

# 마이크로 유동과 마이크로 연료전지 기술

임 동 욱

서울대학교 대학원 기계공학과(dwylim72@snu.ac.kr)

성 재 용

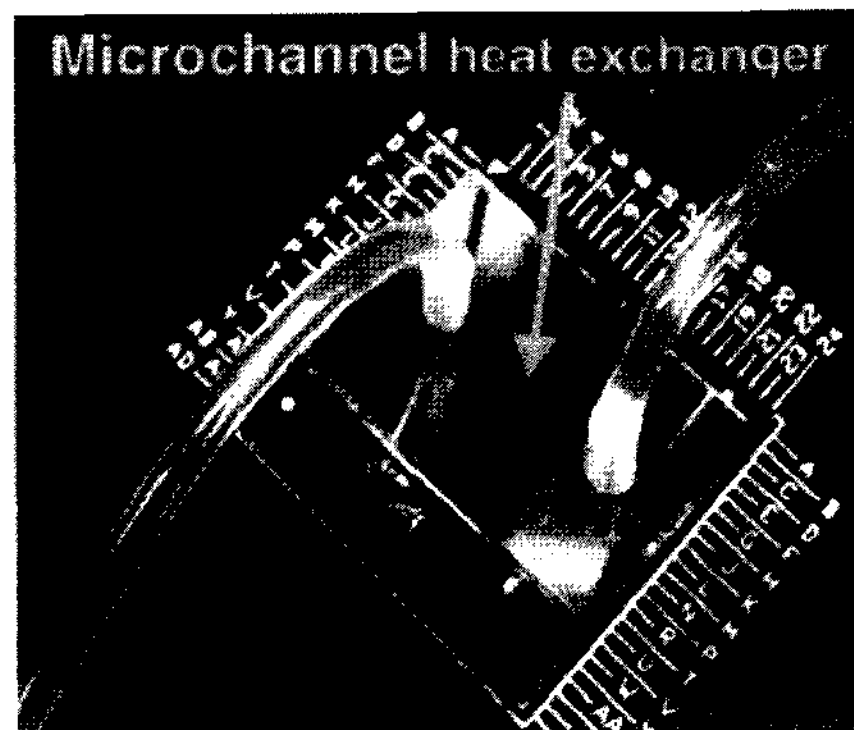
서울산업대학교 기계공학과(jysung@snut.ac.kr)

마이크로 채널에서의 유동은 MEMS기술의 발전으로 많은 연구가 진행되어지고 있다. 마이크로 펌프, 마이크로 히터에서의 열교환, 특히 최근에는 BIO-MEMS의 연구가 활발히 진행이 되면서 Lap-on-a-chip에서의 유동이 많은 관심을 받고 있다. 19세기 애니악과 같이 규모가 크고 작동이 어려운 프로세서를 소형의 microprocessor로 집적하여 현재 개인컴퓨터, 차량, 핸드폰, 시계, 가전제품 등 많은 제품에 활용되고 있다. 이와 유사하게 실험실이나 병원에서 이루어지는 시약 준비, 진단, 치료 등의 여러 기능을 하나의 chip 상에서 구현하고자 하는 연구가 활발히

진행되고 있으며, 이러한 chip 을 lab on a chip 혹은 microfluidic processor 라고 한다. 이러한 lab on a chip은 실제로 환자의 질병 모니터링, 환경오염 모니터링, 식중독 모니터링, 약물 개발, 수술 시 보조 장치 등으로 사용하고자 활발한 연구가 진행되고 있을 뿐만 아니라 실제로 제품으로 개발되어 사용되고 있다.

## 마이크로 유동의 특징

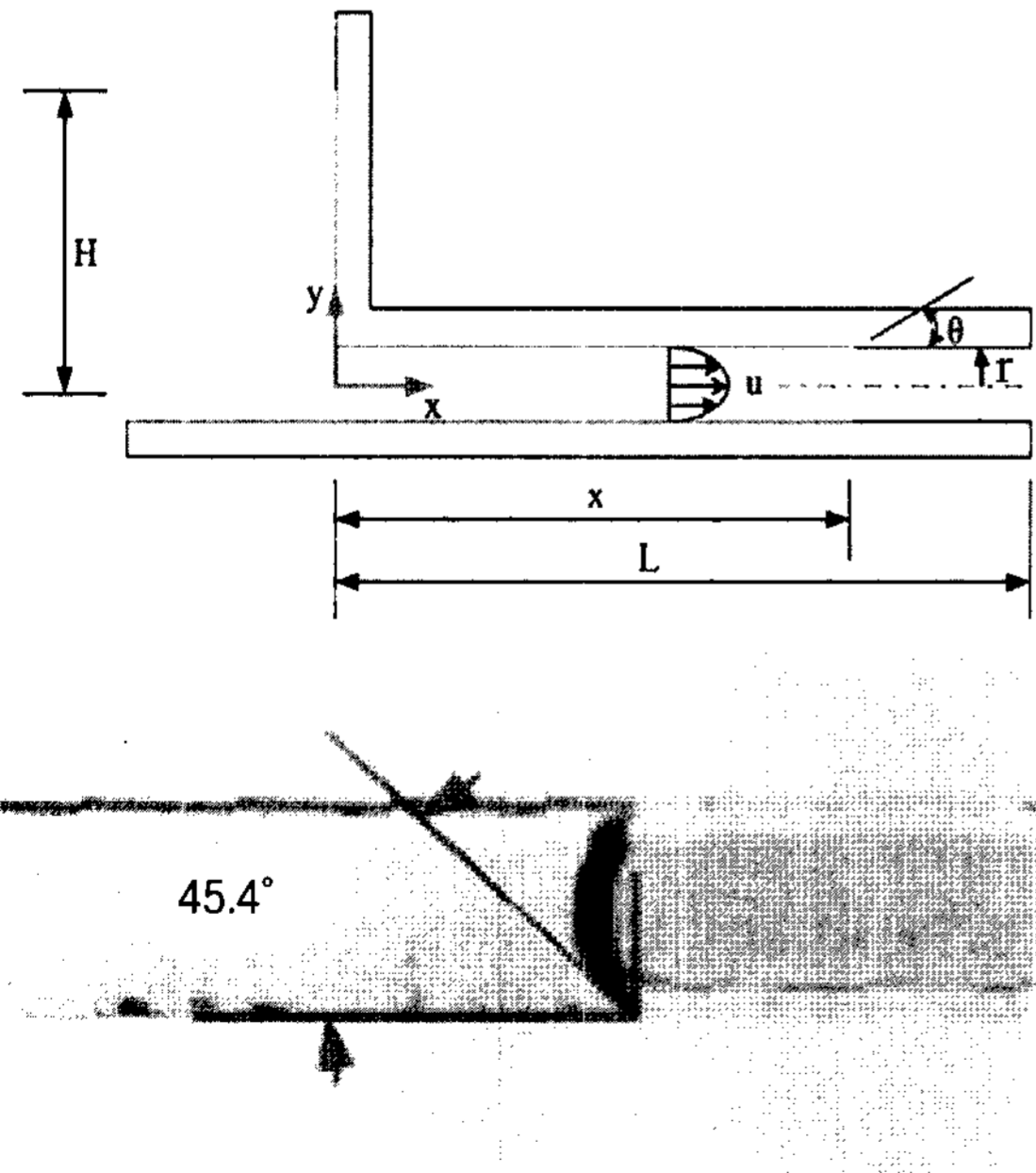
마이크로 크기의 유체유동 현상은 통상적인 크기



[그림 1] Lab-on-a-chip과 마이크로채널 열교환기

의 유동에 비해 표면에 의한 효과가 매우 크게 나타난다는 점이다. 체적은 길이의 세제곱에 비례하여 축소되는데 반해 표면적은 길이의 제곱에 비례하여 축소되므로 체적력 대비 표면력의 크기가 축소된 길이 비만큼 증가하게 된다. 뿐만 아니라 레이놀스수가 1보다 작은 매우 안정된 층류영역이 되어 분자운동에 의한 확산이 지배적인 유동으로 나타난다는 점도 유의해야 할 사항이다.

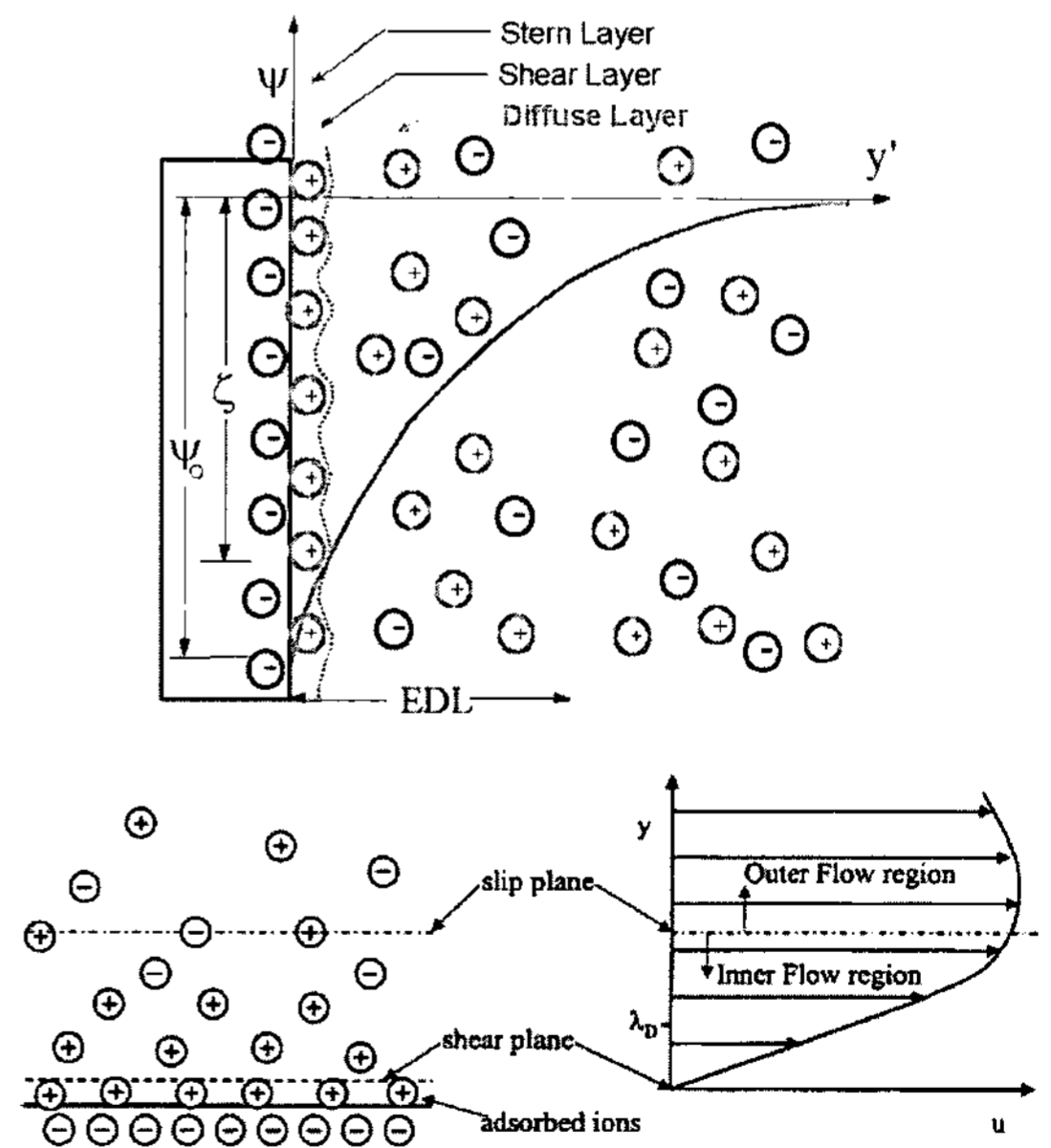
표면 효과의 증가로 나타나는 대표적인 힘은 표면장력이다. 표면장력은 액체와 기체의 계면에서 발생하는 힘으로 계면의 곡률반경에 반비례하는 힘을 가지고 있다. 마이크로 크기에서는 곡률이 매우 작아 이 힘은 정지된 유체를 이동시킬 수 있을 정도로 커진다. 그림 2는 마이크로 채널 내에 친수성(hydrophilic)의 유체가 존재할 때 모세관(capillary) 현상에 의해 유체가 이동하는 모습을 나타내고 있다. 이와 같이 모세관 압력의 힘으로 유체를 이송하면 펌프와 같은 별도의 동력기기가 없어도 손쉽게 이동시킬 수 있다. 만약 매크로 크기에서와 같이 펌프로 유체를 이송시킨다면 100  $\mu\text{m}$  크기의 채널에 1  $\mu\text{l/s}$ 의 유량으로 물을 흘릴 때 1 mm 이동시키는데 대략 400 Pa



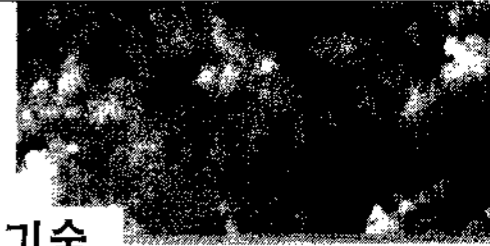
[그림 2] 표면장력에 의한 미세 모세관 유동

의 압력이 필요하며, 채널의 크기가 10  $\mu\text{m}$ 로 줄어들면 4 MPa이 되므로 펌프에 의한 유체이송이 거의 불가능해진다. 다음으로 표면적 비율의 증가는 표면을 통한 열 출입비율의 증가로 나타나므로 고온의 유체를 사용하는 기계를 설계하는 경우 벽면의 열손실을 보상하기 위한 열선히터 등을 설치하여야 한다. 열전달 측면에서도 매우 안정된 층류유동으로 인해 대류열전달보다 전도에 의한 열전달이 지배적이므로 이를 고려한 설계가 요구된다.

한편, 마이크로 크기의 미세 유로에서는 전기역학(electrokinetic)적인 효과도 무시할 수 없다. 대부분의 고체 표면은 미약하지만 전하로 대전되어 있어 표면 전위를 가지고 있다. 또한 순수한 물을 포함한 대부분의 유체도 전하를 내포한 전해질의 성질을 가지고 있다. 만약 그림 3에서와 같이 (-) 이온으로 대전된 고체 표면에 전해질의 유체가 존재한다면 고체 표면의 정전기력에 의해 유체 속의 (+) 이온들은 고체 표면쪽으로 이동하여 전기적으로 균형을 이루게 된다. 이렇게 형성된 전하층을 전기 이중층(EDL, electric double layer)라고 하고 크게 고체 벽면 근처 0.5 nm 구간에서 전하가 움직이지 않는 stern layer



[그림 3] 전기 이중층(EDL)의 형성과 전기삼투에 의한 유체 이동



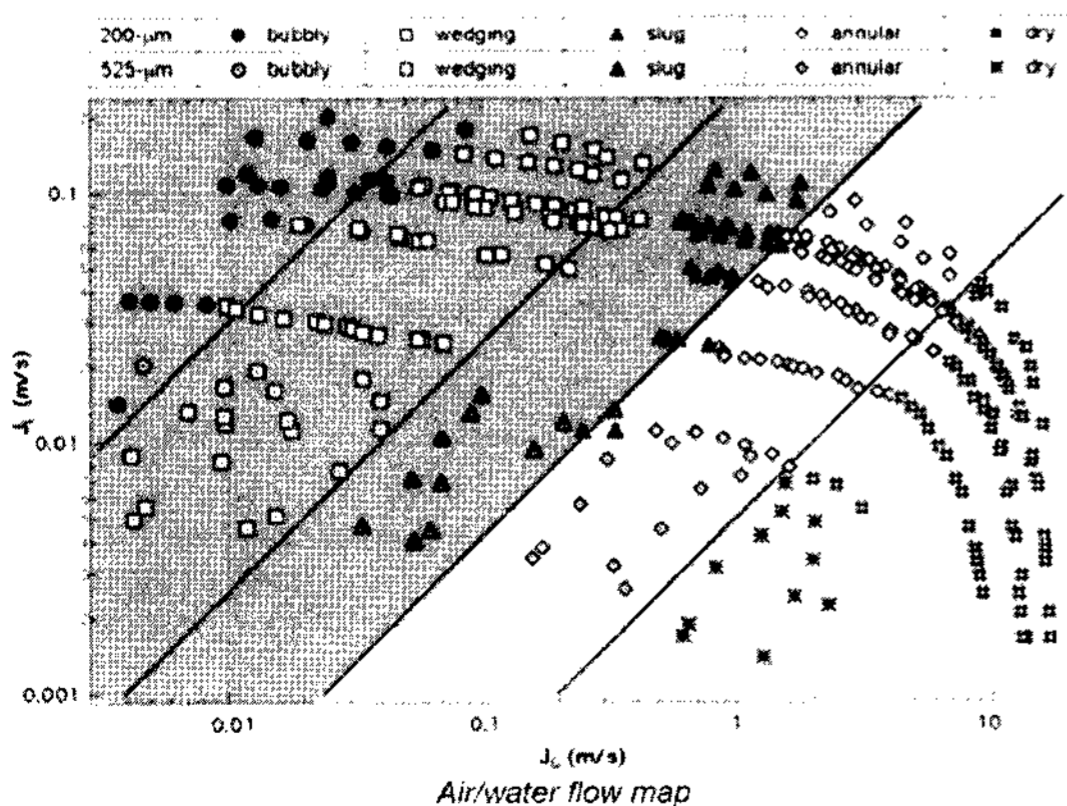
(또는 compact layer)와 전하의 움직임이 비교적 자유로운 수 nm - 수  $\mu\text{m}$  길이의 diffuse layer로 나누어진다. 이 두 층의 경계를 shear layer라고 하고 여기서 발생하는 전위를 zeta potential이라 부른다. 이 상태에서 채널의 양단에 전기장을 걸어주면 유체가 이동하는 현상이 발생하며, 그림 3에서 diffuse layer에 있는 이동이 자유로운 (+) 이온들이 가해진 전기장에 의해 음극으로 이동하면서 주위 유체를 끌고 가기 때문에 나타난다. 이러한 현상을 전기삼투(electroosmosis)라고 하며, diffuse layer 바깥부분의 유체는 점성에 의해 같이 이동하며 따라서 속도 분포가 전체적으로 평탄한 형태를 가진다. 이 때, zeta potential의 크기는 전기삼투로 인해 생기는 유체의 이동 속도와 매우 밀접한 관련이 있다. 이러한 전기 이중층은 매크로 스케일에서는 수력직경에 비해 매우 작기 때문에 고려할 필요가 없으나 마이크로 크기의 수력직경에서는 그 영향을 무시할 수 없다.

### 마이크로 채널에서의 이상유동

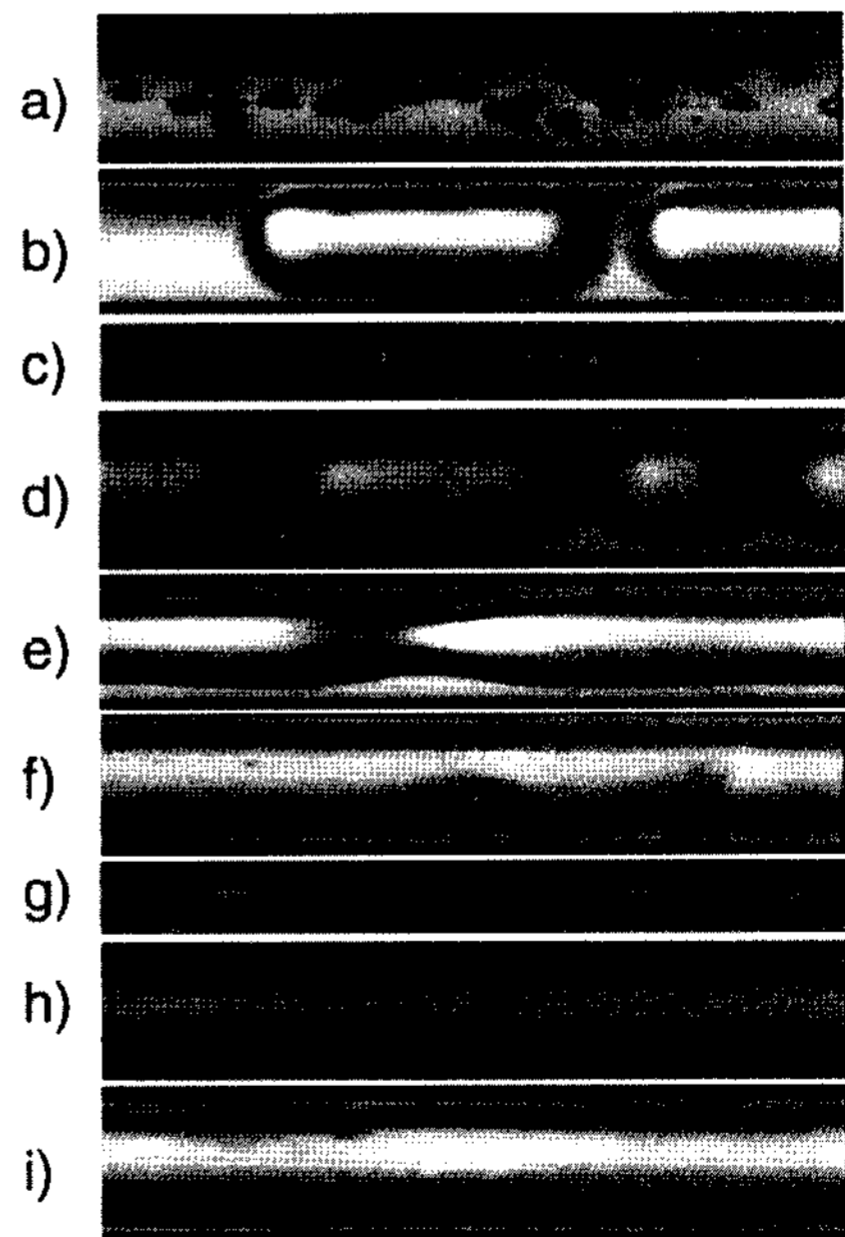
다상유동은 화학공정, 석유정제과정, 원자력 발전이나 연료전지(fuel cells)와 같은 발전산업에서 많이 발생한다. 특히 마이크로 채널내에서의 다상유동은 매크로 스케일 시스템과 달리 가스 기포가 흐름을 방해하고 결국은 채널을 막아서 유체의 흐름을 막아버리게 된다. 따라서 마이크로 채널에서 어떻게 기포가 어떤 흐름의 형태를 갖고 있는지와 기포들의

유동이 어떻게 흐름을 방해하는지 이해하는 것이 중요하다. 또한 컴퓨터와 같이 초대규모집적회로(VLSI)를 사용하는 경우 회로에서 발생하는 열의 냉각이 아주 중요하기 때문에 미세 전자제품의 냉각에 있어서도 이상유동의 제어 기술이 중요하다.

그림 4는 기체 액체 유동 맵을 보면 기체의 속도와 액체의 속도의 비에 따라서 유동 맵이 형성된다. 유체 유량이 기체 유량에 비해 높은 경우 bubbly 유동이 형성되고 유체 유량과 기체 유량의 비에 따라 여러 가지 유동 형태를 보이다가 벽면에 얇은 필름 형태를 띄는 유동형태를 형태를 보인다. 그림 5는 수평 마이크로 채널에서의 유동 형태이다. 기체와 액체의 유량비에 따라서 여러 가지 유동 형태를 보여준다. 그림 5에서 기포 유동을 보면, 연결되어 흐르는 액체에 둥근 기포가 분포해서 흐른다. 기포의 지름은 채널의 높이보다 작고 이 기포들이 서로 부딪치고 합쳐져서 커지게 된다. 기체와 액체의 흐



[그림 4] 기체 액체 유동 맵



a) Bubbly Flow      b) Slug Flow  
 c) Transition      d) Skewed Flow(Yakitori Flow)  
 e) Liquid Ring Flow      f) Frothy Annular Flow  
 g) Transition      h) Annular Flow  
 i) Rivulet Flow

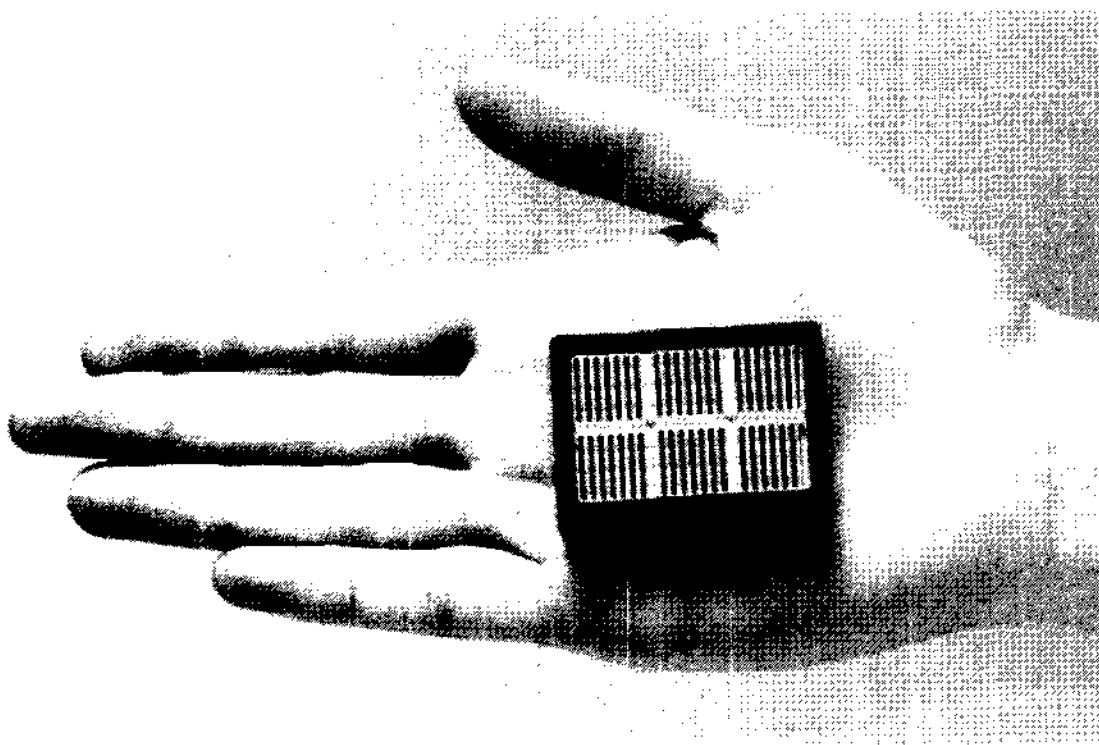
[그림 5] 마이크로 채널에서의 이상유동 형태

름 형태에 따라서 채널내의 표면 마찰과 기포율(void fraction)에 의한 압력하강이 많은 차이를 보인다.

### 마이크로 연료전지에서의 이상유동

최근 화석에너지원의 고갈과 수요의 증가로 인하여 석유의 가격이 급격히 상승하여 대체 에너지원의 개발과 활용에 대한 관심이 커지고 있다. 대체 에너지원에는 오래전부터 사용되어온 풍력, 수력, 태양력, 파력, 조력 발전, 연료전지 등 여러 가지가 있다. 연료전지는 1800년대 초반 독일의 과학자 Christian Friedrich Schonbein에 의해 기본 원리가 발견되었다. 그 후에 1960년대에는 우주선에 필요한 전기를 공급하기 위하여 연료전지가 만들어져 사용되었고, 최근에는 그림 6과 같은 마이크로 연료전지에 대한 기술 개발이 한창이다. 연료전지의 이점은 높은 전류밀도를 갖고 있고 작동되는 온도가 내연기관과 달리 대부분 100℃ 이하의 낮은 온도에서도 작동이 되고 내연기관이나 화력발전과 같이 화석연료를 사용하는 기관과 달리 공해가 거의 없다. 또한 연료전지를 켜면 바로 전기를 얻을 수 있고 작동조건에 대한 반응이 무척 빠르게 나타난다.

휴대용 연료전지로는 수소함유량이 높은 메탄올을 이용한 DMFC(Direct Methanol Fuel Cell)가 주로 연구되고 있다. 그림 7은 직접 메탄올 연료전지의 기본 화학식이다. 연료극(anode)에는 보통 1 M 메탄올용액이 직접 주입이 되고 공기극(cathode)은 수분이 함유된 공기나 산소를 보내어 MEA에서 그림 7

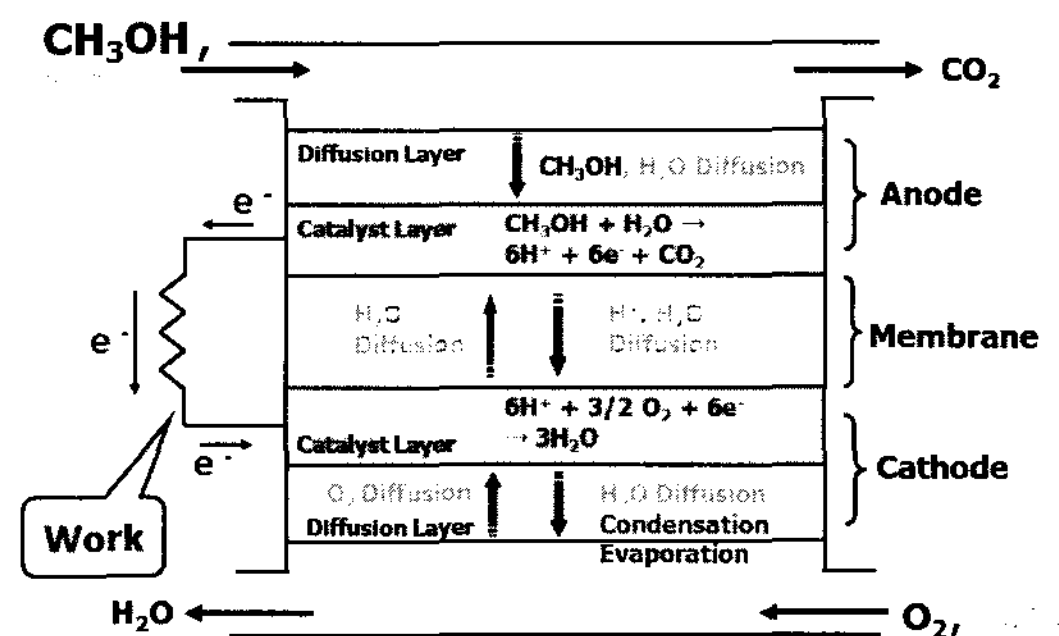


[그림 6] 마이크로 연료전지

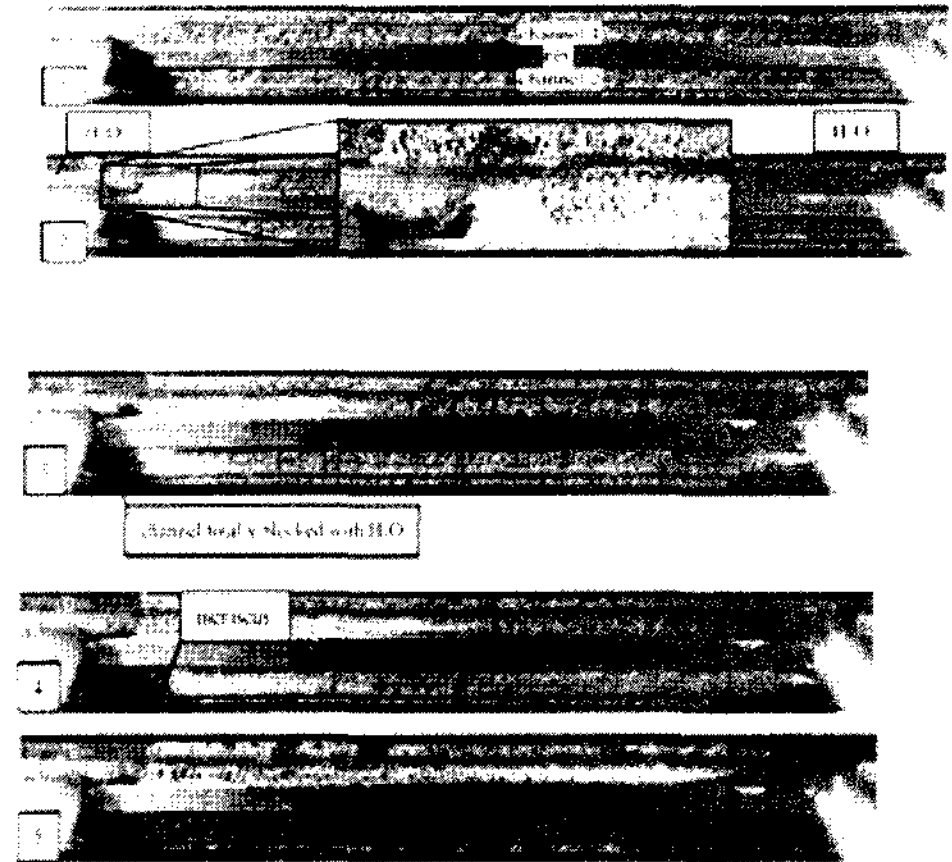
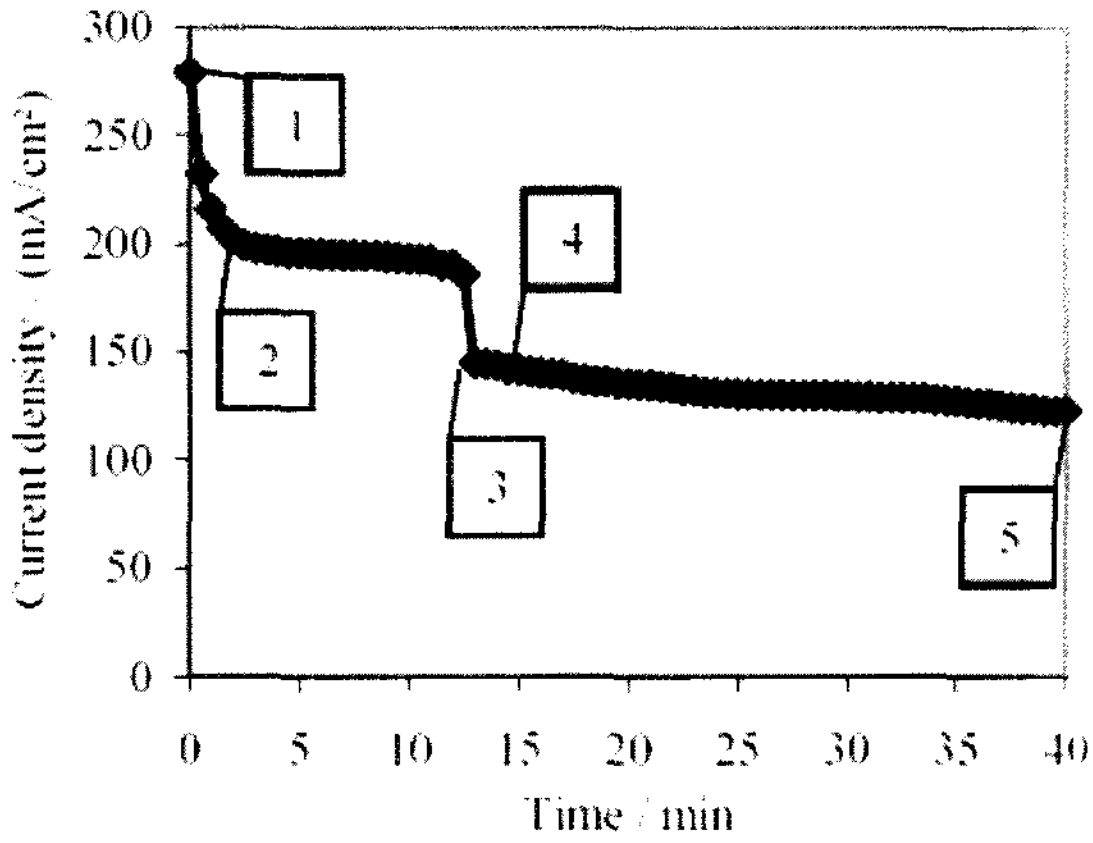
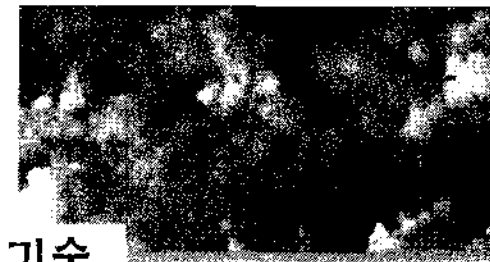
과 같은 화학반응이 일어나 전기를 얻을 수 있다. 이때, 연료극과 공기극에서 전기화학적 반응의 부산물로 CO<sub>2</sub>와 물이 각 채널 내에 생성되어 이상 유동이 발생을 함으로써 연료나 공기의 흐름에 저해하여 효율을 떨어트리는 결과를 초래하기 때문에 이에 대한 연구가 활발하다. 그림 8에서 연료전지 채널 내에서 화학반응에 의해 생성되는 물의 양이 증가하면서 수소의 흐름을 방해하고 결국은 채널을 막아서 전류 밀도의 급격한 감소를 볼 수가 있다.

연료 전지 내의 물질 전달 문제는 기체 상의 반응물과 액체 상의 물이 공존하는 이상유동 문제이며, 또한 액체 상의 물은 모세관 현상(capillary action)과 증발, 응결 등에 의해 전달되므로 그 현상이 매우 복잡하다. 연료전지의 반응물(수소와 공기)과 생성물(물 또는 증기)은 유동채널과 확산층에서 발생 또는 이동한다. 전류밀도가 증가할수록 물의 생성은 증기(vapor)상으로부터 점차적으로 액체(liquid)상으로 변화한다. 연료전지의 양극에서의 전기삼투항력과 산소감소반응(oxygen-reduction reaction)으로 인한 물 생성율이 공기극에서 연료극으로의 역삼투, 증발(evaporation), 물-증기 확산(water-vapor diffusion)과 물 모세관수송(capillary transport of liquid water)에 의한 물 제거율을 초과할 때 물범람 현상이 발생한다. 이렇게 물 생성이 물 제거보다 많아지면 촉매로 침투하는 산소의 부족으로 연료전지의 성능은 현저하게 감소된다. 물범람 현상은 다양한 조건들에 의해 지배를 받고 연료전지의 치명적인 성능 저하를 유발하기도 한다.

물범람 현상의 문제점을 발견하기 위하여 다양한



[그림 7] 직접 메탄올 연료전지(DMFC) 기본 화학반응식



[그림 8] 연료전지 채널에서 물의 생성과 전류밀도의 변화

영향 인자(유동채널의 형태, 크기, 온도, 압력, 습도, 공기 유량, 산소 유량 등)에 의한 성능 평가를 수행한다. 물범람 현상은 유동채널 내부에 임의로 분포하고 화학반응의 정도에 따라 발생하므로 필드 측정(field measurement)이 필수적이며, 이에 대한 평가를 위해서는 유동장 가시화, 온도장과 전류밀도에 관한 정보가 필요하다. 전류밀도는 화학반응의 정도

를 측정하여 연료전지 부분별 평가가 가능하다. 온도장은 연료전지의 부분별 성능도 평가할 수 있지만, 부분별 작동 온도를 알 수 있어 그 유용성이 크다. 전류 밀도장은 하나의 전극판 대신에 잘게 나누어진 단편(segment)들을 부착하여 측정하고 온도장은 셀 표면에서 가시화가 가능한 온도 측정 방법을 이용하여 측정한다. (\*)