

# 마이크로채널에서의 국소 열전달 측정

조대관<sup>†</sup> · 이준식<sup>\*</sup>

## Local heat transfer measurement inside microchannel

Dae-Gwan Cho and Joon Sik Lee

**Key Words :** Heat transfer(열전달), Microchannel(마이크로채널), Entry region(입구 영역), Local temperature distribution(국소 온도 분포), Local Nu distribution(국소 누셀트 수), MEMS fabrication(MEMS 제작)

### Abstract

The current work presents a design and fabrication technique for a microchannel system to measure the local temperature distribution inside microchannel. This micro channel system fabricated by MEMS technique is integrated with a heater and an array of temperature sensors so that detailed heat transfer phenomena inside micro-scale channel can be studied. Materials widely used in semiconductor process were selected to fabricate a heater and temperature sensors on a silicon wafer. On these heater and sensors a channel wall was fabricated with SU-8. The friction constant and the local Nusselt number distribution measured for the deionized water flow in the microchannel is presented.

#### 기호설명

$A_c$  : 채널의 단면적( $m^2$ )  
 $C_f$  : 마찰계수 상수  
 $C_f^*$  : 규격화된 마찰계수 상수  
 $D_h$  : 수력직경(m)  
 $f$  : 무디마찰계수  
 $h$  : 대류열전달계수( $W/m^2 \cdot K$ )  
 $L$  : 채널 길이(m)  
 $\dot{m}$  : 질량유량( $kg/s$ )  
 $Nu$  : 국소 누셀트 수  
 $P$  : 압력(Pa)  
 $q$  : 열유속( $W/m^2$ )  
 $Q$  : 부피유량( $m^3/s$ )  
 $Re$  : 레이놀즈 수  
 $T$  : 온도(K)  
 $V$  : 평균 유속(m/s)

$\mu$  : 점성계수( $N \cdot s/m^2$ )  
 $\rho$  : 밀도( $kg/m^3$ )

#### 하첨자

in : 입구  
m : 측정  
mean : 채널 단면 평균  
net : 정미  
out : 출구  
theory : 이론  
w : 벽면

### 1. 서론

마이크로채널을 이용한 냉각장치는 채널의 작은 크기로 인한 대류열전달의 증진과 적은 냉매 요구량으로 인해 매우 각광받고 있다. 이러한 결과로 최근 몇 년 동안 마이크로채널 제작 기술, 압력과 온도 측정 기술 등의 개발에 많은 연구가 있어 왔다. 마이크로채널의 열전달이 증진되는 것은 직접적으로 길이 스케일의 감소 때문이다. 이러한 내용은 Tuckerman 과 Pease [1]에 의해 처음 관찰된

---

<sup>†</sup> 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : chod1@snu.ac.kr  
TEL : (02)880-7123 FAX : (02)875-6632

<sup>\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부

이후 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다. 그러나 많은 경우에 실험적으로 구한 마이크로채널의 마찰계수와 누셀트 수는 기존의 이론뿐만 아니라 여러 연구자들의 실험 결과간에도 많은 차이를 보였다. 이러한 경향은 Morini [2]의 논문에 잘 정리되어 있다.

이처럼 마이크로채널에서의 기본적인 열전달 과정이 지금까지 이해되지 못한 것은 마이크로채널의 특성 상 구체적이고 정확한 온도 정보를 얻지 못했기 때문이다. 지금까지의 많은 연구들은 마이크로채널의 크기가 일정 이하로 작아지면 국소 온도가 아닌 평균적인 온도를 제시하거나 대류열전달이 발생하는 표면의 온도가 아닌 두꺼운 벽 아래의 온도를 측정하였다 [3-5].

이번 연구에서는 마이크로채널 내부의 압력 강하와 국소 온도분포를 측정할 수 있는 새로운 마이크로채널의 설계와 제작 방법을 제시하고자 한다. 150  $\mu\text{m}$  x 150  $\mu\text{m}$ 의 사각형 단면을 가진 채널의 4 면 중 1 면에서 균일한 열유속이 가해지며, 가열면에 온도 측정을 위한 센서들이 배열된 마이크로채널을 제작하였다.

## 2. 실험장치 제작 및 방법

### 2.1 마이크로채널 제작

이번 연구의 마이크로채널을 설계함에 있어서 가장 중요하게 고려한 요소는 채널 가열 시작부의 국소 온도를 정확하게 측정하고 채널에 균일한 열유속을 가할 수 있는 구조를 제작하는 것이다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 다양한 MEMS 기술들을 적용하여 마이크로채널을 설계, 제작하였다. 마이크로채널의 제작은 서울대학교 내에 위치한 반도체공동연구소에서 이루어졌고, 이 때문에 채널을 구성하는데 사용한 재료들은 대부분 기존의 반도체 공정에서 널리 사용되는 것들 중에서 선택하였다. 마이크로채널의 채널 구조와 발열체, 온도센서의 배치도가 Fig. 1에 나타나 있다.

마이크로채널 제작의 첫 과정으로 기저물질로 이용할 실리콘 웨이퍼 (P-type (100))를 준비한다. SPM 용액으로 실리콘 웨이퍼를 세척해 웨이퍼 표면의 오염물질을 제거하고 건조시킨다. 이 세척 공정을 각 공정 사이에 수행하여 오염을 최소화하였다. 이후 공정에서 생성 될 발열층과 실리콘 웨이퍼 사이의 절연을 위해 LPCVD (Centrotherm E-1200) 장비를 이용해 실리콘 웨이퍼 표면에 1  $\mu\text{m}$  두께의  $\text{Si}_3\text{N}_4$  층을 증착하고, 2  $\mu\text{m}$  두께의  $\text{SiO}_x$  층

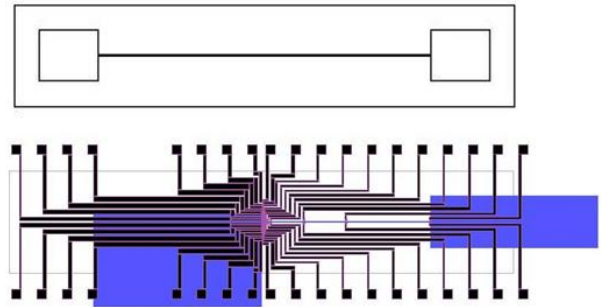


Fig. 1 Schematics of channel wall, heater and temperature sensors.

을 TEOS CVD (Applied Material Korea P-5000) 장비를 이용하여 형성하였다. 열전달 실험 시 발열층에 0.1 A 정도의 높은 전류가 가해지게 되므로 충분한 두께의 절연층이 요구된다. 이 두 절연층은 발열층에서 발생한 열이 채널 내 유체가 아닌 기저로 전달되는 것을 제한하는 역할도 동시에 수행한다. 채널 바닥면에 발열층을 형성하기 위해 감광제로 발열층 형태를 구현하여 자기회생층의 역할을 하도록 한다. 발열층의 재료로는 백금이 선택되었고 백금층과 기저층간의 접착력을 높이기 위하여 크롬층이 추가되었다. 크롬층 (20 nm)과 백금층 (100 nm)을 금속 증착기 (무한진공 MHS-1500)을 이용하여 증착하고 리프트 오프 방법으로 발열층 형태를 구현하였다. 발열층을 구현한 공정 다음으로 발열층과 그 위에 형성될 온도센서층 사이에 절연층으로 작용할  $\text{SiO}_x$  층 (500 nm)을 증착하였다. 온도센서와 외부회로를 이어주는 회로를 형성하기 위해 크롬과 금을 각각 10 nm, 200 nm 증착한 다음 형태를 구현하였다. 마이크로채널 가열면의 국소 온도를 측정하기 위한 센서 재료로 백금을 선택하여 발열층을 형성한 것과 같은 과정으로 센서의 형상을 구현하였다. 다음의 공정으로 온도센서층을 전기적으로 절연시키고 마이크로채널 내부의 유체로부터 보호하기 위해  $\text{SiO}_x$  층과  $\text{Si}_3\text{N}_4$  층을 각각 500 nm 증착하였다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  층과  $\text{SiO}_x$  층의 특정 위치를 건식각 장비 (Applied Material Korea P-5000)를 이용하여 식각하여 발열체와 온도센서 회로를 외부 회로와 연결할 수 있도록 하였다. 이러한 공정을 거쳐 마이크로채널 하부의 발열체와 국소 온도 측정을 위한 온도센서 등의 기저부를 완성하였다.

마이크로채널의 기저부가 완성되면 유체 유동을 위한 채널을 발열체와 온도센서 위 표면에 구현해야 한다. 마이크로채널의 벽면은 음성 감광제인 SU-8 (Microchem)을 이용하여 제작하였다. 웨이퍼

표면에 SU-8 도포 시 회전도포기의 회전수와 시간을 조절하여 원하는 두께를 가지도록 한다. 100~200  $\mu\text{m}$  정도의 두꺼운 감광막을 도포하기 위해서는 매우 높은 점성이 요구되는데, 이 높은 점성으로 인하여 균일한 표면을 얻기가 어렵다. 회전도포시 발생하는 원심력과 표면장력, 점성의 영향으로 웨이퍼 표면의 바깥 경계에서 1 cm 정도의 영역에 중심부보다 두꺼운 막이 형성된다. 또한 감광제의 높은 점성으로 인해 도포된 막 내부에 포획되어 있는 미세한 기포들이 소프트 베이크 과정에서 성장하여 터지면서 표면에 분화구 형상을 남기게 된다. 이러한 문제점들을 최소화하여야 채널 벽 구조와 상부구조 간의 접합 면적을 최대화할 수 있다.

채널의 상부구조는 채널 내부 관찰을 위하여 파이렉스 웨이퍼로 제작하였다. 파이렉스 웨이퍼의 표면에는 상부구조와 채널 벽 간의 접합을 위해 10  $\mu\text{m}$  미만의 얇은 SU-8 막을 도포한다. 도포된 SU-8 은 다음 공정을 위해 소프트 베이크 과정을 거친다. 레이저 절단기 (Exitech M-2000)를 이용하여 이 파이렉스 웨이퍼를 채널 상부 형태로 가공하고 채널과 실험 루프를 연결할 구멍을 뚫는다. 이렇게 가공된 채널 상부는 마이크로채널 벽 구조와 결합되어 완전한 채널을 구성하게 된다.

채널 상부 구조와 기저부의 결합은 다음의 과정을 거친다. 가공된 채널 상부 구조와 채널 기저부를 핫 플레이트에 올려놓고 70°C로 가열한다. 가열된 상부 구조의 접합층이 채널 벽 층과 결합되도록 상부 구조를 기저부 위에 올리고 웨이퍼 집게 등을 이용하여 눌러준다. 전체 면적이 결합되면 천천히 냉각시킨다. 두 웨이퍼 간의 결합은 노광 과정과 PEB 과정을 거쳐 완전한 결합을 이루게 된다. SU-8 막을 이용한 웨이퍼 간의 결합이나 다층 구조는 기존에 많은 연구가 있었다. Jackman 등 [6]이 채널 제작에서 SU-8 자체를 접착제로 이용하는 것을 제안하였고 이후로 접착 온도와 압력, 두께를 변화시키며 최적화된 조건을 찾기 위한 다양한 연구가 수행되었다 [7-11]. 이번 연구에서는 소프트 베이크한 얇은 SU-8 막을 이용하여 낮은 온도와 압력으로도 결합이 가능하게 하였다. 또한 얇은 막 두께와 낮은 압력으로 인해 접합층이 채널 벽 층의 채널 내부로 유입되는 현상을 막을 수 있었다.

## 2.2 실험 루프의 제작

Fig. 2 에 나타난 바와 같이 이번 연구에서는 마이크로채널의 유동을 발생시키기 위하여 고압의

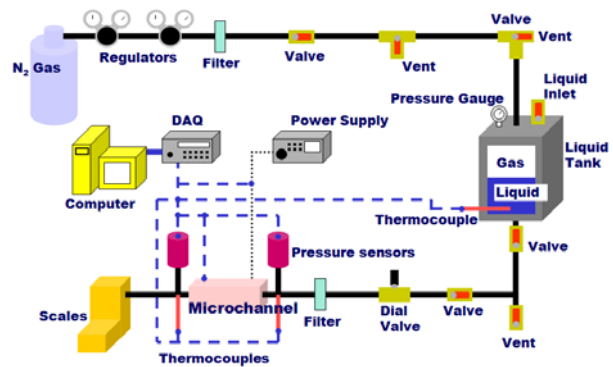


Fig. 2 Experimental loop to study the flow and measure the local temperature distribution inside channel.

질소가스를 이용하였다. 고압 질소 용기의 출구에 2 개의 압력조절기를 장착하여 실험에 요구되는 낮은 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 압력 조절기 다음에는 기체용 여과기를 연결하여 마이크로채널 실험에 영향을 미칠 수 있는 불순물을 제거하였다. 압력 조절기와 필터를 통과한 질소 기체는 초순수수가 들어있는 탱크로 연결되어 초순수수의 유동을 발생시킨다. 이 유동은 탱크 다음에 설치된 유체용 여과기를 통과하면서 다시 한번 불순물이 제거된다.

마이크로채널의 파이렉스 유리로 제작된 상부구조 위에 파이렉스 유리 상부구조와 동일한 형상의 아크릴 판을 부착하여 내부의 압력으로부터 채널을 보호하고 마이크로채널과 실험 루프를 이어주는 커넥터의 연결을 가능하게 하였다. 이 커넥터에는 실험을 위한 작동유체를 공급하고 배출하는 관뿐만 아니라 마이크로채널 입/출구의 유체 온도를 측정하는 열전대 (Omega K-type)와 입/출구의 압력차를 측정하기 위한 압력계 (SO TECH DPR 20C, 0~5 bar, 0.03% F.S.)가 연결되어 있다. 마이크로채널에서 배출된 작동유체의 무게를 전자저울 (AND GR-200, 0.1 mg)로 측정하여 마이크로채널 내의 유속을 측정하였다.

마이크로채널의 발열체에 전력공급기 (Agilent E3659A)를 이용하여 전력을 공급하고, 가해진 전압과 전류는 정보수집기 (Yokogawa MX100)를 이용하여 측정하였다. 마이크로채널 온도센서의 저항값은 정보수집기 (Agilent 34970A, 34901A)를 이용하여 측정하였다.

## 2.3 실험방법

본격적인 실험에 앞서 마이크로채널 가열면의 국소 온도를 측정할 온도센서의 온도에 따른 저항값의 변화를 측정하여 그 관계식을 구하여야 한다. 이 저항과 온도의 관계는 오븐 (Thermo Scientific

Heraeus T6)을 이용하여 측정하였다.

실험을 하기 위해서 먼저 탱크에 초순수를 채운다. 고압 질소 용기의 밸브를 열고 압력조절기를 조절하여 원하는 압력을 설정한다. 설정된 압력은 압력조절기의 압력계와 작동유체 탱크에 설치된 압력계로 측정이 가능하고 실제 마이크로채널에 가해지는 압력은 채널 입구부에 설치된 압력계로 측정한다. 이 압력값과 채널 출구부에 설치된 압력계에서 측정된 값의 차가 마이크로채널 입/출구 간의 압력강하값이 된다. 마이크로채널에 가해진 압력과 내부의 유동이 정상상태에 도달할 때까지 기다린다. 유동이 정상상태에 도달하면 마이크로채널의 발열체에 원하는 전력을 가하고 다시 정상상태에 도달하기를 기다린다. 발열체에 가해진 전압은 정보수집기를 통하여 직접 측정할 수 있지만 전류값은 정보수집기 기능상의 제한으로 인해 표준저항을 이용해 간접적으로 측정한다. 각 온도센서의 저항값을 측정하여 마이크로채널 내부의 국소 온도 분포를 구하고, 실험 수행 중 특정 시간동안 배출된 작동유체의 무게를 측정하여 유속을 계산한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 마이크로채널

이번 연구에서 실험한 마이크로채널의 너비는 150  $\mu\text{m}$ 로 설계하였다. 채널의 높이는 다양하게 조절할 수 있지만 이번 실험에서는 정사각형 모양의 단면을 가진 채널을 만들기 위하여 150  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 제작된 마이크로채널의 너비와 높이를 확인하기 위하여 광학현미경 (Olympus STM6)을 이용하여 측정하였다. 채널의 벽을 구성하는 물질은 전술한 바와 같이 SU-8 이고 채널 상부 구조를 벽 구조와 결합시키는 접합층도 SU-8 이기 때문에 채널의 좌/우면과 윗면이 모두 SU-8 로 이루어져 있다. 이로 인해 서로 다른 성질을 가진 벽들로 구성된 채널에서 발생할 수 있는 복잡한 영향을 최소화할 수 있었다.

마이크로 채널 유동의 대류열전달을 고려할 때, 채널 입구에서 유동이 수력학적으로, 또는 열적으로 발달했는지 여부가 매우 중요하다. 이것은 이러한 조건에 따라 입구 영역에서의 열적 현상이 달라지는데, 일반적인 마이크로채널의 응용 상황에서는 입구 영역의 영향이 크게 나타나기 때문이다. 이번 연구에서는 균일 열유속을 한 면에 가지고 유동은 완전 발달되었으며 열적으로는 발달되

기 시작하는 마이크로채널 내부의 열전달을 관찰하기 위해 채널 바닥 면의 발열체가 마이크로채널의 입구부터 존재하는 것이 아니라 중간부터 존재하도록 설계하였다. 입구에서 채널 중심까지의 거리는 이번 연구의 모든 실험 조건을 수력학적 입구영역의 길이를 구하는 다양한 관계식에 대입하여 구한 값보다 길기 때문에 이 조건을 만족한다. 마이크로채널이 실제 적용되는 상황도 동시에 발달되는 유동보다 수력학적으로는 발달되었고 열적으로는 발달하는 조건이 일반적이다.

이번 실험의 주 목표인 채널 방향으로의 높은 분해능을 가진 국소 온도를 측정하기 위하여 온도센서의 채널 방향 폭을 최소화하였다. 마이크로채널의 제작 공정을 수행한 반도체공동연구소의 장비로 구현 가능한 최소 선폭으로 설계하였다. 각 지점에서 채널 너비 방향으로는 중간 부분의 평균된 값을 구하고자 하였다. 이에 따라 온도센서는 3  $\mu\text{m}$  x 50  $\mu\text{m}$ 의 치수를 가지도록 설계하였다. 또한 이번 연구에서는 유동이 열적으로 발달하기 시작하는 열적 입구 영역의 국소 온도 분포를 측정하는데 집중하였다. 이에 따라 발열체 시작 위치에서부터 20  $\mu\text{m}$  간격으로 11 개의 온도센서를 배치하였다.

#### 3.2 마이크로채널 내부의 유체 유동

실험을 통해 작동유체의 질량유량  $\dot{m}$ , 채널 입/출구간의 압력강하  $\Delta P_m$ 를 측정하였다. 압력 구배, 레이놀즈 수  $Re$ , 무디마찰계수  $f$ , 마찰계수 상수  $C_f$  등의 유체 유동의 특성을 표현하는 다른 변수들은 이 측정값을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 마이크로채널 입구와 출구 영역의 급격한 단면적의 변화로 인해 압력손실이 발생한다 [12]. 마이크로채널의 수력직경  $D_h$ 는 채널 전/후의 집수공에 비해 무시할 수 있기 때문에 입/출구에서의 압력손실은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_m = 0.42 \frac{\rho V^2}{2} = 0.42 \frac{\rho Q^2}{2A_c^2} = 0.42 \frac{\dot{m}^2}{2A_c^2 \rho} \quad (1)$$

$$\Delta P_{out} = \frac{\dot{m}^2}{2A_c^2 \rho} \quad (2)$$

따라서, 마이크로채널로 인해 발생한 정미압력 강하는 다음과 같다.

$$\Delta P_{net} = \Delta P_m - \Delta P_{in} - \Delta P_{out} \quad (3)$$

이 값을 이용하여 다음 식으로 무디마찰계수를 구한다.

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\Delta P_{net}}{L} \quad (4)$$

$$f = \frac{-(dP/dx)D_h}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V^2} \quad (5)$$

무디마찰계수와 레이놀즈 수는 다음의 관계를 가진다.

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (6)$$

$$C_f = f \cdot Re \quad (7)$$

이 계산과 관련된 물의 밀도, 점성계수와 같은 물성치는 마이크로채널의 입구 온도를 기준으로 구하였다.

마이크로채널 내부를 지나는 물의 유동은 마찰계수를 이용하여 해석할 수 있다. 식(5)에 실험으로 구한 값들을 대입하여  $f_m$ 를 구한다. 이  $f_m$ 과 실험으로 구한  $Re$ 와의 관계를 완전발달된 층류유동에 대한 기존의  $f$ 와  $Re$ 의 관계에 대한 이론식과 비교해본 결과 실험을 수행한 모든  $Re$  영역에서 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이러한 사실은 실험에 사용된 마이크로채널을 설계한 바와 같이 사각채널로 간주할 수 있고 채널 내부 면의 조도 또한 무시할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 이 마이크로채널 정도의 채널 크기에서는 기존의 매크로채널에서의 유동 특성과 동일한 유동 특성이 나타난다는 것을 확인하였다.

유체의 유동 특성을 나타내는 또 다른 파라미터로  $C_f$ 가 있다. 기존의 층류유동에 대한 이론으로부터 사각형 형상의 단면을 가진 채널 유동의  $C_f$ 는 채널 단면의 형상에 의해서만 결정된다는 것이 알려져 있다. 따라서 이번 실험에서도  $Re$ 에 관계없이 일정한  $C_f$ 값이 나와야 한다. 이러한 관계를 확인하기 위하여 다음과 같이 정의된 규격화된 마찰계수 상수  $C_f^*$ 를 도입하였다.

$$C_f^* = \frac{C_{f,m}}{C_{f,theory}} \quad (8)$$

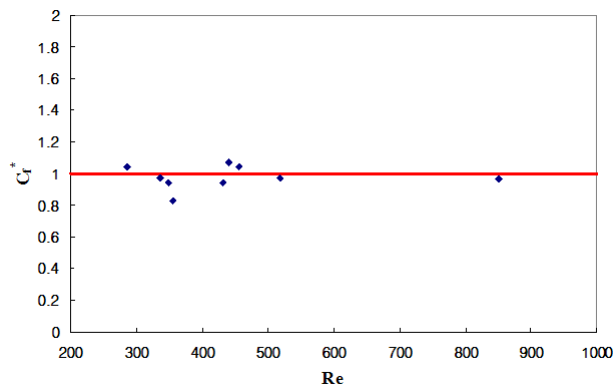


Fig. 3 The normalized friction factor constant,  $C_f^*$ .

어떠한 채널 단면형상에 대해서도 해석적인 방법을 통해 이론적인  $C_f$ 값을 구할 수 있다. 위 식의  $C_{f,theory}$ 는 사각채널의 해석해를 통해 구하였다 [12, 13]. Fig. 3은  $Re$ 의 함수로 나타낸  $C_f^*$ 의 그래프 보여준다. Fig. 3에 나타나 있듯이, 모든 실험  $Re$  영역에서  $C_{f,m}$ 값이 이론값의 20% 오차 이내에 위치한다. 이 그래프를 통해서도 이번 연구에 사용된 마이크로채널이 설계대로 잘 제작되었으며, 이 크기 영역에서는 기존의 이론이 여전히 성립한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 이 마이크로채널을 열전달 실험에 이용할 수 있음을 확인하였다.

### 3.3 마이크로채널 내부의 열전달

마이크로채널 내부의 대류열전달계수는 다음의 식을 통해 구해진다.

$$h = \frac{q}{T_w - T_{mean}} \quad (9)$$

여기서  $q$ 는 발열체에 공급한 전력 중 채널 내부의 유체로 전달된 부분을 발열체의 면적으로 나눈 값이다.  $T_w$ 는 채널 내부의 가열면을 따라 측정 한 값이고,  $T_{mean}$ 은 채널 내 유체가 발열체 입구에서부터  $T_w$  측정 지점까지 이동하는 동안 발열체로부터 공급받은 열량에 의해 가열된 온도로, 측정

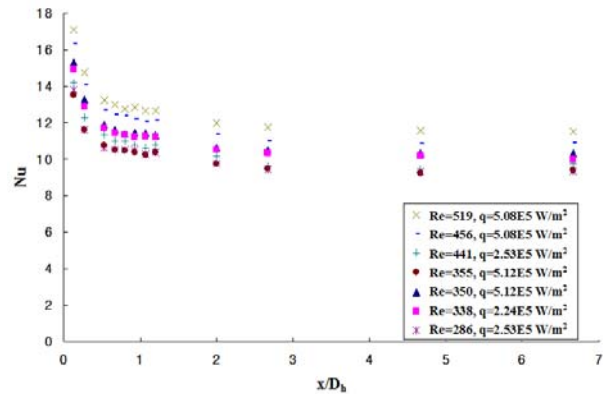


Fig. 4 Local Nusselt number distributions at different Reynolds numbers and heat flux.

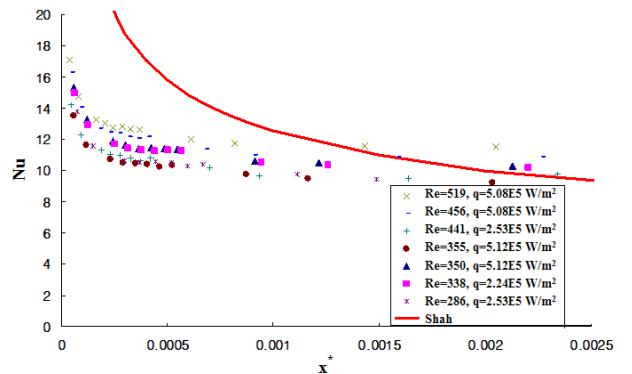


Fig. 5 Comparison of the local Nusselt numbers and the thermal entrance solution for circular duct.

지점 유체의 평균 온도이다. 국소 누셀트 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (10)$$

각 열유속과 레이놀즈 수에 따른 국소 누셀트 수를 구하여 Fig. 4에 나타내었다. 마이크로채널의 국소 누셀트 수도 일반적인 크기의 채널 내부 열전달의 경우와 같이 레이놀즈 수가 클수록 증가하는 경향을 보인다.

채널 내부의 층류 강제대류열전달은 오랜 시간 동안 많은 연구자에 의해 연구되어 왔다. 다양한 채널 단면 형상과 가열 조건에 대한 해가 해석적, 수치적으로 구해져 있다. 이 해들은 국소 누셀트 수가 다음과 같이 정의된 무차원수에 의해 하나의 선으로 표현된다는 것을 보여준다.

$$x^* = \frac{x}{D_h \cdot Re \cdot Pr} \quad (11)$$

마이크로채널에서도 이와 같은 관계가 성립하는지 확인하기 위해 실험 결과를  $x^*$ 를 이용해 Fig. 5에 나타내었다. 실험값과 비교하기 위하여 Shah [14]가 구한 원형 채널에서 수력학적으로 완전 발달하고 열적으로 발달하는 균일 열유속을 가진 열전달의 국소 누셀트 수를 같이 나타내었다. 이 값들은 실험과 동일한 조건에서 구한 것이 아니기 때문에 값을 실험값과 직접 비교할 수는 없지만 그 경향만은 확인할 수 있다. 실험으로 구한 입구 영역에서의 국소 누셀트 수의 변화는 Shah가 구한 값들의 변화와 유사하다. 국소 누셀트 수와  $x^*$ 의 계산에 이용된 물성치들은 유동의 입구온도를 적용하여 구하였다.

#### 4. 결론

마이크로채널에서의 유동과 열전달을 측정할 수 있는 설계와 제작 방법을 제시하였다. 이 마이크로채널은 균일 열유속 조건에서 국소온도분포를 정확히 측정할 수 있으며 특히 열적 입구 영역의 온도 변화를 집중적으로 측정하도록 설계되었다. 이번 연구에는 정사각형의 채널 단면이 이용되었지만 채널 높이 조절을 통해 다양한 조건에서도 실험이 가능하다. 이번 연구를 통해 마이크로채널의 유동은 큰 채널의 유동과 동일한 특성을 보임을 확인하였다. 다양한 조건의 국소 누셀트 수를 실험으로 구하여 제시하였다. 이 값들을 기존의 해와 비교하였으며 입구 영역에서 서로 유사한 변화를 보였다.

#### 참고문헌

- (1) Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., 1981, "High-performance heat sinking for VLSI," *Electron Dev. Lett., IEEE*, Vol. 2, No. 5, pp. 126~129.
- (2) Morini, G. L., 2004, "Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results," *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 43, No. 7, pp. 631~651.
- (3) Gao, P., Person, S. L. and Favre-Marinet, M., 2002, "Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels," *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 41, No. 11, pp. 1017~1027.
- (4) Warrier, G. R., Dhir, V. K. and Momoda, L. A., 2002, "Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, No. 1, pp. 53~64.
- (5) Gamrat, G., Favre-Marinet, M. and Asendrych, D., 2005, "Conduction and entrance effects on laminar liquid flow and heat transfer in rectangular microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, No. 14, pp. 2943~2954.
- (6) Jackman, R. J., Floyd, T. M., Ghodssi, R., Schmidt, M. A. and Jensen, K. F., 2001, "Microfluidic systems with on-line UV detection fabricated in photodefinable epoxy," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, No. 3, pp. 263~269.
- (7) Cui, L., Zhang, T. and Morgan, H., 2002, "Optical particle detection integrated in a dielectrophoretic lab-on-a-chip," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, No. 1, pp. 7~12.
- (8) Li, S., Freidhoff, C. B., Young, R. M. and Ghodssi, R., 2003, "Fabrication of micronozzles using low-temperature wafer-level bonding with SU-8," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, No. 5, pp. 732~738.
- (9) Mogensen, K. B., El-Ali, J., Wolff, A. and Kutter, J. P., 2003, "Integration of polymer waveguides for optical detection in microfabricated chemical analysis systems," *APPLIED OPTICS*, Vol. 42, No. 19, pp. 4072~4079.
- (10) Pan, C. T., Yang, H., Shen, S. C., Chou, M. C. and Chou, H. P., 2002, "A low-temperature wafer bonding technique using patternable materials," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 12, No. 5, pp. 611~615.
- (11) Tuomikoski, S. and Franssila, S., 2005, "Free-standing SU-8 microfluidic chips by adhesive bonding and release etching," *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 120, No. 2, pp. 408~415.
- (12) White, F. M., 1994, "Fluid mechanics," McGraw-Hill New York.
- (13) Shah, R. K. and London, A. L., 1978, "Laminar Flow Forced Convection in Ducts," Academic Press.
- (14) Shah, R. K., 1975, "Thermal entry length solutions for the circular tube and parallel plates," *Proc. 3rd Natl. Heat Mass Transfer Conf., Indian Inst. Technol., Bombay*, Vol. 1, pp. 11~75.