

열·유체 초소형 소자 및 관련 산업 응용

이 글에서는 Microfluidics에서 연구되는 초소형 열·유체 소자, Microfluidics의 주요 산업 연구 응용에 및 본 연구진이 직접 수행했던 몇 가지 초소형 열·유체 소자에 대해 소개하고자 한다. **이승섭, 권태현, 김무환, 이상준**

1987년 미국 버클리 대학의 연구진, BSAC(Berkeley Sensor & Actuator Center)은 머릿카라 굽기의 초소형 모터를 발표하였다. 이는 MEMS(Micro Electro Mechanical System, 혹은 MST ; Micro System Technology)라는 새로운 학문 분야의 실질적 효시로서 명실공히 마이크로 단위의 기계-전자 시스템의 구현이라는 새로운 장을 열게 되었다. 초창기 이 새로운 학문 분야는 당시까지로는 불가능하게 간주되었던 다양한 형태의 수~수백 마이크로 크기의 초소형 센서, 액추에이터 및 이를 위한 초소형 기계 구조물의 제작 공법을 제공하였으며, 점차 단순 제작 공법의 제공에서 초소형 집적 시스템의 구현 그리고 이에 따른 다양한 물리·화학현상의 해석 및 이해로 빠르게 그 연구 영역을 넓혀나가게 되었다. 이에 따라, 1980년대

말 일부 MEMS(물론, 당시에는 MEMS라는 말도 존재하지 않았지만...) 전공자를 중심으로 발전되어온 초소형 공정기술은, '90년대 들어서 매우 빠르게 보편화되기 시작하였으며, 지난 10여년 간 전 세계적으로 수행된 심도 있는 연구 투자를 통해, 상용화 적용 및 새로운 산업분야로 확실히 자리 매김을 하게 되었다. 현재, MEMS 시장은 매년 20%의 시장 성장률을 기록하고 있으며, 2000년 기준으로 약 \$ 150억~450억(조사 기관, 시장 영역에 따라 다소 차이가 있음)의 시장을 형성하고 있다.

이러한 새로운 공정기술의 부상은 기존의 공정기술로는 불가능하게 여겨졌던 초소형 소자의 제작 가능성과 그를 이용한 다양한 응용분야로의 적용 가능성을 제시하게 되었는데, 이로 인해 점차 기계, 전자, 재료, 생명, 화학

등의 타 분야 연구자의 관심을 끌게 되었으며, 기계공학의 열·유체분야도 그 가운데 하나가 되었다.

MicroFluidics 혹은 Micro-Thermofluidics는 Micro로 대변되는 MEMS 공정기술과 기계공학 분야의 유체 역학, 혹은 열·유체 역학 간의 융합으로 부상되고 있는 학제간 연구 분야이다. 열·유체 연구자들에게 MEMS 공정기술은 매우 흥미로운 연구 도구로 인식되기에 충분하였다. 수십 마이크로 단위의 유관(channel)이나 챔버(chamber)와 같은 매우 좁은 공간에서의 열·유체 유동 실험 및 해석, 유동 실험에 필요한 새로운 개념의 센서의 구현, 초소형 가스 터빈 등과 같은 새로운 초소형 열·유체 시스템의 연구 등에 광범위하게 적용할 수 있고, 이러한 새로운 연구를 가능케 하는 길을 제공하고 있

- 이승섭 | 포항공과대학교, 기계공학과, 부교수 / e-mail : sslee@postech.ac.kr
- 권태현 | 포항공과대학교, 기계공학과, 교수 / e-mail : thkwon@postech.ac.kr
- 김무환 | 포항공과대학교, 기계공학과, 교수 / e-mail : mhkim@postech.ac.kr
- 이상준 | 포항공과대학교, 기계공학과, 교수 / e-mail : sjlee@postech.ac.kr

기 때문이다.

초소형 열·유체 단위 소자

초소형 유로(micro channel)

가장 간단하게 구현이 가능한 초소형 열·유체 단위 소자로, 수십~수천 μm^2 의 단면적을 가진다. 기관미세가공(bulk micro-machining)을 이용한 단 한 번의 MEMS 공정으로 구현되기도 하고, 표면미세가공(surface micro-



그림 1 반구형의 초소형 채널 안에 다공질 실리콘 막이 있는 모양

machining)을 이용해 다양하고 복잡한 형상으로 구현될 수도 있으며, LIGA(Deep X-ray 노광, 전기도금, 사출 성형의 독일어 약어) 혹은 LIGA-like 공정을 이용해 높은 고품비를 가지는 유로로 구현되기도 한다. 최근에는 PDMS(polydimethyl-siloxane)라는 폴리머를 이용한 초소형 유로의 대량 생산 공정도 보편화되고 있다. 초소형 유로는 유로의 외부 형상뿐 아니라 유로 내부의 형상, 유로 내의 전극 분포 등에 의해서 단순 수동 소자에서 초소형 펌프(pump) 및 믹서(mixer) 등의 역할을 수행하기도 한다.

초소형 밸브 및 펌프

가장 폭 넓게 연구되고 있는 열·유체 소자로, 초소형 밸브는 유체의 유동 방향 및 유동량을 제어하는 데 이용된다. 입·출구의 기하학적 형상의 변화를 이용해 제어하는 수동식과, 움직이는 구동부를 이용한 능동식이 있다. 초소형 펌프는 밸브와 더불어 기초적인 초소형 열·유체 시스템을 구성하며, 유체 유동을 가능케 한다. 펌프 내부에 구동부가 있는 기계식 펌프(mechanical pump)



그림 2 개미와 초소형 펌프

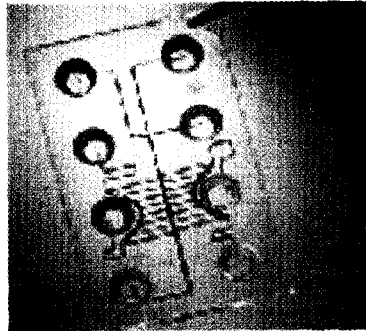


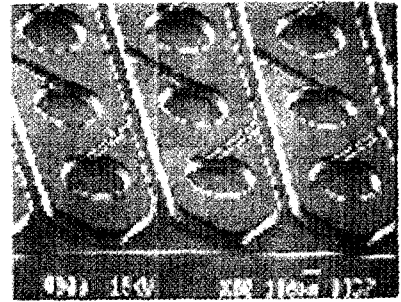
그림 3 Bio-chip 용으로 제작된 초소형 유관과 전기영동 소자

와 구동부가 없는 반기계식 펌프(non mechanical pump)로 크게 구분되어지고, 반기계식에는 EHD(Electro HydroDynamics) 식과 MHD(magnetohydrodynamics) 식이 있으며, 기계식은 구동부를 구성하는 액추에이터의 구동 방식에 따라, 정전

형, 압전형, 전자기식, 열공압식, 바이메탈 형 등이 있다. 구동 방식의 선택에는 구동력, 사용 유체, 반응시간, 공정 난이도 등이 고려되는 데, 예를 들어, 열공압식은 구동력은 강한 반면, 반응 시간이 상대적으로 길고 MEMS 공정도 쉽지않은 반면, 정전식은 구동력은 약한 대신에 반응 시간이 짧고, MEMS 공정이 상대적으로 용이하다.

전기 삼투(electroosmosis) 혹은 전기 영동(electrophoresis) 소자

초소형 펌프의 일종으로 전기를 이용한 초소형 유로에서의 펌핑이 있는데, 전기 삼투는 외부에서 가해진 전기장에 의해 유체(일반적으로 전해질)가 표면에 전위를 가지는 정지된 벽면에 대



해 상대적으로 움직이는 현상을 이용하는 것으로, 초소형 유로 표면 주위에 형성된 전기 이중층(electric double layer)에 외부에서 전기장을 가하면 전기 이중층 내에 상대적으로 많이 존재하는 전하들의 유체에 대한 상대적인 흐름에 의해 펌핑이 생기게 된다.

한편, 전기 영동은 유체에 전기장이 형성될 때 유체 내의 하전 입자가 유체에 대해 상대적으로 양극 또는 음극으로 이동하는 현상을 말한다. 즉 외부에서 주어진 전기장에 대해 음전하를 띤 입자는 양극(anode)을 향해 이동하고, 양전하를 띤 입자는 음극(cathode)을 향해 이동하는 현상을 이용, 일반적으로 DNA, 단백질 등과 같은 물질을 분석하기 위한 Lab-on-a-chip 등의 Bio-MEMS 분야에 사용되고 있다.

유체 혼합기 (micro mixer)

최근 Bio-MEMS 분야의 Lab-on-a-chip 혹은 micro reactor, 및 초소형 가스 터빈 등의 분야에서 많은 연구가 진행되고 있는 소자로, 초소형 유로나 챔버에서 난류 유동 및 확산이 잘 일어나지 않는 유체 역학적 이유로 강제적인 난류 발생과 확산을 목적으로 연구되고 있다.

열·유체 센서

열·유체 유동현상의 실험과 해석에 사용되는 여러 초소형 센서가 있으며, 일반적으로 압력 센서, 온도 센서, 전단 응력 센서, 유량 및 유속 센서 등이 있다.

응용 시스템

잉크젯 프린터 헤드

초소형 펌프의 응용 소자인 잉크젯 프린터 헤드는 현재 MEMS 공정 기술을 이용한 중요 상용 소자로 전 세계적으로 1996년 한 해 4,000만 개 (표 1 '98

년 Task Force Market Analysis MST Report) 이상 생산(소비되었)으며, HP, Cannon, IBM 등과 같은 대기업에 막대한 상업 이득을 가져다 주고 있는 전략 아이템이다. 즉, HP의 잉크젯은 압전 형식의 초소형 펌프이고, Canon의 버블젯(bubble jet)은 열공압 방식의 초소형 펌프라 할 수 있다. 국내의 경우, '95년 G7 사업 과제로 본격적인 연구가 시작되어, 기존의 펌핑 방식을 극복하는 새로운 형태의 구동 방식들이 대기업을 중심으로 활발한 상용화 연구로 수행되고 있다.

Bio-MEMS

Lab-on-a-chip, μ -TAS(Micro Total Analysis System), DNA chip, Protein chip, Micro chemical

system 등의 이름과 접근 방식으로 진행되고 있는 Bio-MEMS 관련연구는 금세기를 주도할 BT(Bio Technology), NT-(Nano Technology), ET(Environmental Technology)가 집적화된 새로운 분야로 급 부상하고 있다. 표 1은 MEMS 분야의 주요 상용 소자들에 대한 '96년과' 2002년의 시장 현황을 비교한 것이다. 초기 MEMS 연구를 이끌었던 압력 센서는 이미 포화 상태이고, 잉크젯 프린터 헤드는 성숙 단계이며, MOE-MS(Micro Opto Electro Mechanical System)로 통칭되는 초소형 광학 소자는 성장 단계인 데 반해, Bio chip으로 표현된 Bio-MEMS 분야는 엄청난 잠재력을 갖고있는 태동기임을 나타내고 있다. Bio-

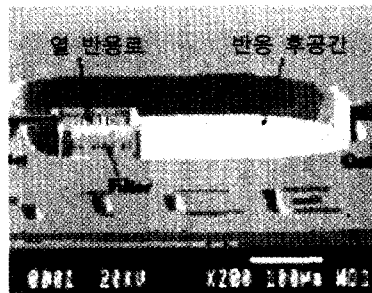


그림 4 초소형 반응기(Micro reactor)

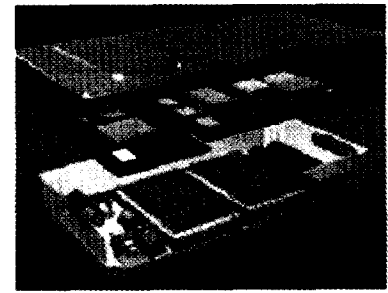


그림 5 차세대 Bio-MEMS 소자 복합 시스템 가상도

표 1 MEMS 주요 단위 소자의 시장 예측 조사 결과

MEMS 소자	1996년		2002년	
	금액 (백만 \$)	수량 (만개)	금액 (백만 \$)	수량 (만개)
압력 센서	115	600	310	1,300
잉크젯 프린터 헤드	100	4,400	500	10,000
광학 스위치	1	5	40	1,000
Bio chip	0	0	100	1,000

('98 Task Force Market Analysis MST Report)

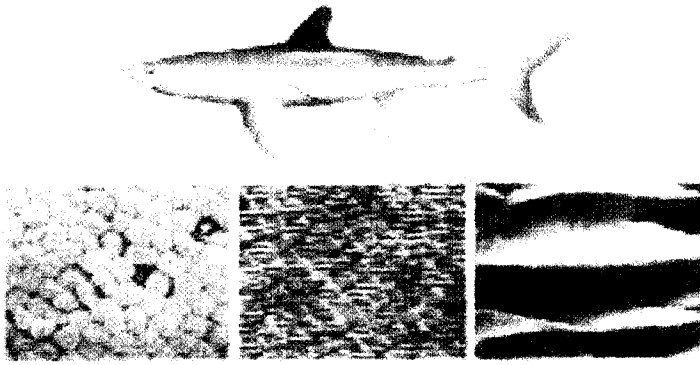
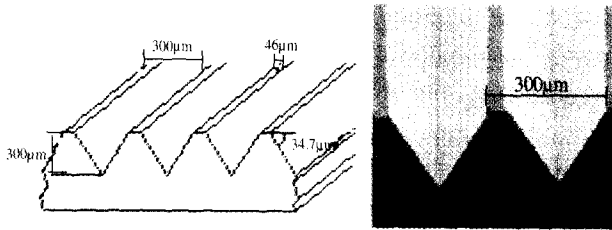
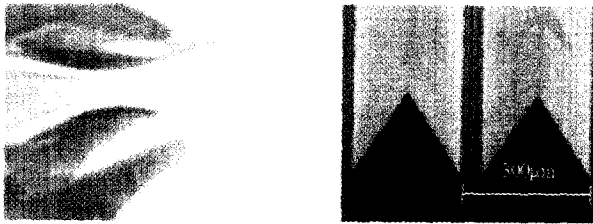


그림 6 리블렛 형상이 보이는 상어 표피



(a) 실리콘 리블렛 기판



(b) 복재된 PDMS 필름

그림 7 기판미세가공으로 제작된 실리콘 기판과 PDMS 필름

MEMS 분야를 Micro-fluidics 관점에서 살펴볼 때, 생체 시료의 유동과 분석이라는 두 가지 기능을 하고 있음을 알 수 있다. 생체 시료의 분석이 생명과학의 영역 안에 있다면, 생체 시료의 유동은 Microfluidics 영역 안에 있음이 명확하다. 어찌보면, 현 시점에서는 Bio-MEMS로 인해 Micro-fluidics의 중요성이 더욱 부각되고, 많은 연구 투자가 이루어지고 있다는 사실을 부인할 수 없으리라 믿어진다. Informa Pharmaceuticals 시장 예측에서 2010년

Bio-MEMS 시장은 약 \$ 100억을 예상하고 있다.

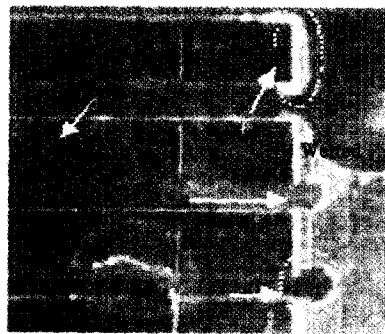


그림 9 초소형 유로에서의 충전 유동 가시화

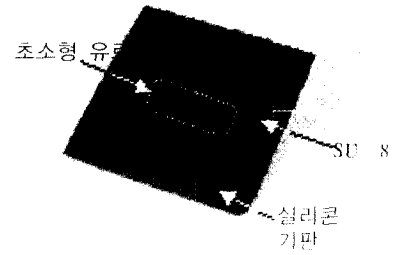


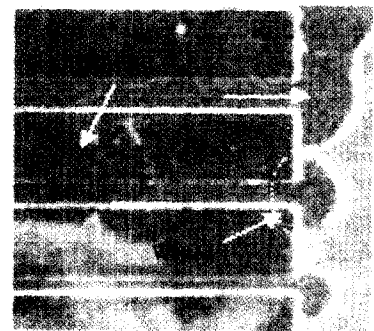
그림 8 10 개의 초소형 유로

포항공대에서의 Microfluidics

본 란에서는 저자의 Micro-fluidics와 관련된 연구의 예들을 소개하면서, MEMS와 유체역학과의 학제간 연구가 실제로 어떻게 수행되어질 수 있는 지에 대해서 기술하고자 한다.

초소형 리블렛

유체역학에서 난류의 유동제어는 중요한 연구 테마 가운데 하나이며, 이 가운데에서 리블렛(riblet)을 이용한 수동제어는 유동 물체에 가해지는 항력을 감소시키는 방법으로서 자연계에서의 상어의 표피에서도 관찰되는데 (그림 6 참조), 물체 표면에 유동 방향으로 수십 마이크론 정도의 미세한 홈이 있는 것으로서 크기 수십 마이크론의 삼각산맥의 형



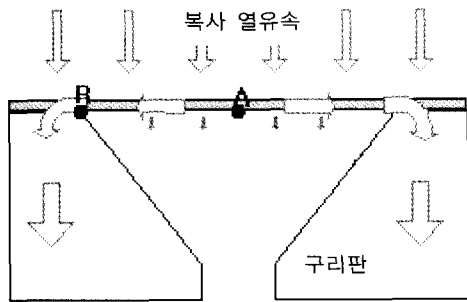
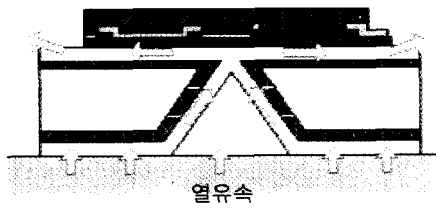
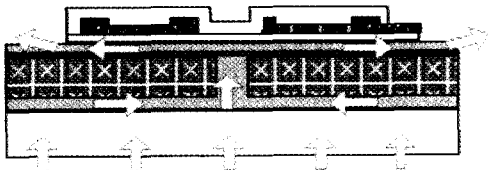


그림 10 원형 열유속 센서



(a) 기판미세가공을 이용한 열유속 센서



(b) SU-8을 이용한 열유속 센서

그림 11 MEMS 공정을 이용한 초소형 열유속 센서

상으로 되어 있다. 기존의 리블렛은 절삭 공정을 통해, 제작되어 왔으나, 이러한 형상은 기판미세가공으로 손쉽게 제작될 수 있음을 MEMS 연구자는 누구나 알 수 있다. 아래 그림 7은 기판미세가공으로 제작된 실리콘 기판과 그를 금형으로 복제한 PDMS 리블렛 필름을 보여주고 있다. 리블렛 필름은 곡면에서의 항력 감소 실험에 사용되었다.

미세 충전 유동

초소형 사출 성형은 Hot em-bossing 공정과 함께 초소형 기계부품의 대량 생산 공정으로 많은 주목을 받고 있다. 이러한 초소형 사출 성형 공정에서 가장 근본이 되는 연구 테마 가운데 하나가 초소형 유로 및 챔버에 사출하고자 하는 소재를 어떻게 빈틈없이 채워넣는 문제이다. 이는 Microfluidics 분야에서의 초소형 유로 및 챔버에 대한 충전 유동(filling flow) 현상으로, 효과적인 해석과 실험, 및 시뮬레이션이 매우 중요하다. 이를 위해, 초소형 유로의 제작과 유동 가시화 실험, 그를 바탕으로 한 시뮬레이션이 그림 8과 9와 같이 수행되었다.

초소형 열유속 센서

열유속(heat flux)은 온도와 함께 열전달에서 경계 조건으로 중요한 요소 가운데 하나이다. 열유속을 측정하는 방법 가운데, circular foil gauge는 1953년 복사 열유속을 측정할 수 있는 방법으로 제안된 것이다(그림 10). 외부에서 열유속이 constantan disk에 닿게 되면, 이는 뒷면의 heat sink로 빠져나가면서 중앙 A와 끝단 B에 온도 차를 발생시키게 되므로, 이 온도차를 이용해 외부에서의 열유속을 구할



그림 12 플레밍의 왼손 법칙

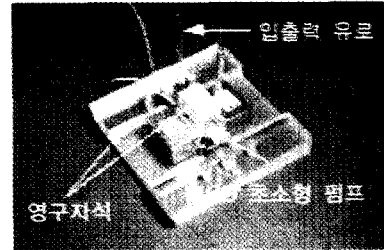


그림 13 최초의 MHD 초소형 펌프

수 있다는 원리이다. 이 구조를 미세가공과 전기도금을 이용해 그림 11(a)와 같이 구현하였고, 더 나아가 SU-8을 이용한 LIGA like 공정을 이용해 표면미세가공[그림 11(b)]으로 구현하였다.

MHD 초소형 펌프

그림 12는 전기장과 자기장이 있는 경우, 제3의 방향으로 로렌츠 힘이 작용한다는 플레밍의 왼손 법칙을 보여주고 있다. 이 원리를 이용해 초소형 펌프를 만들 수 있지 않을까 하는 바람 속에서 미세가공을 이용한 가장 간단한 형상의 초소형 유로를 제작하고, 유로 상하면에 전극을, 좌우면에 자석을 장치해 로렌츠 힘이 생기도록 하였다. 유로 안에 극성을 가진 유체를 넣고 가동시키자, 강한 펌핑 현상을 나타내었다. 이것이 MEMS 기술을 이용한 최초의 MHD 초소형 펌프가 되었다.