

## 실리콘 웨이퍼 상에 제작된 미소 유로에서의 유동특성

김형우\* · 원찬식\* · 정시영\* · 허남건\*\*  
(2001년 5월 23일 접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

### Flow Characteristics in a Microchannel Fabricated on a Silicon Wafer

Hyungwoo Kim, Chan-Shik Won, Siyoung Jeong and Nahmkeon Hur

**Key Words:** Microchannel(미소유로), Microfluidics(미소유체 역학), Pressure Loss(압력손실) Friction Factor(마찰계수), MEMS

#### Abstract

Recent developments in microfluidic devices based on microelectromechanical systems (MEMS) technique find many practical applications, which include electronic chip cooling devices, power MEMS devices, micro sensors, and bio-medical devices among others. For the design of such micro devices, flows characteristics inside a microchannel have to be clarified which exhibit somewhat different characteristics compared to conventional flows in a macrochannel. In the present study microchannels of various hydraulic diameters are fabricated on a silicon wafer to study the pressure drop characteristics. The effect of abrupt contraction and expansion is also studied. It is found from the results that the friction factor in a straight microchannel is about 15% higher than that in a conventional macrochannel, and the loss coefficients in abrupt expansion and contraction are about 10% higher than that obtained through conventional flow analysis.

#### 기호설명

$f_D$  : Darcy의 마찰계수

$f_F$  : Fanning의 마찰계수 ( $f_F = \frac{f_D}{4}$ )

$Re$  : Reynolds 수

$\Delta P$  : 압력손실

$\rho$  : 밀도

$A$  : 단면적 (폭 × 깊이)

$P$  : 접수길이 ( $2 \times$  폭 × 깊이)

$L$  : 길이

$V$  : 유체의 평균 속도

$D_h$  : 수력직경

$\mu$  : 점도

$\tau_w$  : 전단응력

$C$  : 마찰상수 ( $C = f \cdot Re$ )

$\alpha^*$  : 단면의 길이비

$K_L$  : 부차적손실

$h_L$  : 수두손실

\* 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : syjeong@sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8633 FAX : (02)712-0799

\*\* 서강대학교 기계공학과

## 1. 서론

최근에 MEMS (Microelectromechanical system) 기술을 이용하여 제작된 미소 유체 장치 (Microfluidics device)들은 전자칩 냉각 시스템, 생화학적 분석 시스템, 유체 분사 시스템, DNA chip 등 유체를 미소 단위로 제어해야 하는 분야에서 활발히 연구되고 있다. 미소 유체 장치는 마이크로 밸브, 마이크로 열교환기 (microchannel heatsink) 및 마이크로 펌프 등의 요소들을 포함하는데 그 중에서도 미소 유로에 관한 연구는 미소 유체 공학에서 가장 기본적이고 중요한 주제이다. 미소 유로에 관한 연구는 지난 10여 년 동안 활발히 진행되어 왔지만 아직까지 실험 결과들이 연구자에 따라 상당히 차이를 보이고 있고 유동 특성에 관한 이론도 정립되지 못한 상태이다. 거시적인 유로의 유동에서 무시되었던 요인들이 미시적인 유로 유동에서는 중요한 요인으로 작용할 수도 있기 때문에 기존의 유동 관계식으로는 설명할 수 없는 현상이 미소 유로에서는 나타나게 된다. 예를 들면 지난 10여 년 간의 연구에서는 유체와 벽면 경계층에서 일어나는 이온 집중화 현상으로 인한 관내에서의 역류 현상, 벽면의 표면 거칠기로 인한 낮은 레이놀즈 수에서의 난류로의 이른 천이 현상 등이 논의되었다.

초반기의 미소 유로에 관한 연구에서는 주로 미소 유로에서의 유량이 거시적 유동 관계식으로 예측된 값보다 작게 나타났다. 초반기의 연구에서 이러한 결과가 나오는 이유로는 기술적인 열세에 의한 매우 작은 미소 유로 단면적의 측정과 실험상의 오차가 크기 때문이라고 할 수 있다. 그 이후 고집적화된 전자장치의 냉각 시스템에 응용하기 위하여 많은 연구가 이루어졌다. Tuckerman과 Pease<sup>(1)</sup>는 미소 유로를 이용한 전자 장치의 냉각장치 (Microchannel heatsink)를 개발하였는데, 칩의 단위 면적 당 약 1000 W/cm<sup>2</sup>의 열량을 제거할 수 있었다. Wu와 Little<sup>(2)</sup>은 사다리꼴 단면의 미소 유로에서 유동 실험을 수행하여 층류 영역에서의 기체의 마찰계수가 예상된 값보다 크다고 보고하였다. Harley와 Bau<sup>(3)</sup>도 역시 사다리꼴과 직사각 단면인 미소 유로에서 유체 유동의 마찰계수를 구하였고 그 값이 기존의 거시적 유동 관계식에 의한 값과 큰 차이가 있음을

밝혀내었다. Pfahler<sup>(4)</sup>는 극성을 띤 유체와 무극성 유체의 유동 실험을 수행하였는데 수력직경이 15  $\mu\text{m}$  미만인 미소 유로에서는 유체 유동의 마찰 계수가 거시적 유동 관계식에 의한 값보다 작다고 하였으며 수력직경이 40  $\mu\text{m}$  이상인 미소 유로에서는 크다고 하였다. 최근에는 Weilen,<sup>(5)</sup> Yang,<sup>(6)</sup> Mala와 Li<sup>(7)</sup>가 미소 유로에서 여러 유동 실험을 하였는데, 이들은 미소 유로에서 예측된 결과가 나타나지 않는 것에 대하여 EDL (Electrical Double Layer)이나 관의 거칠기의 영향을 이유로 들었다. 이렇듯 현재까지의 미소 유로의 연구에서는 거시적인 관점과는 달리 유동 해석에 관한 식이 정립되어 있지 않다. 이는 곧 미시적인 관점에서 물리적인 해석이 아직도 진행 중에 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 미소 유로에서의 유동특성을 좀더 명확히 이해하기 위하여 실리콘 웨이퍼상에 미소 유로를 제작하여 유로에서의 압력 손실을 측정하였다. 미소 유로는 직선 유로와 돌연 확대 및 축소 유로가 제작되었고 각각에 대하여 마찰 계수 및 손실 계수를 구하여 거시적 관점에서 해석적으로 구한 값과 비교하였다.

## 2. 관내 유동 특성

### 2.1 매크로 스케일에서의 유동 특성

매크로 스케일에서의 직선 유로에서 비압축성, 완전 발달 유동의 압력손실은 Darcy-Weisbach 관계식으로 표시된다.<sup>(8)</sup>

$$\frac{\Delta P}{\rho} = f_D \left( \frac{L}{D_h} \right) \left( \frac{V^2}{2} \right) \quad (1)$$

위의 식에서 수력직경  $D_h$ 와 레이놀즈 수  $Re$  그리고 마찰계수(Darcy's friction factor)  $f_D$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

$$f_D = \frac{8\tau_w}{\rho V^2} \quad (3)$$

$$f_D = \frac{C}{Re} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (5)$$

층류 영역에서의 완전 발달 비압축성 유동에서 마찰계수는 레이놀즈 수에 반비례한다. 위의 식에서  $C$ 는 단면 형상에 의하여 결정되는 상수인데 원형 단면의 관에서는  $C=64$ 이고 단면이 직사각형이나 사다리꼴인 경우  $C$ 는 관의 종횡비 ( $\alpha^*$ )와 기울어진 각에 의존하며 단면이 직사각형인 경우 96에서 56까지 변하며 다음과 같이 종횡비( $\alpha^*$ )의 함수로서 나타낼 수 있다.

$$f_D = 96[1 - 1.3553\alpha + 1.9467\alpha^2 - 1.7012\alpha^3 + 0.9564\alpha^4 - 0.2537\alpha^5] \quad (6)$$

단면이 사다리꼴인 경우는 수식으로 된 표현이 없어  $f_F Re$  수를 단면의 종횡비와 기울임 각에 대해서 보여주는 Fig. 1을 이용하여 마찰계수를 구할 수 있다.<sup>(9)</sup> (Fig. 1에서  $f_F$ 는 Fanning's friction factor로서  $4f_F = f_D$ 의 관계가 있다)

일반적인 유로에서 흔히 나타날 수 있는 형태로서 돌연 확대, 축소 유로를 들 수 있다. 이러한 돌연 확대, 축소 유로는 전체 손실에서 큰 부분을 차지 할 수도 있으므로 전체적인 시스템의 설계에 앞서 정확히 해석되어야 한다. 돌연 확대, 축소 유로에서의 손실은 손실계수  $K_L$ 로 표현되며 다음과 같이 정의된다.<sup>(10)</sup>

$$K_L = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (7)$$

2.2 마이크로 스케일에서의 유동 특성

지금까지의 연구에 의하면 마이크로 스케일에서의 유동은 표면 조도와 EDL의 영향을 크게 받는 것으로 나타나있다.

2.2.1 표면조도

미소 유로에서는 상대적인 표면조도가 매크로 스케일 유동에 비해 큼으로 인해 매크로 스케일

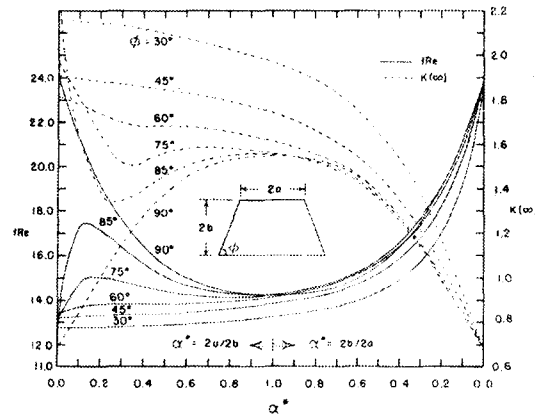


Fig. 1  $f_F Re$  for trapezoidal duct fully developed laminar flow (Shah and London et al.)

유동에서 보다 낮은 레이놀즈 수에서 난류로 천이가 일어나는 것으로 연구되었다. Weilen<sup>(5)</sup> 등은 Merkle<sup>(11)</sup>의 viscosity model을 기본으로 표면에서의 거칠기로 인하여 층류 유동장이 파괴되고 벽면의 유동 경계층으로 영향을 주는 마치 난류영역에서 eddy viscosity와도 같은 역할을 하는 roughness viscosity를 이용하여 원형과 사다리꼴 형태의 단면에서 roughness viscosity model을 세웠다.

$$\frac{\partial u^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{(\mu + \mu_R)} \frac{dP}{dx} \quad (8)$$

여기서  $\mu_R$ (Roughness viscosity)은 벽면에서 멀어질수록 또는 레이놀즈 수가 증가할수록 감소하는 값으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\mu_R}{\mu} = A Re_k \frac{(R_L - l_{min})}{k} \left( 1 - \exp \left( - \frac{Re_k}{Re} \frac{(R_h - l_{min})}{k} \right) \right)^2 \quad (9)$$

A는 실험에서 구해지는 계수이고  $R_h$  수력직경의 1/2인 수력반경을,  $k$ 는 거칠기를,  $l_{min}$ 은 실리콘 표면 방향으로 최소 거리 즉, 유동의 흐름에 수직하는 거리를 의미한다.  $Re_k$ 는 국부적인 거칠기에 의한 레이놀즈 수로서  $Re_k = U_k \rho k / \mu$ 로 정의된다.  $U_k$ 는 거칠기 요소 끝부분에서의 속도

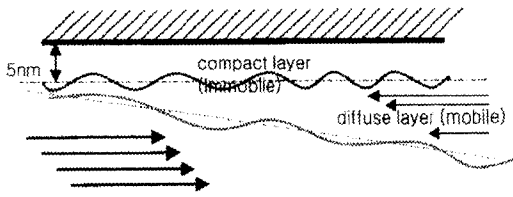


Fig. 2 Schematic diagram of EDL effect on microscale flow

Table 1 Specifications of experimental apparatus

<b>Syringe Pump</b>	
Model :	KDScientific, KDS 100
Flow rate range :	0.2 $\mu$ l/hr - 506ml/hr
<b>Pressure Transducer</b>	
Model :	Omega Engineering Inc. PX 180-015GV
Range :	0 - 15 PSI
Accuracy :	$\pm$ 0.3 %
Model :	Konics, PT-3300 series
Range :	0 - 10 kgf/cm <sup>2</sup>
Accuracy :	$\pm$ 0.3 %
<b>Data Aquisition</b>	
Model :	Yokogawa, DC 100, 40ch
Maximun input channel :	40 ch
Scan Cycle time :	2 - 256 sec
<b>Digital Scale</b>	
Model :	Shimadzu, Libror AEX 200G
Readability :	0.1g
Linearity :	Within $\pm$ 0.2mg

를 의미한다.

2.2.2 전기 이중막 현상(EDL effect)

전기 이중막 현상(EDL, Electrical Double Layer)은 움직이지 않는 막(Compact Layer)과 움직이는 막(Diffuse Layer)으로 구성되어 있다. 전기 이중막 현상은 극성 유체(Polar liquids, dipole로 구성되어 있는 유체)가 다른 물질과의 접촉으로 인하여 접경하는 면에서 발생하는 이온들의 이동에 의해서 일어난다. Compact layer 안의 이온들은 전기적으로 끌리는 힘을 강하게 받아 두께가 약 5nm인 고정된 이온 막을 형성하게 된다. 반면에 전기적으로 끌리는 힘을 compact layer 안에 있는 이온들 보다 약한 diffuse layer안의 이온들은 유동에 점성 효과를 증대시켜 간섭을 주게 된다. Fig. 2는 전기 이중막 현상을 도식적으로 그린 것을 보여준다.<sup>16)</sup>

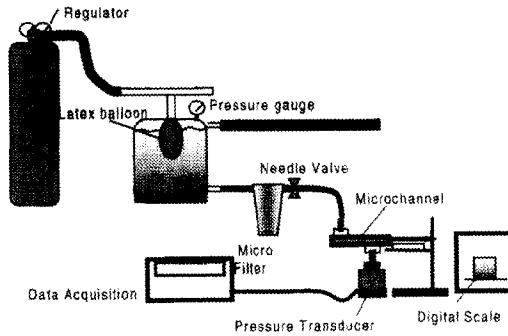


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

3. 실험 장치

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 3에 표시된 것처럼 압력탱크, 필터, 니들 밸브 등 유량 공급 장치와 압력계 센서, data aquisition 장치 및 정밀저울로 구성되어 있다.

3.1 유량 공급 장치 및 측정 장치

유량 공급 장치로서 압력 탱크를 사용하였다. 압력 탱크는 DI 수(Deionized water)를 채운 후에 질소가스를 주입시켜 유량을 공급하는 장치로서 5 bar의 압력까지 미소 유로로 물을 공급 할 수 있다.

압력 탱크내의 압력은 미세 압력 조절이 가능한 레귤레이터(Regulator)를 질소 가스탱크에 장착하여 일정하게 유지시켰다. 질소가스는 압력 탱크 상부로 공급되는데 질소가스가 물에 녹지 않도록 천연고무 소재의 풍선을 설치하였다. 압력 수조에서 공급되는 물은 1 $\mu$ m 입자를 제거할 수 있는 필터에서 다시 한번 불순물이 제거 된 후 미소 유로로 공급된다. 필터와 미소 유로와의 사이에는 미세한 유량의 조절이 가능한 니들 밸브(Swagelok사 제품)를 설치하였다. 압력계 센서는 10 bar의 압력까지 측정할 수 있으며 data aquisition에 연결하였다. 유량 측정을 정확히 하기 위해 미소 유로 출구(대기상태)에서 나오는 물(DI 수)을 흡수력이 강하며 먼지가 나지 않는 종이로 흡수시켜서 정밀 저울로 질량유량을 측정하였다. 각 실험 장치의 사양은 Table 1에 표시하였다.

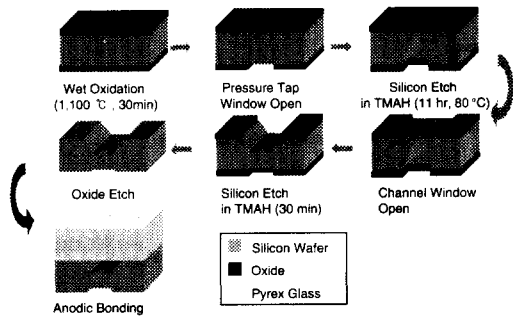


Fig. 4 Fabrication procedure of the straight microchannel

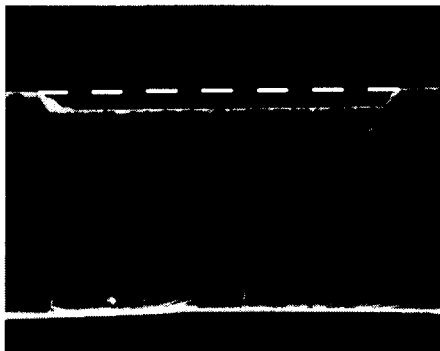


Fig. 5 Cross sectional SEM photo of the microchannel

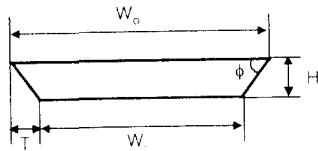


Fig. 6 Schematic cross-sectional diagram of the Microchannel

3.2 직선유로

미소 유로는 (100) 실리콘웨이퍼 상에 습식 식각 공정을 사용하여 사다리꼴 단면의 형태로 제작하였다. 유로내의 정압의 측정위치는 유로 출구에서 입구쪽으로 10mm, 15mm 위치에 설계되었다. 습식 식각시 부식액으로는 EDP [Ethylene-diamine/Pyrocatechol/Water]와 TMAH를 사용하였으며 제작 공정은 Fig. 4에 나타나 있다.<sup>(12)</sup> 직선유로의 단면 SEM 사진은 Fig. 5에서 보여준다. 제작된 직선유로의 치수는 Fig. 6과 Table 2에 표시되어 있다.

Table 2 Aspect ratio  $\alpha^*$ , friction factor constant  $C$  and characteristic dimension of the microchannel (straight type)

	$D_h$	
	49.5	73.5
$\alpha$	0.028	0.03
$C \cdot Re$	90.1	88.8
$W_o$	1025	982
$W_i$	990	926
$T$	18	28
$H$	25.5	39.5
$D_p$	49.5	74
$\phi$	55	55
$L$	14360	14200

3.3 돌연 확대 및 축소 유로

돌연 확대 및 축소 유로에서는 ICP를 사용하여 직사각 단면을 가진 유로로 제작하였다. 직선유로의 공정과는 달리 유로를 식각한 후에 압력 탭을 식각하였다. 그 결과 압력 탭이 재식각되는 것을 방지하여 유로내의 유동의 간섭을 줄일 수 있게 하였다. 돌연 확대 및 축소 유로는 Fig. 7에서 보여준다. 공정은 Fig 8에 나타나 있다. Fig. 9는 압력 측정용 탭이 밑에서 유로 중앙에 관통 식각되어 있는 모습을 보여준다. Table 3에서는 돌연 확대 및 축소 유로 단면의 종횡비와  $f_D \cdot Re$  값을 표시하였다.

3.4 연결부 (Micro-macro interface)

연결부는 미소 유로에 유량의 공급과 유로에서 유동의 정압을 측정하기 위한 장치를 연결하기 위하여 제작되었다. 연결부는 미소 유로의 입구 부분과 유로의 정압 측정 위치에 접착되어 각각 유량 공급기와 압력 측정용 센서로 연결시켰다. 연결부는 아크릴 재질로 유로와 접촉하는 면 (silicon)에 접착제가 스며들 수 있도록 틈을 가공하였고 구멍을 가공하여 튜빙을 집적 접착하였다.

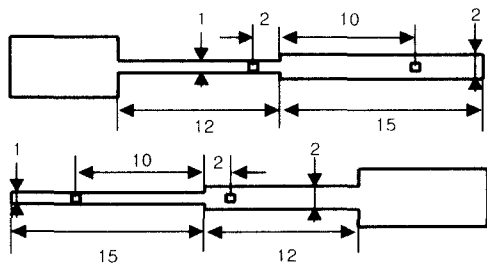


Fig. 7 Schematic diagram of the micro-channel with abrupt expansion and contraction (all in mm)

Table 3 Aspect ratio  $\alpha^*$  and friction factor constant  $C$  for the microchannel with abrupt expansion and contraction

Pressure measurement point	Abrupt expansion		Abrupt contraction	
	1	2	1	2
$D_h$	120.1	124.3	124.3	120.1
$\alpha^*$	0.064	0.032	0.032	0.064
$C=f_D \cdot Re$	88.4	92	92	88.4

#### 4. 실험 방법

##### 4.1 직선 유로의 실험 방법

직선 유로의 실험은 유로내의 압력 손실을 유동이  $Re$  수 100정도까지의 범위에서 측정하였다. 압력측정 탭은 미소 유로 입구에서 5mm 떨어진 지점에 위치하고 있으므로 위의  $Re$  수 범위에서는 입구 영역을 훨씬 벗어나 완전 발달 유동이 형성된다.<sup>(10)</sup> ( $5\text{mm} \gg l_e = 0.06Re \cdot D$ ) 압력손실은 정압 측정위치와 출구 대기압과의 차압을 측정함으로써 구하였다. 각기 다른 수력직경의 유로에 대하여 위와 같은 방법으로 실험이 진행되었으며 실험에 사용된 물의 물성치는 매 실험마다 실험실과 작동유체의 평균온도 조건에 부합하는 물성치를 사용하였다. 실험 조건은 Table 4에 표기하였다.

직선 유로의 실험에서는 압력 수조에서 공급되는 유량을 미소 유로 전에 설치되어있는 나들 밸브로 유량을 조절하여 미소 유로내의 정압을 측정하는 압력계가 어느 한 고정된 값(Equilibrium state)을 1분 이상 유지하면 미소 유로 출구에서 유량을 단위시간당 흡수지로 흡수시켜 질량유량으로 측정하였다. 압력 수조는 1bar에서 6bar 까지 가압시키면서 실험을 하였다.

##### 4.2 돌연 확대 및 축소 유로의 실험 방법

돌연 확대 및 축소 유로의 실험은 유로내에서의 유속이 매우 큰 관계로 유량을 측정하는데 있어서 매우 어려웠다. 압력은 확대 축소되기 전 2mm위치(측정위치 1)와 후 10mm(측정위치 2)에

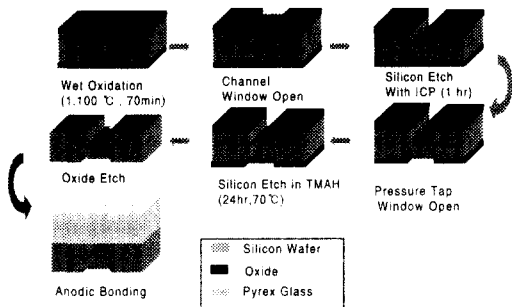


Fig. 8 Fabrication procedure of the microchannel with abrupt expansion and contraction

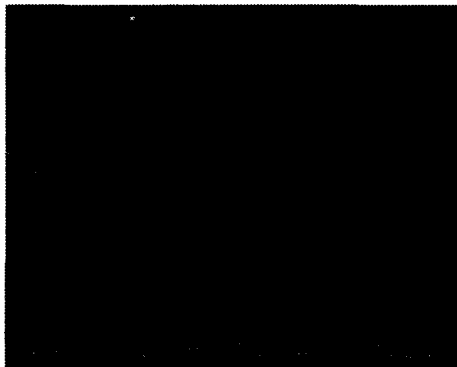


Fig. 9 SEM photo showing pressure tap etched on the microchannel with abrupt expansion and contraction

유로의 연결부에서는 높은 압력에 견디기 위해 에폭시 계열의 접착제로 먼저 연결부를 접착한 후에 실리콘으로 실링을 하였고 그 결과 약 4bar의 압력을 견딜 수 있었다.

**Table 4** Experimental condition

	Mean Temp of Fluid	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	Flow rate
Straight	25°C	999	1.12E-3	1-250 (ml/hr)
Abrupt contraction	25°C	999	1.12E-3	370-1440 (ml/hr)
Abrupt Expansion	25°C	999	1.12E-3	150-2160 (ml/hr)

서 측정되었다. 손실계수는 측정된 정압을 토대로 식 (1)과 (7)를 사용하여 확대 축소 전 1mm와 후 2mm인 위치에서 계산되었다. 축소 확대 후의 압력 손실은 직선 유로에서 실험결과 값인 마찰계수(Shah and London)의 1.2배 값을 적용하여 계산되었다.

### 5 실험 결과

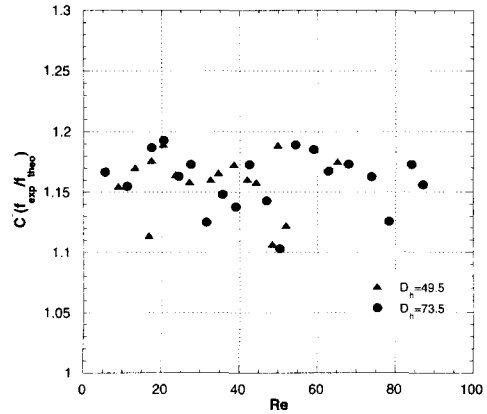
#### 5.1 직선 유로의 실험 결과

Fig. 10은 두 종류의 미소 직선 유로 ( $D_h=49.5, 73.5\mu\text{m}$ )에 대한 마찰 계수 실험치( $f_{\text{exp}}$ )와 Shah와 London의 거시적인 이론식( $f_{\text{theo}}$ )의 비를 보여준다. 이 그림에서 실험적으로 구한 마찰계수는 이론적인 값보다 약 10~20% 정도 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 수력 직경이 감소하면 미소 유동의 영향이 증가 할 것이라는 예상과는 달리 수력 직경의 크기의 영향은 특별한 경향을 보이지 않았다. 직관에 대한 실험은 여러차례 반복적으로 수행되어 평균값을 얻었다.

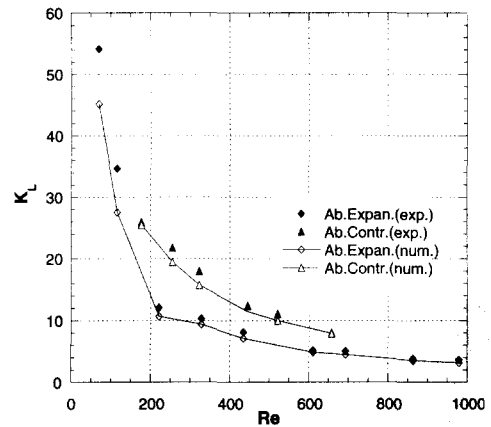
직선 유로 실험의 데이터를 분석하면 미소 유로에서의 실험적인 마찰 손실 계수는 이론치에 비해 평균적으로 15% 정도 높으며 Re 수에는 크게 영향을 받지 않은 것으로 결론지을 수 있다. 미소 유로에서의 마찰 계수의 증가가 어느 영향에 의한 것인지는 판단하기 힘들지만 EDL은 수 nm의 층에 영향을 미치므로 이에 의해 마찰계수의 증가가 일어난 것으로 생각하기는 어렵고 표면조도에 의한 영향으로 추측된다.

#### 5.2 돌연 확대 및 축소 유로의 실험 결과

실험과 별도로 상용 코드인 STAR CD를 사용



**Fig. 10** Friction factor ratio  $C^*$  in a straight microchannel



**Fig. 11** Loss Coefficient of the microchannels with abrupt expansion and contraction

하여 거시적인 관점에서의 수치해석을 실시하였다. 돌연 확대, 축소 유로에서의 손실계수는 층류 영역에서는 Re 수가 증가함에 따라 감소하게 되는데 실험치가 수치해석 결과보다 약 10% 정도 크게 나타났다. 돌연 확대 유로에서는 Re 수가 감소함에 따라 그 차이가 더 커지는 경향을 보였다. 동일한 유량에서는 돌연확대 유로에서 손실이 돌연 축소 유로에서의 손실보다 크게 나타났다.<sup>(12)</sup> 미소 돌연 축소나 확대 유로에서의 손실계수의 증가는 표면 조도의 영향으로는 설명할 수 없으므로 이에 대한 이론적인 연구가 필요하다.

### 5.3 오차 분석

압력 손실 측정시에 발생할 수 있는 주요 오차는 압력계의 정밀도, 물의 온도, 물의 질량 유속(유량), 유로 단면적의 크기 등에서 발생한다. Table 1에 표시된 것처럼 압력계의 오차 범위는  $\pm 0.3\%$ 이고 물의 온도는  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내에서 측정하였습니다. 그리고 물의 질량 유속은 일정시간 동안 흘러나온 물의 양을 측정하였는데, 물의 질량은 수g의 물에 대하여  $\pm 2\text{mg}$ 의 오차범위에서 측정하였고, 시간은 60~120초에 대하여  $\pm 0.2$ 초의 오차범위 이내에서 측정하였다. 그러므로 위의 측정량에 대한 오차는 미미한 것으로 판단되어진다.

단면적 크기의 오차는 측정오차와 가공오차로 나누어 생각할 수 있다. 측정 오차라 함은 측정장치인 마이크로스코프의 오차를 말하는데 이는 1000배의 배율에서 약  $\pm 0.1\mu\text{m}$  정도의 오차를 가진다. 가공 오차는 시편이 에칭액에 의하여 불균일하게 식각되어 발생하는데 본 실험에서 확인한 결과 유로 전반에 걸쳐 약  $\pm 1\mu\text{m}$  정도의 오차를 갖는 것으로 나타났다. 그러므로 25~40 $\mu\text{m}$ 의 깊이를 갖는 본 연구의 유로에서  $\pm 1\mu\text{m}$  정도의 값을 갖는 가공오차가 실험에서 가장 큰 오차의 원인으로 생각되어진다. 압력손실이 유속에 비례한다는 점을 고려하면 가공오차에 의한 압력손실의 오차는  $\pm 4\%$  정도로 추산되며 실험결과에서 나타난 10~15%의 압력손실의 증가는 가공오차로만 설명하기에는 너무 큰 것으로 판단되며 마이크로 스케일의 영향이 작용한 것으로 생각되어진다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼 상에 5종류의 직선 미소 유로( $D_h = 26.35, 67.37, 141.2, 49.5, 73.5\mu\text{m}$ )와 돌연 축소, 확대 부를 제작하여 압력 손실을 측정하였으며 이를 거시적인 유동과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 미소 직선 유로에 실험적인 마찰 계수는 이론치보다 평균적으로 15%정도 높게 나타났으며 두 마찰계수의 비는 Re 수에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 미소 직선 유로에서의 마찰계수의 증가가 어떠한 원인에 의한 것인지 판

단하기는 어렵지만, EDL은 단지 수nm의 층에 영향을 미치는 것을 고려할 때 표면 조도에 의한 영향에 의해 마찰계수의 증가가 발생한 것으로 추정된다.

- 돌연 축소 및 확대 유로의 실험에서는 실험적인 손실계수가 수치해석 결과보다 약 10%정도 높게 나타났으며 그 원인은 확실치 않다. 돌연 축소 및 확대 유로는 표면조도나 EDL의 영향을 받지 않을 것으로 추정되며 증가원인에 대한 새로운 이론적 연구가 필요하다.

## 후 기

“이 논문은 1997년도 한국 학술 진흥 재단의 연구비에 의하여 지원되었음”(KRF-1997-005-E00108).

## 참고문헌

- (1) Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., "High Performance Heat Sinking for VLSI," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-2 No.5 (1981), pp. 126~129.
- (2) Wu, P.Y. and Little, W.A., 1983, "Measurement of Friction Factor for Flow of Gases in very fine Channels used for Microminiature Joule - Thompson Refrigerators," *Cryogenics* 24(8), pp. 273~277.
- (3) Harley J. and Bau H., 1989, "Fluid Flow in Micron and Submicron size Channel," *IEEE Trans.*, pp. 25~28.
- (4) Pfahler, J., 1992, "Liquid Transport in Micron and Submicron size channels," Ph.D Thesis at Univ. of Pennsylvania.
- (5) Weilin, Q., Mala, G. M. and Li, D., 2000, "Pressure Driven Water Flows in Trapezoidal Silicon Microchannels," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 353~364.
- (6) Yang, C. and Li, D., 1998, "Analysis of Electro-kinetic Effects on the Liquid Flow in Rectangular Microchannels," *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects* 143, pp. 339~353.
- (7) Mala, G. M. and Li, D., 1999, "Flow Characteristics of Water in Microtubes," *Int. Journal*



- of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 142~148.
- (8) Benedict R.P., 1980, *Fundamentals of Pipe Flow*, John Wiley & Sons.
- (9) Shah R.K., London A.L., 1978, "Laminar Flow Forced Convection in Ducts," Academic press.
- (10) Munson, B.R., Young, D.F. and Okiishi T.H., 1994, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Wiley, 2nd Ed.
- (11) Merkle, C.L., Kubota, T. and Ko, D.R.S., 1974, "An Analytical Study of the Effects of Surface Roughness on Boundary Layer Transition," AF Office of Science Res., Space and Missile Sys. Org. AD/A004786.
- (12) 김형우, 한재욱, 정시영, 허남건, 2000, "미소 유로에서의 유동 특성에 관한 실험적 연구," 제 1회 한국유체공항공학술대회 논문집, pp. 423~426.