

미세 유로에서의 유동 특성에 관한 연구

김형우, 오재근, 정시영, 최범규
서강대학교 산업기술 연구소

A Study on Fluid Flow Characteristic in a Microchannel

Applied Science Research Institute, Sogang University
Hyungwoo Kim, JaeGeun Oh, Siyoung Jeong, BumKyo Choi

Abstract - Fluid characteristics at microscale were tried to be solved in this paper by showing how they deviate with conventional flow governing equations. (e.g. Navier-Stokes Equation) In earlier studies, this deviation phenomena was caused because of omitting no slip flow condition, micropolar effect and EDL(Electric Double Layer)effect of fluid which are usually negligible at macroscaled phenomena. The characteristics of fluid flow were tried to be studied by measuring pressure difference of specified length of the channels using the almost squared micromachined channels. By acquiring pressure difference, we could drive different values(viscosity, flow velocity, etc) from it and these data will be compared with macroscaled flow characteristics.

As making microchannel is not easy work and that our knowledge is at mere stage, we had to fail to make it in this time. The hardest thing in this work is to make a hole which is directly connected with channel. The more efficient and easy way of making microchannel is proposed in this paper.

1. 서론

여러 분야에서 새로운 개념의 제품들을 제작하는데 중요한 역할을 하고 있는 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술은 지난 20여 년간 연구가 지속되어 왔으며 오늘날 21세기의 핵심 기술로 부각되어 국가적 차원에서 지원을 받고 있다.

최근에는 부피가 1cm³ 미만이면서도 수십W의 출력을 낼 수 있는 초소형 가스 터빈에 관한 연구가 MIT를 중심으로 연구되고 있다[1]. 이러한 초소형 터빈은 동력 밀도가 크기 때문에 연구개발이 완료되면 여러 가지 적절한 분야로 응용이 가능해지고 또 실생활에 적용되어 화학전지를 대체할 수 있게 된다. 이러한 초소형 발전기의 실현이 가능하기 위해서는 미세 기계류의 제작기술과 동시에 미시적 관점에서의 주변환경과 기계류사이에서 일어나는 물리 화학적 현상을 해석해야 가능하다.

MEMS에서의 유체 기계류의 연구는 지난 20여 년간 지속되어져 왔다. 그 중 microchannel에 대한 연구는 여러 분야에서 그 효용 가치가 있어 의학, 전기, 전자, 기계 분야 등을 중심으로 많은 연구가 진행되었다.

최초의 연구는 1909년 직경이 66 μ m 정도인 유리관에서 유동의 실험을 한 Knudsen에 의해 이루어졌다.[10] 그 후 많은 연구에서 미시적 관점에서의 유동의 현상은 거시적인 관점에서의 유동 현상과 차이가 있음을 밝혀냈다. Eringen(1964)은 미소 유로에서의

유동의 해석을 통하여 'Simple microfluid'이라는 이론을 제안하여 미시적 관점에서의 물리적인 현상을 이론적으로 나타내었다[2]. 그 후 Papautsky(1998)가 이 Eringen의 이론을 사용하여 미소 유로에서의 유동 특성을 연구하였고 이를 실험적으로 증명하였다[3]. Wu와 Little(1983)은 역 사다리꼴 단면인 미세 유로에서 기체의 마찰 계수를 층류 영역에서 구하였는데 그 값이 예상된 값보다 더 크게 나왔다[4]. Harley와 Bau(1989)도 역시 역 사다리꼴 과 정사각형 단면에서 유체의 마찰계수를 구하였고 이들이 예상한 값과 일치하지 않는 데이터를 구하였다[5]. Pfahler(1990,1991)는 여러 가지 종류의 유체를 폭 100 μ m이고 깊이가 0.5~50 μ m인 역사다리꼴 단면을 가진 미세 유로판에서 실험을 하였다[6]. Choi(1991)은 질소가스를 작동 유체로 직경이 3~81 μ m인 원형단면에서 마찰계수를 구하였다[7]. 그 역시 Wu와 Little과 같이 예상되었던 값보다 크게 나왔다[8]. Peng의 연구에서는 레이놀즈 수가 200에서 700인 범위에서 실험을 수행하였는데 판의 단면의 크기가 작아질수록 Re수도 같이 감소하였다.

미소 유로에서의 유동에서는 경계층 벽면에서의 유동의 속도가 0인 것(no slip condition)이 적요되지 않고 유체내의 원자와 원자간의 힘(micro polar effect)[2], EDL(Electric Double Layer)효과(9)들을 무시할 수 없다. 또는 유체의 밀도가 변함으로 인해 거시적인 관점에서 미세 유로에서의 현상을 해석하는 것과는 차이가 나는 것이다.

기존의 연구를 정리해 보면 층류와 난류유동에서의 해석에서 기존의 전달 방정식과 비교함에 있어 제각기 다른 결과를 나타낸다. 이는 아직 미시적인 관점에서 거시적인 관점에서와 같이 Navier-Stokes 방정식과 같은 유동에 관한 지배 방정식이 체계화 돼있지 않은 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 IC convertible 매커니즘을 이용해서 미세 유로를 직접 제작하여 실험을 통하여 미세 유로에서의 유동 특성을 해석하고자 한다.

2. 본론

2.1 실험 장치

실험은 유량계 없이 유량을 조절할 수 있는 주사기 펌프를 사용하게 되며 압력계를 판의 아랫면에 연결부를 통하여 장착하게 된다. 주사기와 판의 입구까지는 teflon tubing을 사용하여 유동의 흐름을 원활하게 하였다. 또 압력계와 관과의 연결은 압력계의 응답 속도를 빠르게 하기 위해서 tubing을 사용하지 않고 직접 연결하였고 데이터는 압력계에서 압력을 읽을 수 있는 digital voltmeter를 연결하여 얻었다. 실험 장치는 아래의 그림 Fig.1.과 같이 설치하였다.

제작 공정은 크게 미세 유로의 제작과 연결부의 제작으로 나눌 수 있다.

2.1.1 미소 유로의 제작

Microchannel을 제작하는 방법으로는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, Groove etching method 실리콘 기판 위에 식각 공정을 거쳐 홈을 파고 덮개로 막는 방법으로써 오래 전부터 주로 사용되고 있다. 그러나 여러 가지 공정을 필요로 하고 또는 비용이 많이 드는 단점이 있다. 두 번째로 고온에서 주형과 같은 물체를 두 기판 사이에 삽입하여 찍어내어 유로를 만드는 방법인 Imprinting or Molding method가 있고 마지막으로 기판 위에 광감재를 쌓아 올린 다음에 여기에 도금을 하여 만드는 방법인 Surface micromachining이 있다.

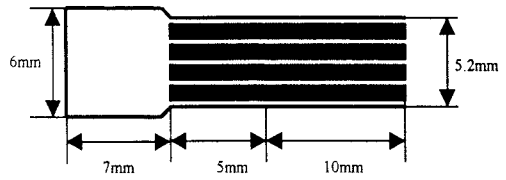


Fig.3. Schematic diagram of microchannel (200 μ m \times 200 μ m)

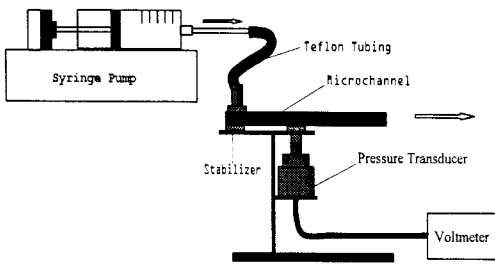


Fig.1. Schematic diagram of experimental setup

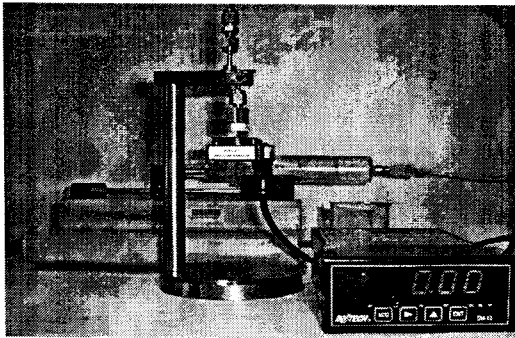


Fig.1-1. Photograph of experimental setup

그림 Fig.2.3은 유로의 평면도를 보여주는 것이다.

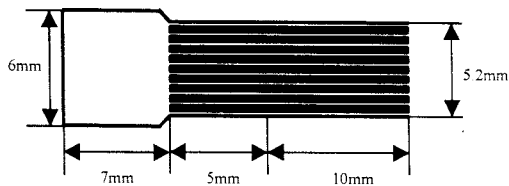


Fig.2. Schematic diagram of Microchannel (100 μ m \times 100 μ m)



Fig.4. Cross section SEM photo of microchannel

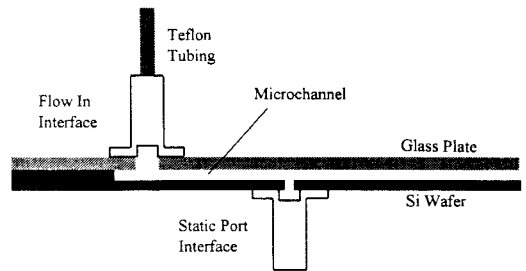


Fig.5. Cross section schematic diagram of microchannel

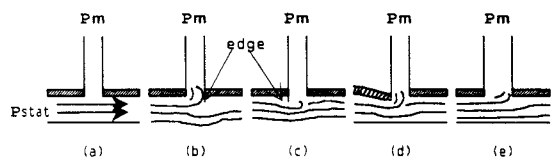


Fig.6. Schematic diagram of various interface of location of static pressure measurement

미소 유로(microchannel)는 ICP를 사용하여 실리콘 기판 위에 거의 직각에 가까운 직사각형 단면을 가진 홈을 내고 그 위를 유리판으로 덮음으로써 만들어진다. 그러나 그림 Fig.4.은 100 μm ×100 μm 으로 가공하였으나 overetch가 일어났다. 유로들 중에 외각에 있는 두 유로는 저장소의 외각과 약 30°의 경사를 이루어 유동의 흐름이 원활하게 하였다. 그림 Fig.5.는 유로를 측면에서 본 단면도를 도식적으로 나타내었다. 압력을 재는 위치는 유동의 완전 발달(fully developed) 유동이 일어나고 입구 손실도 막을 수 있게 저장소로부터 5mm 떨어진 위치에 있다.

그림 Fig.6.은 정압을 측정 할 수 있는 위치를 도식적으로 나타낸 것이다. 여기서는 (a)그림만이 정압을 측정하는데 사용할 수 있고 (b), (c), (d)는 유동의 흐름을 방해하게 되고 (e)는 유로의 크기에 비해 정압을 재는관이 비교적 커서 정압의 측정이 불가능하다. 따라서 압력계와 유로가 접촉되는 유동의 정압을 측정하는 부분은 유로의 크기에 비해 크지 않도록 그리고 유로에서 유동을 방해하지 않는 범위 내에서 비교적 깨끗한 단면의 가공이 가능한 가공으로 제작되어야 한다. 따라서 본 실험에서는 보다 간단한 가공인 레이저를 사용하여 가공을 하려 했으나 유로의 폭이 매우 미세하여 한 개의 유로에 구멍을 가공하기가 매우 어려웠고 또 가공이 되더라도 실리콘 기판의 두께가 두꺼워 폭이 작은 유로에서는 이것으로 가공하는 것은 불가능하다. 따라서 유로에 유동의 정압 측정을 위한 구멍의 가공은 실패하였다. 그리고 유로의 크기를 더 크게 하여 제작하였고 이것의 압력을 재는 위치는 습식 식각 공정으로 하여 하나의 기판에 가공하였다. 그러나 이 방법도 구멍의 크기를 제한하여야 하기에 patterning을 작게 함으로 etchstop이 일어났다. 그 후에 유리판이나 다른 실리콘 기판을 식각하여 구멍을 가공하는 방법까지 고려하였으나 제작의 미숙과 가공의 한계로 인해 모두 실패하였다. 추후에는 하나의 실리콘 기판에 유로의 홈을 지금까지 한 것 보다 크게 판 뒤에 파여진 홈 위에 유로의 유동의 정압을 측정할 수 있는 크기의 구멍을 가공하려 한다. 이는 화학적 식각 공정을 다시 사용하려고 한다. 이는 실리콘의 결정방향을 고려하여 patterning을 하면 가능할 것이라고 생각된다. 또는 식각 공정으로 구멍을 먼저 가공한 뒤에 실리콘의 표면 마이크로머시닝 기술로 유로를 제작하여 실험을 하려고 한다.


	단면 형태	크기	가공 방법	
			유로	압력 측정용 구멍
1차 실험		100 μm ×100 μm	건식 식각(ICP)	레이저
2차 실험		200 μm ×200 μm	습식 식각	습식 식각
3차 실험 (현재 진행중)		400 μm ×30 μm	습식 식각	습식 식각

Table 1. 각 실험별 유로의 제작 방법 및 단면 형태

2.1.2 연결부(Interface)의 제작

연결부는 유로에서 작동 유체의 흐름이 유로의 입구부터 출구까지 손실이 없도록 제작이 되어야 한다. 연결부는 스테인레스 강으로 제작하였으며 유로의 입구에서는 teflon tubing과 그리고 유동의 정압 측정 위치에서는 압력계와 union을 사용하여 연결하였다. 연결부중 판과 접촉하는 면에 홈을 파서 더 좋은 실링 효과를 얻고자 하였으며 제작결과 그 결과 아주 좋은 실링 상태를 보였다.



Fig.7. Schematic diagram of interface

2.2 실험 방법

실험은 비압축성 유체인 물을 작동유체로서 Re. No. 1~100까지의 범위에서 수행하려고 한다. 주사기 펌프는 일정한 힘을 작동 유체에 가하게 되며 힘을 받은 작동유체는 저장소(reservoir)를 거쳐 각각의 유로로 흘러 들어간다. 유로내의 압력 손실은 유로의 저장소로부터 5mm 떨어진 위치에서 출구의 대기압과의 차압을 측정함으로써 구하여 진다. 여러개의 유로들은 압력계와 하나의 연결부로 연결되어 압력계에서는 이 유로들의 평균 압력 손실을 측정하게 된다. 이렇게 구하여진 압력손실은 Navier-Stokes 방정식에서 구한 압력 손실과 비교하고자 한다.

3. 결 론

현재 1차로 제작된 유로에 압력 측정용 구멍을 내는 미세 공정이 불가능하여 다른 방법으로 2차 유로를 제작하였으나 이 역시 가공 경험의 부족이나 가공한계로 인해 제작이 불가능하였다. 따라서 3차로 가공이 될 유로는 1,2차에서와는 달리 기하학적으로 단순한 판의 단면적을 만들기 위하여 습식 식각 공정으로 유로를 내게 된다. 압력 측정용 구멍가공의 편의를 고려하여 폭을 넓히고 깊이를 줄여서 가공할 것이다. 정압을 측정할 위치는 차원적으로 계산된 patterning을 한 식각 공정을 거쳐서 제작이 될 것이다.

(1) 한 실리콘 기판에 유로와 구멍을 가공할 경우 건식 식각과 습식 식각 등의 메커니즘을 사용하여 만든 유로는 정확한 유동의 특성을 해석하기에는 적합하지 못하다. 그 이유는 공정도 복잡할 뿐만이 아니라 유로의 형상이 흔히 볼 수 있는 사각형의 단면이나 원형이 아니기 때문이다. 개선책으로는 surface micromachining을 이용하여 유로를 만드는 것이나 ICP를 쓸 경우에는 식각되어야 할 깊이가 얇은 경우에 거의 수직의 단면을 보여 유로의 깊이를 알게 하여 제작하는 것이다.

(2) 유로의 크기를 작게 함으로 공정상의 한계는 이에 반비례한다. 유로의 폭을 넓히고 깊이를 줄임으로 이를 해결 할 수 있다.

(3) 스테인레스 강으로 제작된 연결부는 매우 좋은 실링 상태를 보여 주었으나 추후에는 중량이 작은 비금속 물질로 제작을 하려고 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] Epstein, A.H., Senturia, S.D, et al, 1997, "Power Memes and Microengines", IEEE Transducers '97, Proceeding of International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp.733-756, 1997
- [2] Eringen. A., "Simple Microfluids", Int. J. Eng.Sci.,2, pp205-217, 1964
- [3] I. Papautsky, J.Brazzlw, T.A.Ameel, and A.B.Frazier, "Microchannel Fluid behavior using micropolar fluid theory", IEEE trans., 1998
- [4] P. Wu and W. A. Little, "Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule Thomson refrigerators", Cryogenics, 23, pp273-277, 1983
- [5] Harley J., and Bau H., "Fluid flow in micron and submicron size channels", IEEE Trans, THO 249-3, pp25-28, 1989
- [6] Pfahler, J., Harley, J., Bau, H., Zemel, J., "Liquid transport in micron and submicron channels", Sensors and Actuators, A 22, pp431-434, 1990a
- [7] Choi, S.B., Barron, R.F., and Warrington, R.O., "Fluid flow and heat transfer in microtubes", ASME Prac., 32, pp123-134, 1991
- [8] Peng, X.F., Petterson, G.P., Wang, B.X., "Heat transfer characteristics of water flowing through microchannels", Experimental Heat Transfer, 7, pp256-283, 1994
- [9] Gh.Mohiuddin Mala, Dongqing Li, "Heat transfer and fluid flow in microchannels", ASME, DSC-Vol. 59, pp127-136, 1996
- [10] Todd M. Harms, Michael J. Kazmierczak, Frank M. Gerner, "Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels", Int. J. of Heat and Fluid Flow, 20, pp149-157, 1999
- [11] Jack C. Shih and Chih-Ming ho, "Monatomic and Polyatomic gas flow through uniform microchannels", ASME, DSC-Vol. 59, 1996
- [12] Bruce R. Munson, Donald F. Young, and Theodore H. Okiishi, "Fundamentals of fluid mechanics, 2nd Edition, 1994

감사의 글

본 연구는 한국 학술진흥재단이 지원한 대학 부설 연구
소과제로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.