

## 미세 유체기계의 설계 및 제작 기술

성 재 용\*

### 1. 서 론

미세 유체기계는 미소체적의 유체를 조작하기 위한 마이크로 크기의 초소형 유체소자로서 펌프, 밸브, 노즐, 터빈, 혼합기 등 다양한 형태의 초소형 유체소자들이 존재한다. 이러한 미세 유체기계는 반도체공정을 응용한 기계가공 기술인 MEMS(micro electro mechanical system) 기술을 이용하여 제작한다. MEMS 기술은 기계부품의 경박단소화를 통해 첨단제품의 다기능화, 고성능화, 고밀화, 대용량화, 저 전력소모화, 가격 저감화는 물론 새로운 개념의 고부가가치 시스템을 창출할 수 있어 21세기 핵심기술로 주목받고 있다.

초소형 유체소자는 보통 크기의 유체기계를 단순히 작게만 만들면 되는 것이 아니라 새로운 개념의 작동 메카니즘에 의해 구동된다. 특히 유체역학적으로 크기가 마이크로 단위로 줄어들면 점성이 지배적이고 일반적으로 무시해왔던 표면장력과 같은 표면에서의 효과와 전기역학(electrokinetic)적 성질이 중요해진다. 경우에 따라서는 특성길이가 분자의 평균자유행로(mean free path)와 비슷해지면 통상적인 연속체 가정에 의한 Navier-Stokes 방정식이 성립하지 않으므로 새로운 해석과 접근방법이 필요하다. 미세 유체기계의 설계 및 제작은 이러한 미소 유체역학(microfluidics)에 대한 이해와 MEMS 제작 공정에 대한 이해를 바탕으로 이루어질 수 있기 때문에 미세 유체기계의 제작기술로서 MEMS 공정을 살펴보고 미세 유체의 제반 현상과 이를 활용한 유체의 구동 및 응용설계 사례를 살펴보고자 한다.

### 2. 미세 유체기계의 제작기술

미세 유체기계를 포함한 일반적인 초소형 시스템이

나 초소형 기계를 제작하는 기술을 통칭하여 MEMS라고 하며, 국내에서는 이를 '초소형 정밀기계 기술'이라 부르고 있다. MEMS는 1960년대 실리콘 가공기술에서 시작되었으며, 1970년대 일본에서 모기만한 특수 로봇 및 손톱크기의 초소형 자동차 제작 시도하면서 태동하였다. 1980년대 미국에서 수백  $\mu\text{m}$ 의 초소형 현미경 부품 제작 하고 실리콘 기판 위에 마이크로 크기의 부품을 탑재하기 시작하면서 본격화되었다. 1990이후에는 MEMS의 응용범위가 광범위하게 확대되면서 기술개발이 급속히 이루어져 광통신 응용, 열유체 초소형 소자, 마이크로 센서, 소형 구동기들이 개발되었다. 이들의 응용분야도 자동차, 생물산업, 군수산업 등 다양화되고 있다.

표 1에서 볼 수 있듯이 MEMS 소자는 기계적 특성이 들어가므로 기본적으로 3차원 구조이며 (그림 1 참조) 대략 1 - 수백  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가진다. 따라서 기존의 반도체 공정기술과는 차이점이 많으며, 대표적인 MEMS 가공기술을 정리하면 다음과 같다.

#### ◇ Silicon Bulk Micromachining(실리콘 몸체 미세가공 기술)

단결정 실리콘의 이방성 습식 식각 특성을 이용한 것으로 정밀한 구조물의 제작이 가능하다. 그러나 가공 원리상 일부 특수한 형태의 가공만 가능하기 때문에 설계의 자유도가 떨어질 가능성이 있다.

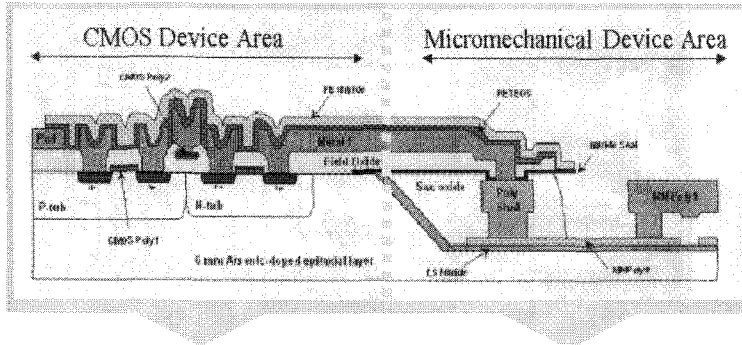
#### ◇ Silicon Surface Micromachining(실리콘 표면 미세가공 기술)

희생층을 이용하여 박막을 선택적으로 증착 및 식각하는 일련의 과정을 통해 소자를 제작하는 기술로서 몸체가공기술에 비해 결정방향과 무관하게 제작할 수 있는 관계로 설계자유도가 있고 CMOS IC와의 공정호환성도 우수한 편이다. 그러나 증착하는 물질의 기계적 특성이 단결정 실리콘보다 나쁘기 때문에 재현성이 떨어지는 단점을 안고 있다.

\* 순천대학교 기계자동차공학부  
E-mail : jysung@sunchon.ac.kr

표 1 반도체 소자와 MEMS 가공기술 비교

	반도체 소자	MEMS
특성	· 전기적 특성 → 전기적 특성 · 2차원적인 집적화	· 전기적 특성 → 기계적 특성 (例:Micro motor) · 기계적 특성 → 전기적 특성 (例:Sensor) · 3차원적인 공간구조
Noise	· 주위환경에 대한 Noise 특성을 고려 해야 함	· 기계적인 움직임은 Noise에 강함
사용공정	· Oxidation, diffusion, lithography sputtering etc	· Surface micromachining, wafer bonding, Bulk micromachining <sup>6</sup>
Scale	· 수천 Å ~ 1 $\mu$ m	· 1 $\mu$ m ~ 수백 $\mu$ m



증착/식각공정을 통해  
2차원적인 구조물 형성  
수천 Å ~ 1 $\mu$ m

기판자체를 식각하여  
3차원적인 패턴/구조물을 형성  
1 $\mu$ m ~ 수백 $\mu$ m

그림 1 반도체 소자와 MEMS 소자의 구조

◇ LIGA 공정(Lithographie Galvanofomung Adformung)  
X-Ray를 이용하여 고 단면비를 갖는 구조를 형성하고, 이를 도금을 이용하여 금속층을 제작한 뒤 플라스틱이나 기타 다른 물질로 전사하는 과정으로 구성되는 기술이다. 실리콘이 아닌 다른 물질로 소자를 제작할 수 있는 장점이 있으나 X-Ray를 만들어 내는 장비가 고가이며 노광시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 그러나 일단 틀을 한번 형성하고 나면 대량생산 시 큰 비용이 들지 않는다.

◇ 고단면 식각 기술  
기존의 몸체가공과 표면가공의 장점을 모두 살리기 위해 Bosch process를 이용한 Deep RIE등과 같이 이방성 습식 식각을 하지 않으면서 고 단면비 구조물 제작을 위한 공정 기술이다.

◇ Quartz 이용 공정 기술  
MEMS 제작공정으로 Quartz를 이용한 미세 가공이 실리콘을 대신하는 재질로의 사용이 활성화되고 있다. Quartz는 자체로 압전 특성을 갖고 있을 뿐 아니라 실

리콘처럼 이방성 습식식각이 되면서도 자체가 부도체이기 때문에 다양한 설계 자유도를 제공할 수 있다.

◇ Packaging  
Packaging은 제작에 필적하는 중요한 공정으로 기존의 IC에서는 표준화 된 기법을 사용하고 있지만 MEMS의 경우 다양한 방법이 존재하며 기술적으로 해결해야 할 많은 문제가 있다. Packaging은 그 자체로 소자의 보호를 해야 할 뿐 아니라 이 과정에서 소자의 특성에 영향을 주지 않아야 하며 최소한의 공정 비용이 소요되어야 한다. Packaging에서 중요한 이슈로는 가격을 줄이기 위한 기판단위의 일괄공정 방법과 전체모듈의 크기를 최소화하기 위한 Flip-chip bonding 형태의 조립공정 등이 있다.

### 3. 미세 유체기계의 설계 기술

#### 3.1 미세 세계에서 유체역학적 특성

마이크로 크기의 초미세 유체기계를 설계함에 있어

어 우선적으로 고려하여야 할 사항은 마이크로 크기의 나타나는 제반 유체역학적 특성을 이해하는 것이다. 통상적인 크기의 유체기계를 마이크로 크기로 축소 제작하게 되면 여러 가지 예상하지 못했던 문제들이 발생할 수 있는데, 그 대표적인 사례가 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 1 보다 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. 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 표면전위를 가지고 있다. 또한 순수한 물을 포함한 대부분의 유체도 전하를 내포한 전해질의 성질을 가지고 있다. 만약 그림 2에서와 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 전기이중층(EDL, electric double layer)라고 하고 크게 고체 벽면 근처 0.5 nm 구간에서 전하가 움직이지 않는 stern layer (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 부르는데, 이 zeta potential의 크기는 뒤에서 설명할 전기영동(electrophoresis) 또는 전기삼투(electroosmosis)로 인해 생기는 유체의 이동 속도와 매우 밀접한 관련이 있다. 이러한 전기이중층은 매크로 스케일에서는 수력직경에 비해 매우 작기 때문에

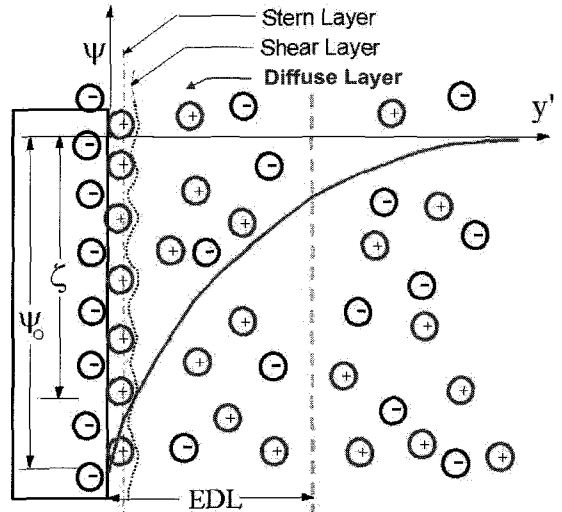


그림 2 전기이중층(EDL)과 zeta potential의 형성

고려할 필요가 없으나 마이크로 크기의 수력직경에서는 그 영향을 무시할 수 없다.

### 3.2 미세 유체의 이송

유체기계는 유체를 작동물질로 하여 에너지를 공급하거나 발생시키는 기계를 말하므로 유체의 움직임이 필수적으로 동반된다. 유체기계의 중요한 성능 지표인 압력과 유량을 마이크로 크기의 채널유동에 대해 고찰하면, 100  $\mu\text{m}$  크기의 채널에 1  $\mu\text{l/s}$ 의 유량으로 물을 흘릴 때 약 1 mm 이동시키는데 필요한 압력은 대략 400 Pa 정도 된다. 만약 채널의 크기가 10  $\mu\text{m}$ 로 줄어들면 40 기압이 되므로 이는 마이크로 크기로 축소된 일반형 유체기계에서는 현실적으로 구현하기 어렵다. 따라서 마이크로 크기의 미세 유체기계에서의 유체 이송을 위한 구동부는 기존의 매크로 스케일에서 설계하던 방식으로는 해결되지 않으며, 미세 세계에서 나타나는 제반 유체역학적 특성을 역으로 이용하는 것이 가장 효과적이다.

액체를 작동물질로 하는 유체기계의 경우 마이크로 크기에서 지배적인 표면장력을 잘 활용하는 방안이 많이 연구되고 있다. 미세 채널에서의 표면장력은 그림 3에서와 같이 친수성(hydrophilic)인 경우 모세관 압력(capillary pressure)으로 인해 액체를 끌어당기는 힘으로 나타나기 때문에 복잡한 임펠러에 의한 압력 발생이 없더라도 쉽게 유체를 이송시킬 수 있다. 표면장력의 크기는 곡률반경뿐만 아니라 표면장력계수에 의해

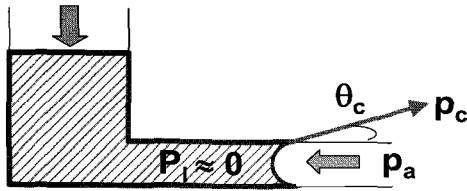


그림 3 모세 압력에 의한 유체의 이송

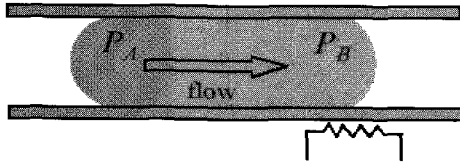


그림 4 열모세관(thermocapillary) 현상

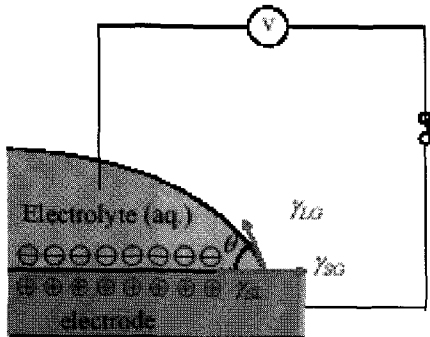


그림 5 전기모세관(electrocapillary) 현상

서도 달라지며, 이를 제어하여 미소 액적을 이송하는 방법은 크게 두 가지가 있다. 진다. 첫 번째는 그림 4의 열모세관(thermocapillary) 현상을 이용한 것으로 정지된 미소 액적의 한쪽 부분을 열선을 이용하여 계면을 가열함으로써 표면장력계수를 변화시키면 미소 액적의 양단에 걸리는 모세 압력에 차이가 발생하여 액적이 이동을 하게 된다. 두 번째는 작동 유체가 전해질인 경우 그림 5와 같은 전기모세관(electrocapillary) 현상을 이용할 수 있는데, 한쪽 계면에 전압을 가하여 접촉각(contact angle)을 소수성에서 친수성으로 변화시킴으로써 곡률반경의 변화로 인한 모세 압력의 차이를 발생시키는 기법이다.

전기역학적 특성을 이용하여 미세 유체를 이송시키는 기법으로서 전기영동과 전기삼투 현상을 이용하는 방법이 있다. 전기영동은 유체 내에 대전된 입자가 있을 때 대전된 입자표면에 전기이중층이 형성되고 양단에 전기장을 걸어주면 이 입자들이 유체에 대해 상대적으로 양극 또는 음극으로 이동하는 현상을 말한다. 입자들의 상대적인 이동에 따라 유체의 이동이 발생할

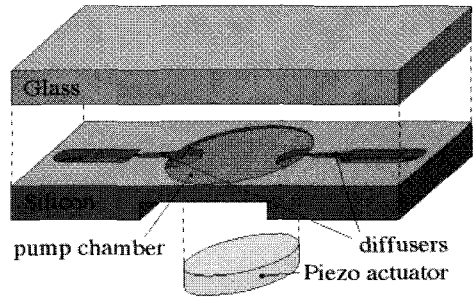
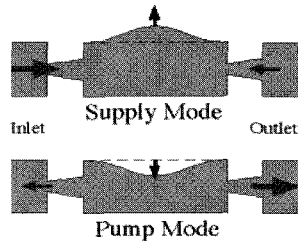


그림 6 무밸브 디퓨저형 미세 펌프

수 있으나 전체적으로 대전된 입자들이 중성을 띠고 있다면 양쪽 방향으로의 입자들의 흐름이 동일하기 때문에 유체 유동은 발생하지 않는다. 이에 반해 전기삼투는 표면에 전위를 가지는 정지된 벽면에 전기이중층이 형성되고 전해질로 이루어진 유체에 전기장을 걸어주면 유체 유동이 발생하는 현상을 말한다. 이는 그림 2에서 diffuse layer에 있는 이동이 자유로운 (+) 이온들이 가해진 전기장에 의해 음극으로 이동하면서 주위 유체를 끌고 가기 때문에 나타난다. diffuse layer 바깥부분의 유체는 점성에 의해 같이 이동하며 따라서 속도 분포가 전체적으로 평탄한 형태를 가진다.

### 3.3 단위 유체기계의 응용 설계

일반적인 크기의 유체기계는 다양한 종류로 개발되어 왔지만 미세 유체기계는 개발의 역사가 짧고 여러 가지 기술적인 문제가 많아 상용화된 것은 그리 많지 않다. 그럼에도 불구하고 실험적 단계에서는 여러 가지 시도들이 있었으며, 대표적인 단위 유체기계로서 펌프, 터빈, 혼합기의 설계 사례를 살펴본다.

#### ◇ 펌프

일반적인 멤브레인 형태의 미세 펌프는 그림 6과 같이 공동부(cavity)와 이를 둘러싼 멤브레인, 그리고 멤브레인을 구동하기 위한 기계식 구동부(actuator) 그리고 입출구에 각각 설치된 체크밸브로 구성되어 있다.

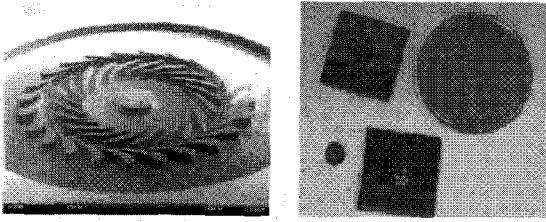


그림 7 MEMS 가공으로 제작된 미세 터빈

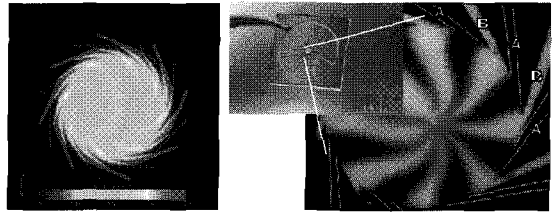


그림 8 보텍스를 이용한 미세 혼합기

멤브레인의 주기적인 상하운동은 공동부를 축소, 확대 시킴으로써 체크밸브를 통한 펌핑이 가능하다. 초기에는 수동적으로 개폐되는 체크밸브를 사용하였으나 신뢰성에 문제가 있어 그림 6과 같은 움직이는 부분이 없는 디퓨저형태의 밸브가 개발되기도 하였다. 기계식 구동부는 구동하는 힘의 방식에 따라 정전형(electrostatic), 압전형(piezoelectric), 전자기식(electromagnetic), 열공압식(thermo-pneumatic), 바이메탈형(bimetallic) 등으로 구분되어 사용된다. 그러나 이러한 구동방식은 고전압 또는 고전력을 필요로 하므로 실용적인 응용이 어렵기 때문에 최근에는 수은 액적을 전기모세관 원리에 의해 왕복운동시켜 구동하는 기법도 개발되었다.

#### ◇ 터빈

미소 체적의 독립된 시스템을 만들기 위해서는 자체 동력기관을 반드시 필요로 한다. 따라서 동력기관도 마이크로 크기로 줄어들어야 한다. 이러한 미세 크기의 터빈은 아직 개발단계에 있으나 그림 7과 같이 2차원 MEMS 가공기술로 구현한 터빈 블레이드의 제작이 시도되었다. 미세 터빈 기술은 여러 개의 부품이 복합적으로 결합되어야 한다는 것과 회전부가 있어 이를 지지할 베어링을 설계해야 하는 등 많은 문제점들을 가지고 있다. 또한 다른 미세 시스템과 달리 기체를 작동유체로 사용하기 때문에 이에 대한 해석 및 측정 등이 무엇보다도 어려운 부분이라 할 수 있다.

#### ◇ 혼합기

미소 유체를 다루는 시스템에 있어 가장 큰 문제점 중의 하나는 두 유체를 효과적으로 섞을 수 있는 방안을 마련하는 일이다. 앞에서 말한바와 같이 마이크로 크기의 유로에서는 레이놀즈수가 매우 작기 때문에 대

류(convection)에 의한 혼합보다는 점성에 의한 확산(diffusion)이 지배적이며, 두 유체를 충분히 섞기 위해서는 매우 긴 길이의 유로를 필요로 한다. 따라서 시스템의 크기가 커질 뿐만 아니라 긴 유로로 인한 높은 압력강하도 문제가 된다. 이러한 마이크로 스케일에서의 혼합 길이를 최소화하기 위한 노력들이 다양하게 이루어져 왔으며, 크게 나누어 능동제어와 수동제어 기법으로 구분된다. 능동제어는 외부에서 에너지를 가하여 유동을 제어함으로써 혼합효율을 증진시키는 방식이며, 수동제어는 적절한 유로의 설계를 통하여 유체 흐름을 변화시켜 혼합을 개선하는 방식이다. 전자의 경우 성능은 우수하나 시스템화가 어려워 대부분 후자의 경우를 많이 사용한다. 그림 8에서는 수동제어 방식의 하나인 Rapid vortex mixer를 보여주고 있다.

## 4. 결 론

미세 유체기계는 그 자체만으로 독립적인 시스템이 되기 어렵기 때문에 주로 미세 유체소자로 일컬어지며, 이러한 소자들이 조합되어 하나의 최종 시스템이 된다. 따라서 완성된 시스템이 제품으로 나오기 위해서는 각각의 소자들에 대한 연구, 개발이 선행되어야 한다. 미세 유체기계는 다양하게 응용될 수 있으나 미래의 시장 환경을 고려한 가장 큰 응용분야는 바이오 기술이 될 것으로 예상된다. 최근의 바이오 기술은 미소혈액을 이용하여 질병을 분석, 진단하기 위한 바이오칩(biochip)을 중심으로 급속히 발전하고 있다. 이 중 LOC (Lab-on-a-chip) 기술은 혈액의 채취에서부터 정제, 반응, 검사의 모든 과정을 IC 카드 크기의 칩 위에서 수행하는 것으로 미세 펌프, 혼합기 등 다양한 종류의 미세 유체기계 기술이 필요하다.