



# 마이크로 및 나노 유동학



글 · 강인석/포항공대 화학공학과, 교수  
e-mail · iskang@postech.ac.kr  
임도진/포항공대 화학공학과, 박사 과정

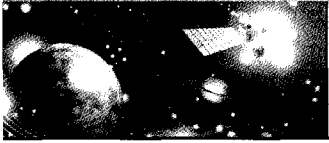
이 글에서는 먼저 *microfluidics*에 관련된 유동제어 기술을 먼저 살펴보고 *microfluidic*와 *nanofluidics*의 차이점을 살펴본 후 *nanofluidic*에 대해 다루기로 한다.

2010년 뛰어난 기계공학자가 꿈인 고3 수험생 수능이는 수능시험을 며칠 앞두고 갑자기 심한 두통을 느끼기 시작했다. 병원에 다녀오는 시간도 아깝기 때문에 즉시 휴대용 자가 진단 DNA칩을 꺼냈다. DNA칩을 엄지손가락에 대자마자 DNA칩에서 머리카락보다 가는 고성능 혈액채취기가 작동하기 시작했다. 통증을 느낄 새도 없이 수 나노리터( $1\text{nL}=10^{-9}\text{L}$ )의 혈액이 순식간에 DNA칩으로 들어가고, 분석이 이루어지는 몇 초 사이에 다기능 메디컬 휴대폰에 이 칩을 연결하여 분석된 결과를 가까운 종합병원에 보냈다. 이어 담당의사는 검사결과를 살펴본 뒤, 스트레스성 편두통이란 진단을 내리고 온라인 처방전을 다시 수능이의 휴대폰에 보내게 된다. 수능이는 근처 약국에서 이 온라인 처방전으로 약을 먹고 두통은 씻은 듯 낫게 된다.

SF 영화에나 나올 법한 이야기처럼 들릴지 모르지만, 이러한 DNA칩은 머지 않아 실현될 수 있다고 한다. 이것의 핵심기술 중의 하나가 관의 크기가 마이크로 단위인 미세채널에서 혈액의 유동을 제어하는 기술이다. 이 기술을 마이크로 유동학(*microfluidics*)이라 한다. 한편 최근에는 급속히 발전하고 있는 나노기술(NT)과 함께 관의 굵기 또는 다루는 입장들의 크기가 수 나노미터에서 수백 나노미터인 시스템에 대한 유체 유동을 다룰 필요성이 대두되고 있다. 그러한 예가 초미세 연료전지 기술에 크게 응용될 수 있을 것으로

기대되는 탄소나노튜브(carbon nano tube) 내에서의 반응물의 유동을 들 수 있겠는데 이와 같이 나노미터 스케일에서의 유동을 제어하는 기술을 나노 유동학(*nanofluidics*)이라 한다. 이 글에서는 먼저 *Microfluidics*에 관련된 유동제어 기술을 먼저 살펴보고 *microfluidic*와 *nanofluidics*의 차이점을 살펴본 후 *nanofluidic*에 대해 다루기로 한다.

마이크로/나노 유동학에서는 다루는 시스템의 크기가 점점 작아져서 마이크로 단위를 거쳐 나노미터 단위로 작아지게 된다. 한편 유체에 작용되는 힘은 크게 체력(*body force*)과 표면력(*surface force*)으로 구분할 수 있는데 체력은 부피에 비례하므로 길이의 3승에 비례하고 표면력은 길이의 2승에 비례하므로 마이크로/나노 유동학에서는 표면력이 체력에 비해 훨씬 중요해지는 경우가 많다. 따라서 보통의 유체역학 문제와는 달리 액체-고체 계면의 성질에 따라 유동 특성이 크게 변하기 때문에 어떤 학자들은 마이크로/나노 유동학은 표면과학(*surface science*)과 유체역학(*fluid mechanics*)이 접목된 분야라 한다. 한편 이러한 특성들은 문제 해석에 약간의 복잡성을 더 해준다 하겠으나 액체-고체 계면 특성을 여러 가지 형태로 변화를 줌으로써 다양한 유동 제어 방법들을 만들어 낼 수 있다는 점에서 매력적인 연구 분야라 할 수 있다.



## 마이크로유동학

마이크로유동학이 응용되는 대표적인 예로서 Lab-On-a-Chip(LOC) 분야를 들 수 있다. Lab-On-a-Chip은 말 그대로 chip 위에 실험실 단위에서 수행할 수 있는 분석 기술을 집적시켜 수행하자는 아이디어에서 출발된 개념으로서 그러한 시도 하에 개발된 LOC의 첫 예가 그림 1에 나타나 있다. 그림 1은 미시간 대학의 Burns 교수 연구팀이 DNA 분석용으로 개발한 LOC의 첫 번째 프로토타입이다. 샘플을 넣고, 측정하고, DNA 증폭 반응을 시키고, 전기영동 방법에 의해 분리해 내는 작업들이 하나의 칩 위에서 진행될 수 있도록 집적된 장치이다. 이 때 마이크로 유동학이 중요해지는 이유는 다음과 같다. 하나의 LOC에서 여러 가지 단계의 분석과정을 거쳐야 하는데 샘플 및 반응물들을 원하는 위치로 이동시켜야하고, 또 이동시킨 반응물

들의 반응을 원활히 하기위해 적절한 교반을 수행해야 한다는 것이다. 그런데 이와 같은 이송 및 반응이 마이크론 단위의 채널들과 반응기에서 수행해야 하기 때문에 기존의 펌프 등을 사용하기가 어렵다. 따라서 새로운 기술들이 개발되어야 하며 이러한 점 때문에 2001년도에 발행된 MIT Technology Review지는 향후 10년간 발전될 가장 중요한 10대 기술들 중 하나로 이 마이크로유동학을 지목하였다.

그림 1에 보인 것과 같은 LOC의 마이크론 단위 채널들 내에서의 유동을 제어하는 방법들 중 응용성이 가장 뛰어난 기술은 정전기력(electrostatic force)을 이용하는 기술이다. 이는 전극 간에 가해주는 전압을 제어함으로써 유동 특성을 각종 형태로 제어할 수 있기 때문에 주목을 많이 받고 있는 기술이다. 정전기를 이용하는 기술로는 마이크로 단위의 채널 속에서 액체 단일상(single

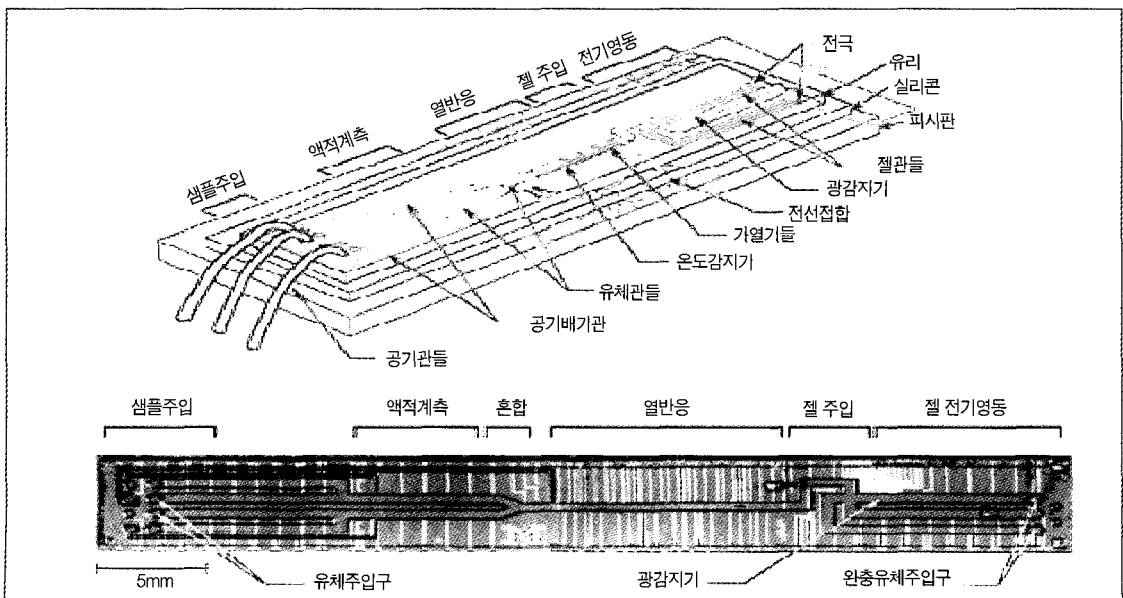


그림 1 미시간 대학교 Burns 교수 연구팀이 개발한 LOC



phase)을 운송시킬 때 사용되는 전기삼투현상(electroosmosis)을 이용하는 방법과, 빈 채널에 액체를 최초로 주입할 때 사용될 수 있는 전기습윤(electrowetting)현상을 이용하는 기술을 들 수 있는데 각각에 대해 간단히 다루어 보겠다.

### 전기삼투유동(EOF : Electroosmotic Flow)

일반적으로 많은 고체 표면은 전해질 용액과 접촉하고 있을 때 전하를 띠게 된다. 표면 전하를 갖게 되는 이유에 대해서는 여러 가지 원인이 있을 수 있는데 여기서는 고체 표면이 표면 전하를 갖고 있다는 가정을 하고, 설명을 위해 그림 2에 나타낸 것과 같은 미세 채널을 살펴보자. 그림 2에 나타낸 것처럼 미세 채널 표면이 음전하를 가진 경우에는[그림 2(a)] 전해질 속의 양이온들이 전해질-고체 계면 주위로 모이게 된다. 이때 브라운운동효과 때문에 양이온이 주로 모이게 되는 층이 약간 퍼지게 되는데[그림 2(b)] 이러한 층을 전기 이중층(EDL : Electric Double Layer)이라 부르며 그 이유는 고체 표면의 음전하층과 전해질 속의 양이온 층이 이중층을 형성하고 있기 때문이다. 전해질-고체 계면으로 멀리 떨어진 전기 이중층 바깥 부분은 양이온 농도와 음이온 농도가 전기적으로 중성을 이루는데 이곳을 벌크 용액 부분이라 부른다. 이때 그림 2(c)에 보인 것과 같은 채널 벽면에 평행한 전기장을 가하게 되면 전기 이중층 내의 양이온들이 전기장 방향으로 힘을 받게 되어 전체적으로는 전해질 용액에 힘을 가하게 된다. 그런데 전기 이중층 바깥의 벌크 용액 부분은 전기적으로 중성이므로 전기력을 받지 않아 전체적인 유동 패턴은 다음과 같이 된다. 액체-고체 표면에서는 액체는 움직이지 않지만 전기 이중층에 작용되는 전기

력에 의해 유동속도가 큰 값으로 증가하게 된다. 그러나 전기 이중층 밖에서는 작용되는 힘이 없으므로 더 이상의 속도 증가가 없이 일정한 값을 갖게 되어 그림 2(c)에 나타낸 것과 같은 속도 분포를 갖는다. 한편 많은 전해질의 경우 전기 이중층 두께가 수십 나노미터에 불과하기 때문에 수십 마이크로미터 이상의 채널에 대해서는 무시할 만큼 얇다고 생각할 수 있다. 그러나 전기 이중층 내에 작용되는 전기력은 유체 이동속도( $V_{EOF}$ )만큼 올려주기에 충분한 값으로서 전체적인 유동 패턴은 마치 채널 내부 전체에 걸쳐 균일한 값을 갖는 것 같은 특성을 갖는다.

$$V_{EOF} = -\frac{\epsilon\zeta E}{\mu}$$

위식에서  $\epsilon$ 는 전해질의 전기 유전율을,  $E$ 는 가해진 전기장의 크기를,  $\mu$ 는 전해질의 점도를, 그리고  $\zeta$ 는 표면의 제타포텐셜 값으로서 표면 전하농도에 비례하는 값이다.

전기삼투유동은 압력 구배에 의한 유동

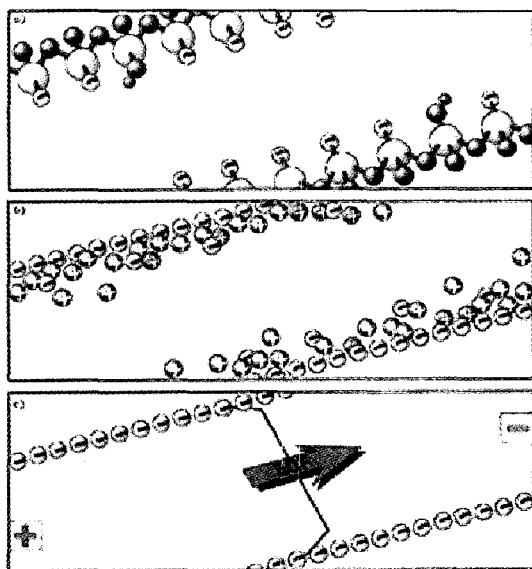
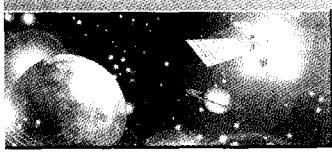


그림 2 전기삼투유동의 개념도



(pressure driven flow)에 비해 몇 가지 장점이 있다. 첫째는 채널 내부에서 속도장이 균일하다는 사실이다. 잘 알려진 것과 같이 압력 구배에 의해 미세 채널에 유동을 일으키면 층류유동이 되고 속도장은 포물선 형태를 갖게 된다. 이러한 포물선 형태의 속도 분포를 갖는 경우에는 유체의 이동속도가 위치에 따라 다르기 때문에 액체를 이동시킬 때 문제점이 발생된다. 한 예로서 이미 분리된 액체를 먼저 보내고 두 번째 액체를 이어서 보낼 때 속도차에 의한 퍼짐현상이 일어나 분리효과를 크게 저하시키게 된다. 그러나 EOF 하에서는 이러한 문제점을 피할 수 있는 장점이 있다. 두 번째 장점은 압력 구배에 의한 유동시는 필요한 압력 손실이 반경의 제곱에 반비례하기 때문에 채널의 크기가 작아지는 경우에는 압손이 크게 증가하는 문제점이 있는데 EOF에서는 그와 같은 문제점이 발생하지 않는 장점이 있다. 또 하나의 장점은 EOF 속도가 액체-고체 계면 성질에 해당하는  $\zeta$ (제타포텐셜)에 비례한다는 사실이다. 앞서 언급한 것처럼 제타포텐셜은 고체 표면 전하 농도에 비례하는 값이기 때문에 적절한 표면처리를 거치면 조절이 가능해진다. 이와 같이 표면 처리를 통해 제타포텐셜의 분포를 조절하면 다양한 형태의 EOF를 생성시킬 수 있고 이를 마이크로 채널 내부에서의 교반 기술 개발 등에 활용할 수 있다.

### 전기습윤현상

앞서 언급한 EOF는 채널 내에 전해질이 차 있는 경우에 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 경우에 따라 채널 내부에 최초로 액체를

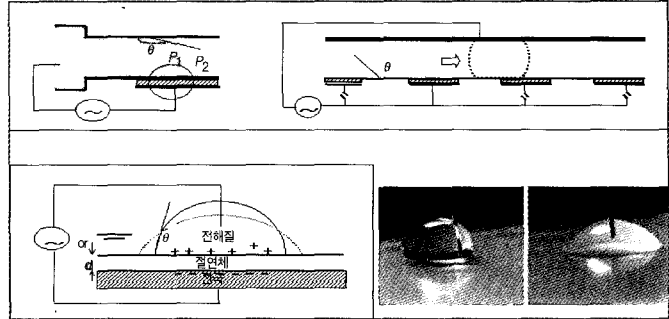
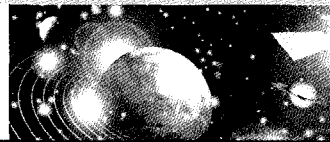


그림 3 전기습윤현상(사진 : Langmuir)

주입시키는 경우와 같이 기체-액체-고체의 계면을 형성하는 경우를 다루어야 할 때가 있다. 전해질 용액 등을 마이크로 채널에 주입시킬 때 고체 표면이 친수성(hydrophilic)이면 용액이 빨려 들어가게 된다. 그러나 이 경우 적절히 유동을 멈추게 할 필요성도 있으므로 고체 표면이 친수성에서 혐수성(hydrophobic)으로 변화되어야 할 필요가 있다. 이와 같은 기술을 가능케 한 현상이 전기습윤(electro-wetting)현상이다.

전기습윤현상은 그림 3에 보인 것처럼 전도성 액적과 전극 사이에 얇은 전기 부도체(insulator)층을 배치한 다음 전도성 액체 속에 잠긴 적극과 insulator 하부의 전극에 전압을 가할 때 일어나는 현상으로 전압을 가하지 않았을 때에 비해 접촉각(그림에서  $\theta$ )이 작아져서 Wetting이 일어나는 현상이다. 전기습윤현상은 이해하기가 매우 쉽다. 전압을 가했을 때 액적 내부의 양전하들은 하부 음극에 있는 음전하들의 인력에 의해 액적-Insulator 계면으로 모이게 된다. 이때 계면 주위에 모인 양전하들은 상호척력(repulsive force)을 수평방향으로 작용하기 때문에 결과적으로 기체-액체-고체의 3상 접촉선(triple contact line)에서 액체 쪽에서 기



체 쪽으로 밀리는 현상이 나타나는데 이는 전기가 가해지지 않았다면 고체 계면의 Wettability가 증가한 것과 같은 효과라 할 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 3 속에 들어 있는 전기를 가하지 않았을 때와 가했을 때에 대한 사진들에서 확실히 알 수 있다.

이와 같은 전기습윤현상은 마이크로 채널 내의 2상(기체-액체 또는 액체-액체) 이상의 유동의 액추에이터에 많이 활용되고 있다. 그림 3의 상부의 채널 유동에 보인 것과 같이 액적의 앞부분은 Wetting이 일어나고 뒷부분은 일어나지 않는다면 그 효과에 의해 액적이 이동하게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 액적을 회전시키는 장치에 대한 사진이 그림 4에 나타나 있다.

또한 전기습윤현상을 이용하여 액적의 곡률 반경을 손쉽게 조절할 수 있고 장치의 소형화가 쉽기 때문에 이러한 장점을 살려 핸드폰이나 소형 카메라에 장착 가능한 Liquid Lens 에도 이러한 기술이 활용되고 있다. 한편 액적-고체 접촉 면적을 크게 변화시킬 수 있으므로 액적의 색깔과 고체표면의 색깔이 다를 경우 전기습윤현상에 의해 쉽게 색깔을 조절할 수 있게 된다. 이러한 원리에 기초한 Electronic Paper와 같은 최첨단 Display 기술 역시 전기습윤의 원리를 이용, 개발 중에 있다.

### 나노유동학과 마이크로유동학의 차이점

지금까지는 채널의 직경 또는 높이가 수십 내지 수백 마이크로인 경우에 적용할 수 있는 점기삼투유동과 전기습윤현상에 대해 알아보았다. 그러나 최근 들어 직경이 수 나노미터 내지 수십 나노미터인 나노 채널, 나노튜브 내의 현상에 많은 연구자들이 관심을 보이고

있다. 그 한 예가 그림 5에 보인 것과 같은 카본 나노튜브 내의 액체의 wetting현상이다.

앞서 언급한 바와 같이 카본 나노튜브 내의 액체 wetting현상은 마이크로 fuel cell에서 일어나는 현상들과 깊은 관계가 있어 매우 중요한 분야로 생각되지만 현재까지 알려진 바가 많지 않다. 따라서 향후 많은 연구가 진행되어야 할 분야가 나노유동학 분야이다.

나노 유동학에서 먼저 고려해야 할 점은 채널의 직경이 어느 정도 이상이면 연속체 가정

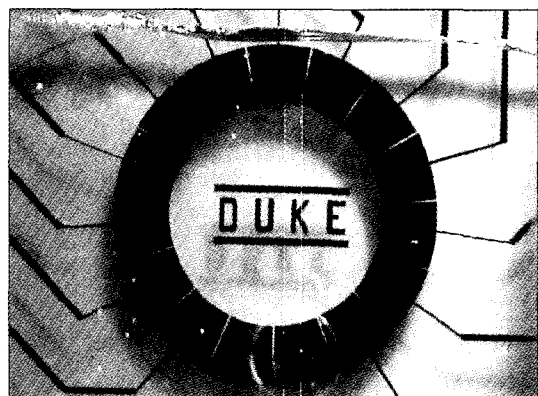


그림 4 전기습윤현상을 이용한 미세 액적의 회전유동장치 (사진:Duke University)

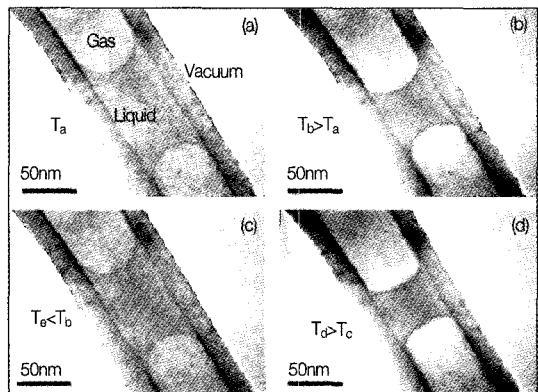
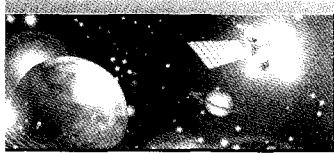


그림 5 카본 나노튜브 내의 액체의 wetting현상 (Appl. Phys. Lett. vol.79, 2001)



(continuum hypothesis)에 입각하여 문제를 다루어도 크게 틀리지 않는 지이다. 이 문제에 대한 답은 액체 속에 들어있는 입자들이 무엇이나에 따라 다르다. 다음에 다룰 내용처럼 순수하게 이온들만 퍼져있는 전해질의 경우에는 채널 직경이 수십 나노미터 이상이면 연속체 가정을 사용하여도 무방하다 알려져 있으나 DNA 등 다른 입자들이 들어 있는 경우는 매우 다른 내용이 되므로 분자론적 해석이 불가피한 것으로 알려져 있다.

### 나노 채널에서의 전기삼투유동

나노 채널에서의 전기삼투유동에 연속체 가정을 적용할 수 있는지의 타당성을 조사하기 위해 분자동역학모사(MD simulation : Molecular Dynamics Simulation) 기법을 사용하여 조사해 본 결과 채널 직경이 수십 나노미터 이상인 경우는 타당성이 있는 것

으로 나왔다. 이는 채널 직경방향으로 이온들의 수가 적어도 수백 개가 존재하여 연속체 가정을 사용하는 데 무리가 없기 때문이라 하겠다. 그러나 직경이 10나노미터 이하로 작아질 경우에는 연속체 가정에 기초한 결과와 MD simulation 결과 사이에는 큰 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 그러한 결과의 예가 그림 6에 나타나 있는데 채널의 폭이 약 3.5nm이고 표면 전하 농도가  $0.12C/m^2$ 인 경우의 MD simulation 결과(빈원들)와 연속체 모델에 의한 결과(점선)를 비교한 것이다. 이와 같이 매우 작은 나노 채널의 경우에는 직경 방향으로 이온의 수가 많아야 수십 개에 해당하여 연속체 가정이 타당하지 않을 것을 쉽게 예측할 수 있다. 특히 이 경우 벽면 개념 차체가 모호해 지는 상황이기 때문에 원론적인 MD simulation 등에 의해 결과를 얻는 것이 타당할 것으로 생각된다.

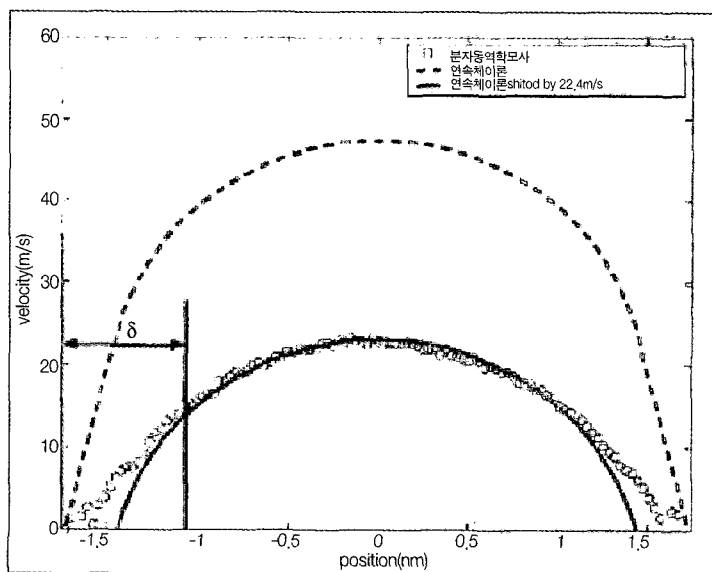


그림 6 폭이 3.49nm이고 표면 전하 농도가  $0.12C/m^2$ 인 경우의 전기삼투유동에 의한 속도 분포에 대한 MD simulation 결과와 연속체 가정에 기초하여 구한 결과의 비교(J. Chem. Phys. vol 118, 2003)

### 나노 채널에서의 Wetting 현상

그림 5에 보인 것과 같이 직경이 수십 나노미터 이상인 나노 채널에서의 기체-액체-고체 계면은 잘 정의되는 것처럼 보인다. 그러나 나노 채널에서의 접촉각(contact angle)을 예측하는 이론적 결과는 발견하기 힘들다. 나노 채널 경우는 표면 전하들에 의해서 형성된 전기 2중층(EDL)의 두께가 채널 직경과 비슷한 크기이기 때문에 EDL 두께가 무시되는 상황에 대해 유도한 이론적 결과들을 적용할

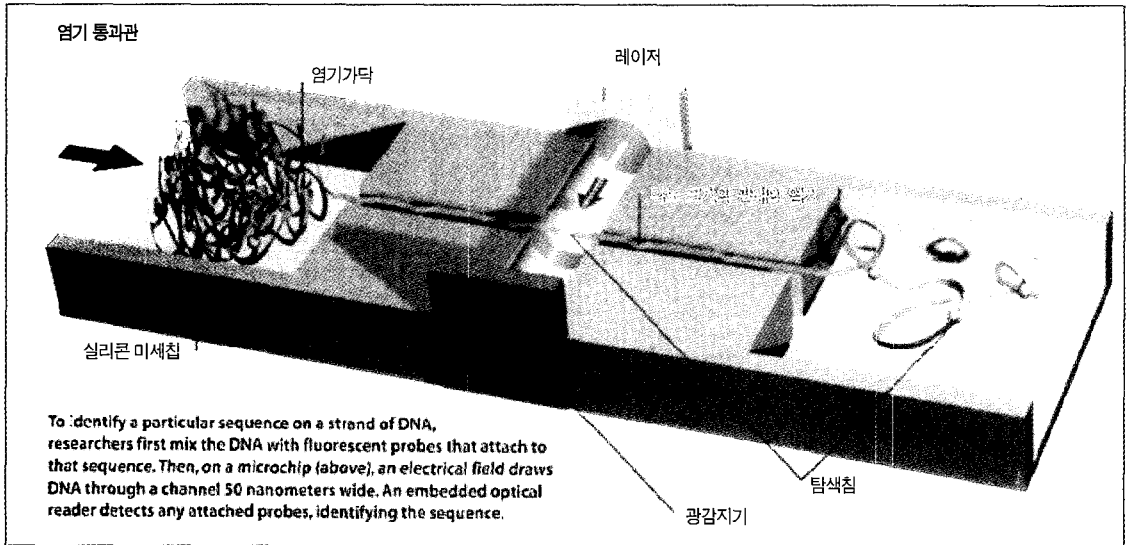
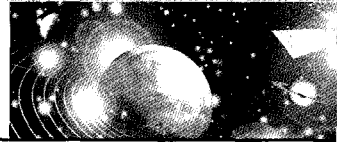


그림 7 나노 채널을 이용한 DNA 서열 분석기(MIT Technology Review, 2002)

수 없다. 따라서 EDL의 두께가 무시될 수 없는 상황에 대한 이론적 해석이 필요하며 이러한 경우에 대한 이론적 결과는 조만간 발표될 것으로 기대된다. 그러나 wetting 문제에 대해서도 채널의 직경이 10nm 이하로 작아질 때는 원론적인 MD simulation에 의한 결과를 얻어야 할 것으로 생각된다.

#### 나노 디바이스에서의 유동학

많은 나노 스케일 디바이스에서는 순수한 전해질 용액을 다루는 경우 보다는 전해질 속에 DNA, 단백질 등 다른 나노 스케일 입자들의 운동이 포함된 경우가 많다. 그 예가 그림 7에 나타난 것과 같은 DNA Pipeline에 의한 DNA 서열 분석기(sequence identifier)이다. 이 경우 수십 나노미터 채널

내부로 유효 직경이 수 내지 수십 나노미터인 DNA strand가 통과하게 된다. 이때 DNA 운동을 해석하기 위해서는 음전하를 띤 DNA Base들과 채널 표면 전하들과의 상호작용, DNA Base들과 전해질 속의 이온들과의 상호작용 등을 동시에 해석해야 하는 난해한 문제이다. 이러한 문제들도 MD simulation이 활용될 수 있는 문제이다. 이와 같은 연구들을 통해 나노 채널 내에서 일어나는 많은 중요한 현상들, 즉 나노 스케일에서 일어나는 고체 표면, 전해질 용액 속에 분산되어 있는 이온 및 나노 스케일 입자들의 상호 작용을 정확히 이해함으로써 최근 급속히 발전하고 있는 Nano Technology(NT)에 의미 있는 공헌을 할 수 있을 것으로 기대한다.