩의 인입선을 형성한다. 저항을 측정하고자 하는 저항체 e는 온도 측정을 위해

마이크로채널 내에 부착시킨 측온저항체에 해당한다. 측온저항체 양끝의 2개 인입선 a, b에 정전류를 인가하고 나머지 2개의 인입선 c, d로부터 전압을 측정하면 측온저항체만의 전압을 측정할 수 있다. 측온저항체의 저항은 오옴의 법칙에 의해 측정된 전압으로부터 구할 수 있다.

3.1.2 Voltage follower

측온저항체의 전압을 측정하기 위해 그림 4의 f와 g에 계측기를 연결하였을 때, 측온저항체와 계측기 사이의 연결선에 의한 잡음이 측정값에 영향을 줄 수도 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해 operational amplifier(Op-Amp.)를 이용하여 voltage follower라고 하는 회로를 구성한다. Op-Amp.를 사용하여 buffer를 형성하면 전압 이득은 1이지만 buffer단의 입력 임피던스가 무한대가 되므로, 입력단에서의 잡음의 영향을 제거하여 출력단에서 정확한 신호를 검출하는 역할을 한다. 따라서 voltage follower를 이용하면 측온저항체 부위만의 전압을 정확히 측정할 수 있다[10].

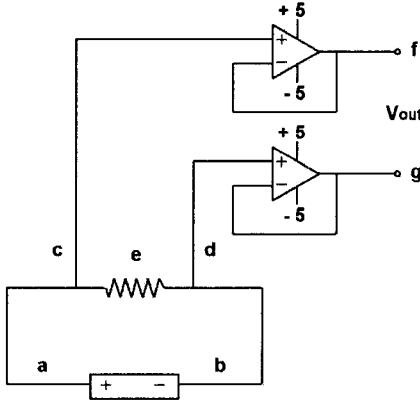


그림 4 측온저항체의 전압 측정을 위한 회로도 (4 point probe 방법과 voltage follower로 구성되어 있어서 'a'와 'b'에 정전류 인가시 측온저항체에 해당되는 'e'부위의 전압만 정밀하게 측정할 수 있음)

Fig. 4 Schematic view of RTD voltage measurement block

3.2 측온저항체의 calibration 및 마이크로채널 내 온도 측정

마이크로채널 내에 부착되어 있는 각각의 측온저항체에 대하여 온도에 따른 저항값 변화를 측정하기 위해 측온저항체 어레이 양단에 정전류를 인가할 수 있도록 DC 정전류계(YOKOGAWA Corp.)를 사용하였고, 측온저항체의 저항에 영향을 주지 않기 위해 전류는 0.5 mA를 인가하였다. 10개의 측온저항체의 전압은 data acquisition unit(Agilent Tech.)을 사용하여 각 측온저항체 양쪽에 있는 인입선에 연결하여 동시에 측정하였다. 측온저항체가 형성되어 있는 마이크로채널은 항온조에 넣어 온도를 제어하였으며, 항온조 내의 정확한 온도 측정을 위해 calibration된 thermocouple(T-type, wire no.32)을 마이크로채널 구조물 표면에 부착하였다. 임의의 온도에서 각 측온저항체의 전압이 안정한 상태가 되었을 때, 값을 추출하여 온도와 전압과의 관계식을 수립하였다. 모든 측정은 3차례씩 실시하였다. 그림 5에 측온저항체의 전압 측정을 위한 장치 구성도를 나타냈다.

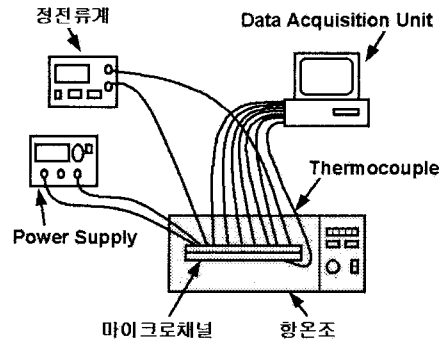


그림 5 측온저항체의 전압 측정을 위한 장치 구성도  
Fig. 5 Schematic view of RTD voltage measurement instrumentation

마이크로채널을 통과하는 유체의 온도를 측정하기 위하여 마이크로채널에 공급하는 작동 유체는 Deionized(DI) water를 사용하였으며, 그림 6과 같이 syringe pump로 유량을 정밀히 제어하여 질량유량을 0.5~2.5 mg/s의 범위에서 0.5 mg/s 간격으로 변화시켰고, 마이크로채널에 인가하는 전력은 0.4 W, 0.8 W, 그리고 1.2 W으로 변화시키면서 마이크로채널 내부 유체의 온도 분포를 측정하였다. 발열을 위하여 DC power supply(Hewlett-Packard)를 사용하였으며, 작동 유체와 접촉하는 측온저항체 어레이의 전압을 측정하기 위하여 DC 정전류계를 사용하여 양단에 0.5 mA의 정전류를 인가하였다. Calibration된 각 측온저항체에 대한 온도와 전압과의 관계식을 data acquisition unit에 입력하여, 10개 측온저항체에서 동시에 측정된 전압값이 곧바로 온도로 변환되어 나타나도록 하였다.

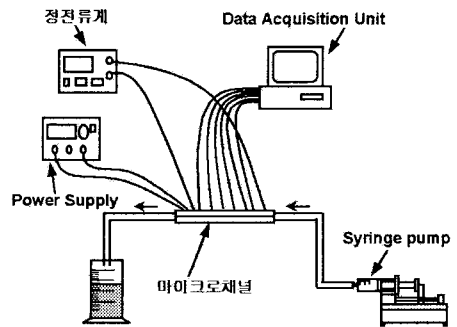


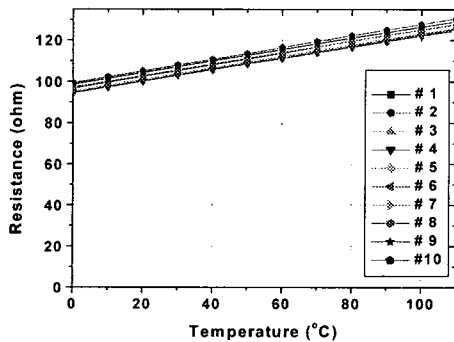
그림 6 유체 온도 측정을 위한 장치 구성도  
Fig. 6 Schematic view of fluid temperature measurement instrumentation

4. 결과 및 고찰

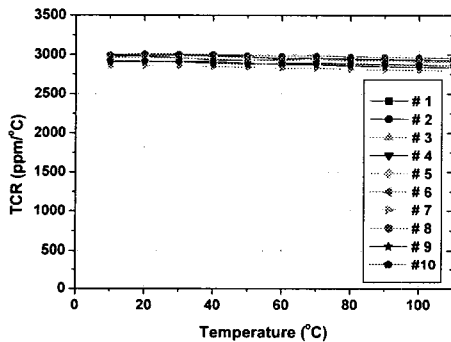
4.1 측온저항체의 성능 및 온도 측정

측온저항체가 부착된 측정 구조물을 항온조에 넣고 0~110 °C의 범위에서 10 °C 간격으로 온도를 올리면서 10개 측온저항체의 전압을 측정하였다. 측정 온도는 DI water에

대하여 층류 유동 영역에 해당하는 온도범위 내에서 설정하였다. 그림 7(a)에 나타낸 것과 같이 모든 측온저항체가 온도 변화에 따라 선형적으로 저항이 변하고 있음을 알 수 있다. 측정값을 기초로 하여 저항온도계수 값을 계산한 결과, 그림 7(b)에서와 같이 모든 측온저항체가 2800~2960 ppm/°C의 균일한 값이 얻어졌다. 일반적인 백금 재료의 저항온도계수 값보다 낮은 값이 얻어졌으나[11], 각 측온저항체의 측정 온도 전 구간에 걸쳐 3차례 측정된 저항온도계수의 편차는 약 0.3 % 이내로서, 제작된 측온저항체는 온도 센서로 사용하기에 적합한 우수한 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

그림 7 백금 박막 측온저항체의 성능(Legend의 각 label은 구분을 위해 출구에서 가까운 순서로 붙인 측온저항체의 번호임) (a) 온도 변화에 따른 측온저항체의 저항값 변화(저항값이 온도에 따라 선형적으로 변화함) (b) 온도 변화에 따른 측온저항체의 저항변화율(2800~2960 ppm/°C의 값을 가지며 측정 온도 전 구간에 걸친 저항온도계수의 편차가 약 0.3 % 이내로서 우수한 특성을 나타냄)

Fig. 7 Pt-RTD Performance(The labels on the legend are the RTD sensor numbers, starting from nearest to the outlet) (a) Variations of resistance as a function of temperature for each RTD (b) Variations of TCR value as a function of temperature for each RTD

측온저항체 재료로 사용되는 백금 박막은 고온에서 열처리를 실시하면 전기적 특성을 향상시킬 수 있다. 본 실험에서는 마이크로채널의 가시화 목적으로 글래스 기판을 사용하였는데, 측온저항체가 부착된 글래스 기판은 약 800 °C의

온도에서 연성화되는 특성을 가지고 있으므로 고온에서의 열처리를 실시하지 않았다. 하지만 열처리를 하지 않더라도 측온저항체가 일정한 저항변화율을 유지하고 있음을 3차례의 반복 측정을 통하여 알 수 있었다. 따라서, 0~100 °C의 온도 범위에서는 열처리를 하지 않더라도 백금 박막 측온저항체의 특성이 변화되지 않으며 충분히 사용 가능함을 확인할 수 있었다. 그림 6에서의 부호는 구분을 위해 출구에서 가까운 순서로 붙인 측온저항체의 번호이다.

각 측온저항체의 온도-저항 관계를 이용하여 마이크로채널 내에 공급하는 작동유체의 공급 유량과 인가 전력을 변화시키면서 마이크로채널 내 유체의 온도분포를 측정하여 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 여기서 x 좌표는 출구로부터 채널 길이 방향으로 각 측온저항체가 위치한 거리이다. 마이크로채널 내 유체의 온도는 열을 발생시키는 마이크로히터에 가까울수록 높게 나타났으며, 인가 발열량이 증가할수록 채널 내 각 부위의 온도는 증가하고, 공급 유량이 증가함에 따라 동일한 발열량에서 각 부위의 온도는 낮아지고 있음을 확인할 수 있었다. 공급되는 질량유량이 적을수록 그리고 인가되는 전력이 증가할수록 열전달 특성 때문에 마이크로채널 입구와 출구 사이에서의 온도 차이는 커지게 됨을 알 수 있다.

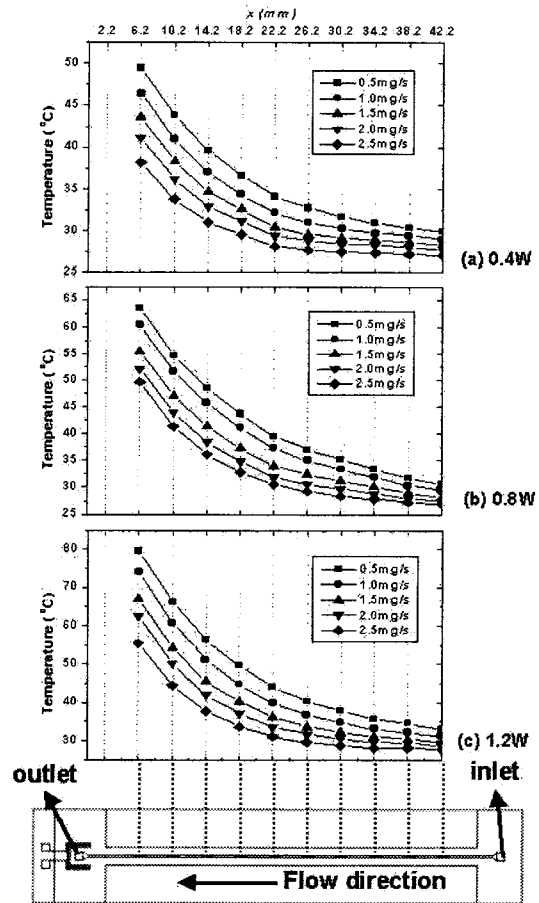


그림 8 질량유량과 인가 전력 변화에 따른 마이크로채널 내 온도 분포

Fig. 8 Temperature distribution along the microchannel for different heating power and mass flow rate

### 4.2 수치 해석에 의한 온도 분포 파악

수치 해석은 상용 코드인 Fluent를 이용하여 실행하였다. Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 이용하였으며 유한체적법을 이용하였다. 작동 유체의 상태는 정상상태로 하였으며, Reynolds 수가 약 23 이하이므로 층류유동으로 설정하였다. 유체의 물성값은 온도의 함수로 정의하였다. 또한 유체에서 고체로, 그리고 고체에서 유체로 열전달이 일어나는 것으로 고려하여 공액 열전달(conjugate heat transfer)을 계산하였다. 전체 수치 해석 모델은 채널의 길이 방향으로 유동 및 온도 분포가 대칭적으로 일어나므로 폭 방향으로 1/2만 고려하였으며, 대칭면에서는 대칭 경계조건을 적용하였다. 계산하려는 형상의 외부 경계조건은 자연 대류가 발생하는 것으로 고려하여, 열전달 계수를 20 W/mK, 그리고 채널 외부 온도를 299 K로 가정하였으며, 마이크로히터에서의 발열은 부피당 발열량으로 고려하여 처리하였다.

채널 내부의 온도 차이가 가장 크게 나타나는 조건인 공급유량 0.5 mg/s, 인가 전력 1.2 W인 경우의 온도 분포에 대한 수치해석을 실시하여 글래스 외벽면의 온도 분포, 채널 내 유체의 온도 분포 그리고, 실리콘 외벽면의 온도 분포의 차이를 얻을 수 있었다. 표 1에 나타난 것과 같이 채널에 수직한 방향으로 동일한 각각의 위치에서 온도 차이가 있음을 알 수 있다. 열전도도가 가장 높은 실리콘 기판의 온도가 가장 높게 나타났고, 글래스 기판의 온도가 가장 낮게 나타났다. 특히 온도가 가장 높은 부위에서의 각 재질별(유체, 글래스, 실리콘) 상대적 온도 차이가 가장 크게 나타났다. 따라서, 온도가 높아질수록 채널 외벽의 온도 측정으로 채널 내 유체의 온도를 유추하는 기존의 방법은 정확도가 떨어진다고 생각되어진다.

표 1 질량유량 0.5 mg/s, 인가전력 1.2 W의 조건으로 수치 해석에 의한 마이크로채널 내 유체와 글래스 기판 외벽 그리고 실리콘 기판 외벽의 위치별 온도 비교

Table 1 Comparison of the temperature of fluid in the microchannel, glass out wall and Si out wall by numerical analysis when the mass flow rate is 0.5 mg/s and the applied power is 1.2 W

x (mm)	채널 내 유체 (°C)	글래스 기판 외벽 (°C)	실리콘 기판 외벽 (°C)
6.2	78.45	77.04	79.34
10.2	66.69	65.46	67.55
14.2	58.14	56.93	58.64
18.2	51.78	50.84	52.25
22.2	47.21	46.31	47.48
26.2	43.75	43.02	44.02
30.2	41.12	40.46	41.33
34.2	39.05	38.42	39.18
38.2	37.24	36.73	37.39
42.2	35.61	35.18	35.72

### 5. 결 론

본 연구에서는 마이크로채널 내부에 측온저항체 어레이를 형성하고 마이크로히터를 집적하여 채널 내의 유체와 직접 접촉하여 온도 분포를 측정할 수 있는 마이크로채널 구조물

을 제작하였다. 또한, 온도 측정을 위해 사용된 백금 박막 측온저항체는 온도 변화에 따라 저항값이 변하는 특성이 있으므로 온도 변화에 따른 저항값을 측정하여, 온도-저항 관계를 수립하였다. 각각의 측온저항체는 온도 변화에 따라 저항값이 선형적으로 변화하여 2800~2960 ppm/°C의 균일한 저항변화율을 가지고 있었다. 또한 열처리를 하지 않더라도 0~100 °C의 측정 온도 전 구간에 걸쳐 3차례 측정된 각 측온저항체의 저항온도계수의 편차는 약 0.3 % 이내로서, 온도 센서로 사용하기에 우수한 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

수립된 온도-저항 관계를 기초로 하여 공급 유량과 인가 발열량을 변화시키면서 채널 내 온도 분포를 측정하였다. 작동 유체는 DI water로 하였으며, syringe pump를 사용하여 정밀하게 제어된 유량을 마이크로채널 내로 공급하였다. 측정 결과, 마이크로히터에 가까워질수록 채널 내 유체의 온도는 높게 나타났으며, 인가 발열량이 증가할수록 마이크로채널 내 각 부위의 온도는 증가하고, 공급 유량이 증가함에 따라 동일한 발열량에서 각 부위의 온도는 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 수치해석 결과를 통하여 채널 내 유체의 온도를 직접 측정하는 방법이 기존의 채널 외벽의 온도를 측정하는 것보다는 더욱 정확하다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 제안한 것과 같은 마이크로채널과 측정 방법은 마이크로채널 내부의 온도 측정을 가능하게 함으로써 채널 내부에서의 유동 특성을 좀 더 정확히 파악할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한, 이와 같은 측정 방법은 구조물을 단열재로 사용하는 경우에 채널 내부의 온도를 측정하기 위해서는 필수적인 방법으로서, 향후 microfluidics 분야의 연구에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구 진행을 위하여 수치해석의 도움을 주신 삼성종합기술원 MEMS Lab.의 김태균 연구원님께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. van den Berg, T. S.J. Lammerink, V. Spiering, W. Olthuis, "Modular concept for miniature chemical systems," DECHEMA Monographien, Vol. 132, pp. 109-124, 1996.
- [2] D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease, "High Performance Heat Sinking for VLSI," IEEE Electron Device Letters, Vol.EDL-2, No.5, pp.126-129, 1981.
- [3] Muhammad Mustafizur Rahman, "Measurements of heat transfer in microchannel heat sinks," Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol.27, No.4, pp. 495-506, 2000.
- [4] X. F. Peng, H. Y. Hu, and B. X. Wang, "Flow boiling through V-shape microchannels," Experimental Heat Transfer, Vol.11, pp. 87-100, 1998.
- [5] L. Jiang, M. Wong, and Y. Zohar, "Phase change in microchannel heat sinks with integrated temperature sensors," Journal of MEMS, Vol.8, No.4, pp. 358-365, 1999.

[6] A. I.K. Lao, T. M.H. Lee, I-M. Hsing, and N. Y. Ip, "Precise temperature control of microfluidic chamber for gas and liquid phase reactions," Sensors and Actuators, 84, pp. 11-17, 2000.

[7] Y. P. Peles, L. P. Yarin, and G. Hetstoni, "Steady and unsteady flow in a heated capillary," Int. J. Multiphase flow, 27, pp. 577-598, 2001.

[8] Benedikt Grass et al., "A new PMMA-microchip device for isotachopheresis with integrated conductivity detector," Sensors and Actuators B, pp.1-10, 2000.

[9] H. Becker and Ulf Heim, "Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures," Sensors and Actuators, 83, pp. 130-135, 2000.

[10] R. G. Irvine, "Operational Amplifier Characteristics and Applications," 3rd ed., Prentice Hall, Inc., pp. 89-90, 1994.

[11] G. T. A. Kovacs, "Micromachined Transducers Sourcebook," WCB/McGraw-Hill, pp. 560-561, 1998.

## 저 자 소 개



### 박 호 준 (朴 皓 竣)

1965년 9월 23일생. 1989년 고려대 기계공학과 졸업(공학사). 1991년 동 대학원 졸업(석사). 2002년 고려대 대학원 마이크로머시닝학과 졸업(박사). 1991년~현재 삼성전기(주) 중앙연구소 선임연구원.  
Tel : 02-3290-3693, Fax : 02-921-0544  
E-mail : parkhj@korea.ac.kr

### 임 근 배 (林 根 培)

1965년 3월 23일생. 1990년 영남대 전자공학과 졸업(공학사). 1992년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동북대학 대학원 기계전자공학과 졸업(박사). 1996년~현재 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원.  
Tel : 031-280-8179, Fax : 031-280-6955  
E-mail : limmems@sait.samsung.co.kr

### 손 상 영 (孫 祥 榮)

1967년 10월 17일생. 1992년 서강대학교 화학공학과 졸업(학사). 1995년 Texas A&M대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 2000~2002 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원.  
Tel : 031-280-9429, Fax : 031-280-9473  
E-mail : syson@sait.samsung.co.kr

### 송 인 섭 (宋 仁 燮)

1962년 1월 1일생. 1993년 KAIST 기계공학과 박사 졸업. 1993년~1995년 삼성중공업 근무. 1996년~현재 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원.  
Tel : 031-280-9432, Fax : 031-280-9473  
E-mail : insong@sait.samsung.co.kr



### 박 정 호 (朴 政 浩)

1960년 2월 5일생. 1985년 Purdue대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~1995년 미국 Intel사 책임연구원. 1995년~1998년 고려대 전기공학과 조교수. 1998년~현재 고려대 전기공학과 부교수.  
Tel : 02-3290-3238, Fax : 02-921-0544  
E-mail : pak@korea.ac.kr