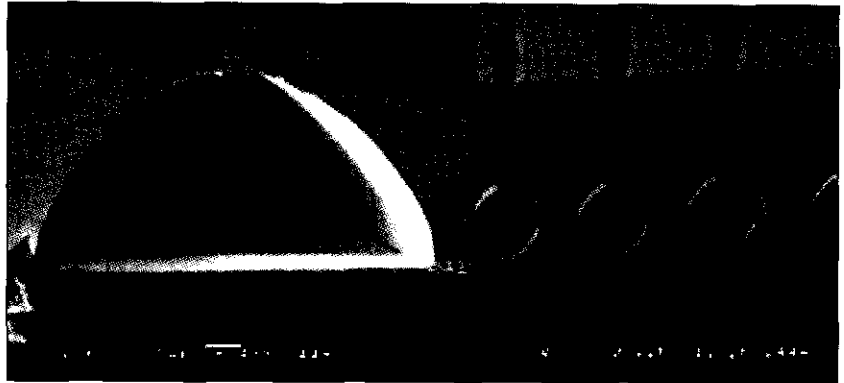


# 초소형 유체소자와 그 응용

이 글에서는 초소형 유체 소자를 소개하고 이들이 MEMS에 응용되는 예를 살펴본다.  
심우영·양상식

**초**소형 유체 소자는 미량의 유체를 수송하거나 제어하는데 필요한 소자이다. 대표적인 초소형 유체 소자로 는 미세 유로, 초소형 펌프, 초소형 밸브, 초소형 유량 센서, 초소형 혼합기, 노즐/디퓨저 등이 있다.



MEMS 기술을 이용하여 제작한 미세 유로의 전자 현미경 사진 (왼쪽 사진의 유로폭은 80  $\mu\text{m}$ 이며, 유로벽은 600 nm의 산화막과 50 nm의 질화막으로 구성되어 있다. 오른쪽 사진은 매설 유로 제작 기술(Buried Channel Technology)을 사용한 유로의 단면 확대사진이다.

## 미세 유로

미세 유로는 초소형 유체 시스템에는 필수적인 유체의 통로로서 실리콘, 유리 혹은 수지 등의 재료를 사용하여 마이크로머시닝 기술로 제작된다. 미세 유로는 기존의 유로와는 다른 유동 현상을 보인다. 미세 유로의 유동에서는 중력의 영향을 무시할 수 있고, 표면 장력과 유체의 점성력이 관성력에 비해 크다. 물 같은 액체도 미세 유로에서는 층류 유동 현상을 보인다.

## 초소형 펌프

마이크로 펌프는 그 크기가 수

cm 혹은 수 mm이며, 미소 유량 제어(수  $\mu\text{l}$  ~ 수  $\text{p}\text{l}$ )가 가능하여 각종 분석 시스템이나 세포 융합 시스템, 약물 주입기 등 생화학 및 의공학 분야에 응용되고 있다. 마이크로 펌프는 구조, 운동방식, 구동 방식에 따라 종류가 나뉜다. 우선, 펌프 구동부의 박막 유무에 따라 박막형 펌프와 비박막형 펌프로 구분된다. 박막형 펌프에는 운동방식에 따라 노즐/디퓨저 혹은 밸브를 갖는 왕복 운동형 펌프와 세 개 이상의 구동 박막을 연동운동시켜 펌핑하는 연동형 펌프가 있다. 또한, 구동 방식에 따라 정전형, 압전형, 열공압형, 상변화형, 전자기형, 버블형, 전기영동형, 전기삼투압형 펌프로 구분

된다.

### 정전형 펌프

정전력은 거시세계에서는 무시될 정도로 작으나, 미시세계에서는 에너지 밀도가 큰 정전력을 이용한 펌프이다. 간극이 작은 두 평행판 전극 사이에 전압을 인가하면 정전력에 의해 가동전극 박막의 변위가 생긴다. 이를 이용하여 가스나 시료를 펌핑하게 된다. 정전형 펌프는 수 ms의 고속 응답이 가능하지만, 100 V 이상의 고전압으로 구동되는 단점이 있다.

### 압전형 펌프

압전 물질(PZT)에 전압을 인가하면 변형이 일어나는 효과를 이용하여 박막을 구동시킨다. 압전 세라믹을 이용하는 경우 다른 구동방식에 비하여 큰 힘을 낼 수 있고, 간단한

· 심우영, 아주대학교 정보전자기술연구소 연구원, e-mail: woorat@mems.ajou.ac.kr  
· 양상식, 아주대학교 신소재공학부 교수, e-mail: ssyang@madang.ajou.ac.kr

구조로 제작할 수 있다. 그러나, 이 방식은 비교적 높은 인가 전압이 필요하며 변위가 작은 단점이 있다.

#### 열공압형 펌프

마이크로 히터에 전압을 인가할 때 발생하는 열로 공동 내의 공기를 팽창시켜 박막을 구동한다. 다른 구동 방식에 비해 구동 전압이 낮고, 구동기의 변위가 큰 장점이 있으나 펌프 자체의 온도가 상승하는 문제가 있다.

#### 상변화형 펌프

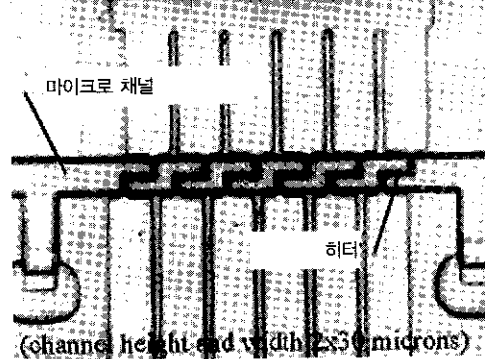
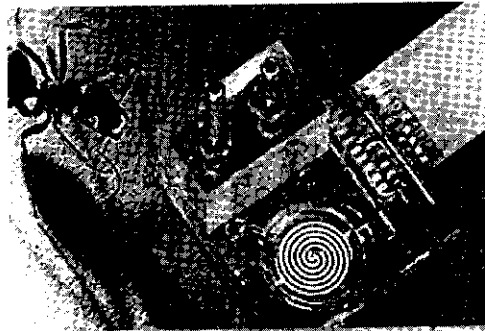
열공압형과 유사하며 공기 대신 액체를 이용한다. 공동 내 작동 액체를 히터 열로 가열하여 기체로 기화시킨다. 이때 공동 내 부피 팽창을 이용하여 박막을 구동시킨다. 장·단점은 열공압형과 같으며 상대적으로 온도 상승이 적다.

#### 전자기형 펌프

전자석의 원리를 응용한 방식이며, 마이크로 코일과 영구자석을 이용하여 제작한다. 마이크로 코일에 전류를 인가하면 발생하는 전자력에 의하여 박막이 구동된다. 코일에서 발생하는 열은 상변화형 펌프보다 적으나, 영구자석으로 인하여 펌프의 크기가 다른 방식의 펌프에 비하여 상대적으로 크다.

#### 기포형 펌프

미세 유로 사이에 존재하는 여러 개의 마이크로 히터에 연속적으로 전압을 인가하면 연속적인 기포들이 만들어진다. 이렇게 연동적으로 발생된 기포의 이동에 의하여 기포



열공압형 마이크로 펌프(위쪽)와 기포형 마이크로 펌프(아래쪽)의 사진. 위쪽 펌프의 크기는 10×9 mm<sup>2</sup>이며, 중앙에 있는 나선형 마이크로 히터를 볼 수 있다. 아래쪽 펌프의 경우 800 Pa 압력 하에서 0.5 nl/min의 유량을 보였다.

사이에 존재하는 유체가 이동된다. 이 경우 밸브가 필요없는 구조를 갖게 되어 펌프의 크기를 줄일 수 있으며, 간단한 제조 공정으로 펌프의 제작이 가능하다.

전기 영동형 및 전기 삼투압형 펌프  
전기 유체 역학적인 펌프라고 할 수 있으며, 구동부가 필요 없는 펌프이다. 적당한 용매에 들어있는 이온에 전압을 인가하여 이온의 흐름을 이용하여 구동시키는 방식이다. 구동부가 필요 없는 장점으로 인하여 최근 생물학, 화학, 유전학적인 각종 장치의 미세 유량 제어에 활발히 응용되고 있다.

#### 초소형 밸브

초소형 밸브는 유체가 일정한 방향으로 흐르도록 만들거나, 유량을

조절하기 위해 사용된다. 일반적으로 수동형 밸브와 능동형 밸브로 나뉜다. 수동형 밸브는 구동부가 필요 없고, 구조가 간단하여 체크 밸브 혹은 압력에 따라 유량이 조절되는 밸브로 이용된다. 정확한 유량 제어를 위해서는 능동형 밸브가 사용된다. 능동형 밸브의 경우 구동부가 필요하며, 각각의 구동 방식에 따라 열공압형, 상변화형, 전자기형, 열팽창형(바이메탈형 포함), 압전형, 정전형 밸브로 구분된다. 이중 열팽창형 이외의 방식은 앞서 기술한 마이크로 펌프의 구동방식과 동일하며, 단지 유로의 개폐에 적합한 구조로 되어 있다는 것이 차이점이다.

열팽창형과 바이메탈형 밸브는 열이 발생되면 변형되는 물질을 이용하거나, 서로 다른 열팽창 계수를 갖는 두 금속을 접합시켜 구동시키는 방식이다.

#### 초소형 유량 센서

초소형 분석 시스템이나 유체 시스템에서는 마이크로 펌프와 밸브 이외에 유체의 속도, 유량 등을 측정할 수 있는 센서가 필요하다. 이러한 센서를 이용하여 원하는 양의 유체를 정확하게 제어할 수 있다.

유체의 압력으로 속도를 검출하는 센서의 원리에는 압저항형과 정전 용량형 등이 있다. 압저항형 센서의 경우 유로와 센서의 공동 사이에 박막이 존재하며, 박막 표면에 압저항체가 있다. 유체의 흐름에 따라 막이 변형되면 저항값이 달라지게 된다. 이러한 저항 변화를 측정하여 유속을 산출한다. 그 외 정

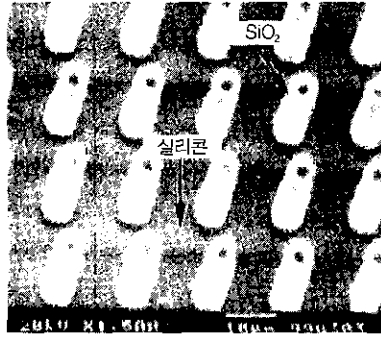
전 용량형 유량 센서의 경우 유체 흐름에 의한 평판 전극간 거리 변화로 인하여 정전용량이 변화한다. 이 정전용량의 변화를 증폭시켜 유량을 측정하게 된다.

유체의 압력 이외에 열전달 효과를 이용하여 유량을 검출하는 센서 방식도 있다. 미세 유로를 제작하고 말단에 저항체를 제작한다. 저항체는 온도 변화에 따라 저항의 변화가 발생할 수 있는 재료를 사용한다. 저항체에 일정한 전류를 인가하면 열이 발생되며, 유로의 유량이 증가할수록 저항체의 열손실이 커진다. 이때 발생하는 온도 변화에 따른 저항값의 변화로 유량을 측정한다. MEMS 기술을 적용하여 제작된 유량 센서의 경우 수 nl/min의 유량을 측정할 수 있다.

대부분의 유량 센서는 제작 시 증폭회로를 동일한 칩 내에 내장하여 잡음을 줄이고, 외부회로 없이 신호 처리가 가능하도록 만들어진다.

### 초소형 혼합기

두 개 이상의 물질의 혼합 제어는 화학적 분석과 합성, 약물 주입,



배양 세포 내에 DNA 주입을 위한 미세 주입기(왼쪽)와 혈관 내시경용 초소형 주사기(오른쪽) 사진. 주입관 한 개의 높이는 30  $\mu\text{m}$ 이며, 내경은 5  $\mu\text{m}$ 이다. 주사기의 크기는 1 $\times$ 5 $\times$ 1.6 mm<sup>3</sup>이다.

세포 용해 등의 작업에 있어서 매우 중요하다. 일반적으로 물질의 혼합을 위해서는 각 물질간의 접촉면적이 최대가 되어야 한다. 거시세계의 경우 난류가 이러한 작용을 충분히 해주지만, 미시세계에서는 확산 및 난류가 충분하게 발생되지 못한다. 마이크로 혼합기는 강제적으로 두 물질을 혼합하기 위해 수동적 방법과 능동적 방법을 사용한다. 수동적 방법의 경우 유로 및 교차 지점의 형태를 확산 및 난류의 발생이 쉽도록 특수하게 제작하며, 능동적 방법의 경우 펌프와 밸브를 사용하여 강제적으로 혼합시키는 형태를 갖는다.

### 초소형 노즐/디퓨저

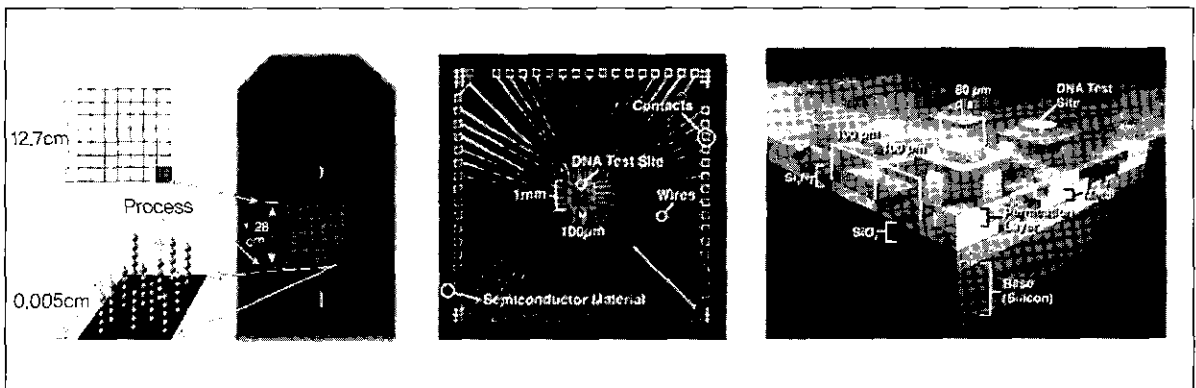
노즐은 입구로부터 출구의 단면

적이 점진적으로 작아지는 형태이며, 디퓨저는 반대의 형태를 갖는다. 노즐/디퓨저에 유체가 흐를 때, 양방향의 유로저항이 다르므로 한 쪽 방향의 순유량이 생기게 된다.

일반적으로 노즐과 디퓨저는 함께 쓰이며, 주로 밸브가 필요 없는 펌프에 사용된다. 주 응용 분야로 잉크젯 프린터 헤드, 초소형 피펫, 질량 분석기, DNA 주입기 등이 있으며, 극소량의 물질을 정량적으로 분사 및 주입시킨다.

### 초소형 유체 소자의 응용

앞서 기술한 초소형 유체 소자의 응용 분야 중 실제적인 응용이 이루어지고 있는 의학, 생화학 분야를 중심으로 개략적인 설명을 하고자 한다.



왼쪽 사진은 Affymetrix사에서 제작된 Genechip<sup>®</sup>이며, 중앙 사진은 Nanogen사에서 제작된 반도체 마이크로 칩(Semiconductor Microchip)이다. 마이크로 칩 중앙에 있는 DNA 시험영역(Test site)을 확대한 사진이 오른쪽 사진이다.

## 의학적 응용

### 1) 초소형 주사기

기존의 주사기는 환부와 멀리 떨어져 있는 곳에서 약물을 주입하여 혈관을 따라 전신으로 약효가 발현된다. 이로 인하여 약물의 소비가 많고, 치료 속도가 늦다. 하지만, 초소형 주사기는 혈관 내시경의 말단에 부착되어 혈관 내 환부에 직접적인 약물을 투여한다. 이때, 전기적 신호에 의하여 주사기 내 약물이 순간적으로 환부에 주입되게 된다. 초소형 주사기의 사용은 직접적인 약물 투여로 인하여 약물의 소비를 크게 줄일 수 있으며, 치료 효과도 향상시킬 수 있다.

### 2) 초소형 약물 주입 장치

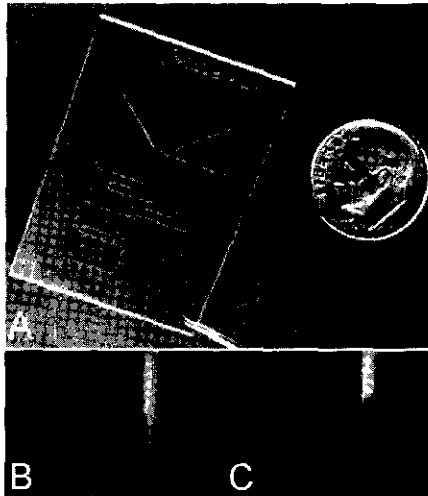
당뇨병 환자의 경우 일정량의 인슐린을 주기적 간격으로 주입해주어 한다. 기존의 치료에서는 먹는 약이나 주사기를 사용함으로써 환자에게 투약의 불편함과 고통을 주었다. 하지만, MEMS 기술을 적용한 초소형 바늘 다발과 초소형 펌프, 혈당 센서, 제어 회로 등이 집적된 손목시계형 인슐린 주입장치가 개발되고 있다. 초소형 바늘의 반경이 수십  $\mu\text{m}$  이내로 바늘 삽입 시 통증이 거의 없으며, 제어 회로에 의해 일정한 량의 인슐린을 마이크로 펌프가 정확하게 주입하게 된다. 환자는 단지 손목시계를 팔목에 차는 것만으로 간단하게 해결된다.

### 3) DNA 칩

DNA 칩은 인간 유전자 기능 분석, 유전병 진단, 유전자 치료, 동식물 검역, 생태학 연구, 신약 개발 등 기존의 생물학적, 의학적 지식에 엄

청난 파급효과를 가져오고 있다.

지금까지 유전자 암호를 얻어내는 유전 공학적 방법들은 한 연구자가 동시에 많은 수의 유전자를 가지고 실험을 하는데 한계가 있었다. 하루에도 수백 개 이상 밝혀지는 새로운 유전정보들을 기존 방법들로 연구한다는 것은 너무나 많은 시간을 요구하기 때문이다. 그러나 MEMS 기술과 컴퓨터 처리 기술을 적용하여 적게는 수백에서 수십만 개의 DNA를 아주 작은 단위 공간에 집적하는 것이 가능해졌기 때문에, 수백 개 이상의 유전자를 동시에 고



A는 Caliper Technologies사에서 제작한 LabChip의 사진이며, B와 C는 전기 삼투압을 이용하여 유체를  $\text{nl}$  이하로 추출해내는 모습을 형광물질로 이용하여 찍은 사진이다.

속으로 검색할 수 있게 되었으며, 아주 적은 양의 유전물질을 고밀도로 사용함으로써 비용을 획기적으로 줄일 수 있게 되었다. DNA 칩은 제작 및 검출 방법에 의해 크게 다음과 같이 구분된다.

#### ① 초소형 핀 배열방식 칩

초소형 핀(바늘)을 이용하여 시편에 점을 찍는 듯한 방법으로 반응

물질의 배열을 만든다. 그 후 검사하고자 하는 시료와 반응시킨 후 레이저를 이용하여 활성화된 상태를 관찰한다. 이러한 방법은 수천 개 이상의 유전자 발현변이를 단 한번의 실험으로 검색할 수 있다.

#### ② 잉크젯 배열방식 칩

핀 방식과 비슷하며, 핀 대신 잉크젯 프린터에 쓰이는 초소형 주사장치를 사용한다. 구동 방식에 따라 열공압형, 전자기형, 압전형이 있다. 이 기술은 유전자를 전기적으로 칩 표면에 닿지 않고 뿌릴 수 있기 때문에 정량의 유전자가 붙어 있는 많은 수의 칩을 생산할 수 있다.

#### ③ 사진 식각공정 칩

반도체 및 MEMS 제조 공정에서 사용되고 있는 사진 식각 기술(photolithography)을 사용하여 수만 개의 다른 염기(nucleotide)들을 하나의 유리판 위에 직접 합성시켜 chip을 생산한다. 현재 Affymetrix 사(社)에서 이러한 방법을 이용하여 한 개의 칩에 65,000 개의 효모 유전자를 갖는 올리고 뉴클레오타이드(oligonucleotide) 칩을 제작하였다.

#### ④ 전기적 배열방식 칩

DNA가 음(-)전하를 띠고 있는 성질을 이용하여 칩의 표면에 있는 특정 위치에 양(+) 전기를 갖도록 하여 유전자를 붙게 만드는 방법을 이용한다. 이 기술은 전기 회로에 고유의 번지를 지정할 수 있고, 목적이 되는 DNA를 원하는 특정 위치에 끌어들이므로써 결합 시간을 단축할 수 있다. 현재 이 칩은 미국의 Nanogen 사(社)에서 생산하고 있으며, 2년 안에 모든 경찰차에 이 칩을 보급하여 범행 현장에서 DNA 감식 작업을 할 수 있도록 하고 있다.

위의 네 가지 종류의 칩 중 마지막에 언급된 전기적 배열방식 칩을 제외한 칩들은 형광물질이 부착된 물질과 결합하게 하여 레이저 등의 광원으로 활성화시켜 광학적으로 검출하는 방법을 사용하며, 전기적 배열방식 칩의 경우는 전기 신호로 검출하는 방법을 사용한다.

## 화학적 응용

### 1) 초소형 피펫

화학·생물학 분야에서의 실험들은 표본 시료들과 반응 시료, 또는 화합물들의 정량적 주입 및 이동이 중요하다. 기존 화학·생물 기구 시장에서도 초소형 피펫은 존재하였으나, 수 nl 이하의 시료를 추출, 이동, 주입시킬 수 있으며, 수십 종류의 시료를 동시에 고속으로 처리하기에는 역부족이었다. 그러나 MEMS 기술을 적용한 다양한 초소형 피펫과 디스펜서(dispenser) 시스템이 개발되면서 이러한 작업은 정확하고 신속하게 수행될 수 있게 되었다. 또, 시료의 양도 획기적으로 감소시켜 고가의 시료 소비량을 줄일 수 있다. 이는 시간·비용 면에서 상당한 이익을 가져왔다.

최근, 연구가 활발히 진행되고 있는 세포, 유전자 관련 연구에서는 수  $\mu\text{m}$  크기의 세포들과 그 이하의 크기를 갖는 DNA 등을 다루기 때문에 기존의 기계적 시스템으로는 부적합하다. 이 분야에서 MEMS 기술은 절대이다. 세포의 검출 및 선택적 추출을 위해 초소형 펌프와 미세 유로, 초소형 노즐/디퓨저가 사용되며, 미세한 조작을 위하여 초소형 집게 등이 사용된다.

### 2) Lab-on-a-chip

Lab-on-a-chip은 칩위의 실험실이라고 번역될 수 있으며, 번역 그대로 하나의 칩이 일반 실험실에서 이루어지는 각종 작업들을 실행할 수 있도록 개발되었다. 시료의 공급, 분리, 혼합, 검출 장치를 모두 내장하고도, 그 크기와 무게는 각각 수 cm와 수십~수백 g을 넘지 않는다. 이러한 칩의 적용은 연구소 및 실험실에서 행하여지는 실험에 있어서 혁명이라고 말할 수 있다. 잠재적 효과와 이익은 막대하며, 많은 연구와 산업 전반에 소형화, 집적화, 자동화라는 이익을 가져왔다.

Lab-on-a-chip에서 제어 가능한 부피는 물 한 방울의 십만 분의 일(1/100,000)에 해당한다. 미국 Caliper Technologies 사(社)에서 제작한 LabChip 의 경우 수정, 유리, 플라스틱 같은 투명한 재료를 사용하여, 폭 50  $\mu\text{m}$ , 깊이 10  $\mu\text{m}$ 의 미세 유체 회로를 제작하였다. 시료의 공급, 분리, 혼합, 검출을 위하여 이 칩이 사용한 작동 방법은 다음과 같다.

첫째, 시료의 공급을 위하여 유로의 끝 부분에 위치하고 있는 각각의 시료 저장고(reservoir)에 미세 전극을 연결하고 컴퓨터를 사용하여 전원의 공급을 제어한다. 미세 전극에 전원을 인가하면 유로를 통하여 전기적 흐름이 발생되어 동전기적(electrokinetic) 흐름이 생긴다. 이러한 현상을 전기 삼투압(electro-osmosis)이라고 하며, 이러한 힘을 이용하여 유체의 흐름을 발생시키고 제어한다.

둘째, 시료의 분리를 위하여 두 개 이상의 시료들이 교차하도록 미세 유체 회로를 제작하였다. 우선, 제작된 유로에 버퍼 용액을 채우고, 시료를 일정한 속도로 흐르게 한

뒤, 짧은 순간 버퍼 용액 저장고 전극에 전원을 인가하면, 순간 극미량의 시료가 교차되어 흐르게 된다. 이는 결국 버퍼 용액을 이용하여 시료의 일정량을 분리하는 효과를 나타낸다.

셋째, 시료의 혼합을 위하여 초소형 혼합기 또는 초소형 반응기를 사용한다. 미시 세계의 유체는 서로 잘 섞이지 않고 층류를 형성하기 때문에 강제로 혼합해 주는 혼합기와 반응기가 필요하다. 각각의 구동원리는 앞서 보았던 초소형 펌프와 유사하다.

마지막으로 시료의 검출을 위하여 광학적 방법을 사용한다. 유로의 검출부는 대부분 최종 유로 말단에 위치하며 시료의 반응 유무에 따라 형광 물질의 반응 정도가 다름을 이용한다.

## 학제간 연구 협력

위에서 초소형 유체 소자의 종류, 특징, 응용 등을 소개하였다. 위의 내용들은 일부분에 지나지 않으며, 개척할 응용 분야는 아직 많이 남아 있다. 새로운 분야의 개척은 서로 다른 학문간의 교류와 협력을 통하여 쉽게 이루어질 수 있다. 21세기에 고부가가치를 창출할 수 있는 첨단 분야의 개척을 위해서는 학문간의 벽을 헐고 학제간 협력을 추구하는 자세가 필요하다.

이 글이 미세 유체 소자 및 응용 가능성에 관한 이해에 도움을 주고, 관련 연구의 저변확대에 이바지하기를 기대한다.