

초소형 펌프에 응용 가능한 구동기



양 상 식
(아주대 전자공학부 교수)



김 근 영
(아주대 대학원 전자공학과 석사과정)

1. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical Systems : 초소형 전자 기계 시스템)는 마이크로머시닝 기술로 제작된 시스템을 지칭하는 것으로 1980년대 이후 많은 관심과 연구를 통하여 여러 분야에서 다양하게 응용되고 있다. MEMS는 반도체 제작 공정을 이용하므로 소자를 초소형(수 μm ~ 수백 μm 크기)으로 제작할 수 있고, 일괄 공정에 의한 대량 생산이 가능하다. 또한, 구동기와 센서, 전자 회로 등을 집적하여 신뢰도 높은 시스템을 제작할 수 있다.

표 1은 최근 한 기관에서 조사한 MEMS 소자의 시장 분석 규모이다. 표에서 보는 바와 같이 Bio-MEMS로 대표되는 약물 전달 시스템과 바이오 칩과 같은 초소형 분석시스템 관련 시장의 성장세가 두드러진다. 이와 같은 시스템들은 소량의 유체를 사용하기 때문에 초소형 펌프와 같은 미세 유량 제어 장치의 개발이 요구된다. 이에 따라 미소 유량 제어가 가능한 초소형 펌프의 개발에 관한 연구가 국·내외에서 활발히 진행되고 있다.

초소형 펌프는 그 크기가 수 mm 혹은 수 cm이며, 미소 유량 제어(수 μl ~ 수 pl)가 가능하다. 초소형 펌프는 구동 방식에 따라 정전(electrostatic)형, 압전(piezoelectric)형, 열공압(thermopneumatic)형, 상변화(phase change)형, 전자

표 1. MEMS 상품의 세계시장 규모 (NEXUS task force 조사, 1998)

Products	1996		2002	
	Units (millions)	\$ (millions)	Units (millions)	\$ (millions)
drug delivery systems	1	10	100	1000
optical switches	1	50	40	1000
lab on chip(DNA,HPLC...)	0	0	100	1000
magneto optical heads	0.01	1	100	500
projection valves	0.1	10	1	300
coil on chips	20	10	600	100
micro relays	-	0.	50	100
micromotors	0.1	5	2	80
inclinometers	1	10	20	70
injection nozzles	10	10	30	30
anti collision sensors	0.01	0.5	2	20
electric noses	0.001	0.1	0.05	5
Totals		107		4205

기(electromagnetic)형, 형상 기억 합금(SMA)형, 기포(bubble)형, 전기 삼투/전기 영동(electroosmotic/electrophoretic)형과 EHD(electrohydrodynamic)형 등으로 구분된다. 대부분의 펌프는 박막의 왕복 운동을 이용하여 유

체를 이동시킨다. 그러나 기포형이나 전기 삼투/전기 영동, 그리고 EHD를 이용하는 펌프는 기계적 구동 부분이 없다.

이 글에서는 이러한 초소형 펌프에서 주요 기능을 담당하는 구동기와 그 구동원리에 대한 최근 동향을 소개하고자 한다.

2. 초소형 구동기

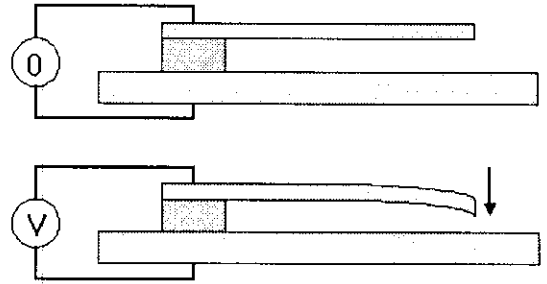
표 2는 구동방식에 따른 초소형 구동기의 장·단점을 비교한 것이다. 박막의 왕복 운동을 이용한 대표적 구동 방식인 정전형과 압전형 구동기는 다른 구동 방식에 비해 빠른 응답 속도를 가지나 높은 구동 전압이 필요하다. 또한, 히터를 이용한 열공압형과 상변화형 구동기는 저전압 구동으로 큰 변위를 얻을 수 있으나 느린 응답속도와 열 발생으로 인한 문제가 있다. 기계적 구동 부분이 없는 기포형, 전기 삼투형과 EHD형은 구조가 간단하지만 유로의 재질과 유체에 제한이 있다.

표 2. 구동 방식에 따른 장·단점 비교

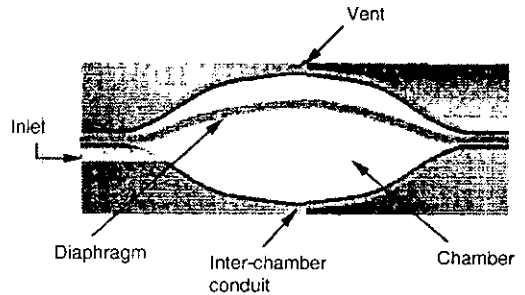
구동 방식	장점	단점
정전형	· 빠른 응답 속도(수 ms)	· 높은 구동전압 (100~200V)
압전형	· 빠른 응답 속도 · 큰 힘	· 작은 변위
열공압형	· 저전압 구동	· 느린 응답 속도(수 sec)
상변화형	· 큰 변위	· 열 발생
전자기형	· 비교적 빠른 응답 · 양방향 구동 가능	· 제작 공정의 복잡성
형상 기억 합금형	· 큰 힘과 큰 변위	· 열 발생 · 느린 응답 속도
기포형	· 구동부가 없음	· 열 발생
전기 삼투형	· 구조가 간단함	· 유로 재질의 제한성
EHD형		· 유체의 제한성

2.1 정전형

정전형은 거시 세계에서는 무시될 정도로 작으나, 미시 세계에서는 에너지 밀도가 큰 정전력을 이용한다. 그림 1은 정전 구동 방식의 가스 펌프와 그 원리도이다. (1) 그림 1의 (a)에서와 같이 간극이 작은 두 전극 사이에 전압을 인가하면 두 전극 사이의 정전력에 의해 가동 전극 박막의 변위가 생긴다. 이를 이용하여 유체를 펌핑하는 방식이다. 정전형은 수 ms의 고속 응답이 가능하지만, 100 V 이상의 고전압으로 구동되는 단점이 있다. 그림 1의 (b)는 하나의 기본 챔버를 나타낸 그림이다. 박막과 상·하부의 전극이 있고, 박막은 캡톤으로 되어 있다. 박막이 밸브 역할을 하기 때문에 펌핑을 하기 위해서는 최소한 챔버 3개가 연동 운동을 하여야 한다. 챔버의 지름은 5



(a)



(b)

그림 1. 정전형 구동기.

(a) 정전 구동 원리 (b) 정전 구동 방식 펌프 챔버 구조

~ 7.5 mm 이고 깊이가 0.1 mm 이며 인가 전압이 75 V 이고, 주파수가 100 Hz 일 때 가스 유량은 8ml/min 정도이다.

2.2 압전형

어떤 종류의 결정체는 특정한 방향으로 힘을 가하여 형태를 찌그러뜨리면 한쪽은 양(+), 반대쪽은 음(-)의 전기가 발생한다. 이것을 피에조(Piezo) 전기 직접 효과 또는 압전 직접 효과라고 한다. 이와는 반대로 그림 2의 (a)와 같이 외부에서 전압을 걸어주면 형태가 변하는 반대현상이 나타나는데 이것을 압전 역효과라고 한다. 여기서 후자의 성질인 압전 역효과를 이용해서 구동기로 사용하게 된다.

압전 세라믹 중에서 PZT(Lead Zirconate Titanate)는 우수한 압전 특성과 강유전성을 가지고 있어 많이 이용되고 있다. PZT세라믹은 티탄산납(PbTiO₃)과 지르코산납(PbZrO₃)을 일정한 비율로 섞은 것으로 사용 용도에 따라 불순물을 첨가하여 여러 가지 물성을 갖는 압전 재료로 사용되고 있다.

이처럼 압전 세라믹은 기계적 에너지와 전기적 에너지의 상호 변환을 가능하게 하는 성질을 갖고 있으므로 변위의 정밀 제어가 요구되는 전자기기 및 정밀기계장치의 변위 트랜스듀

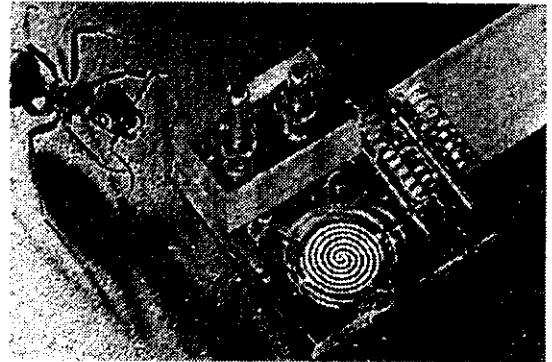
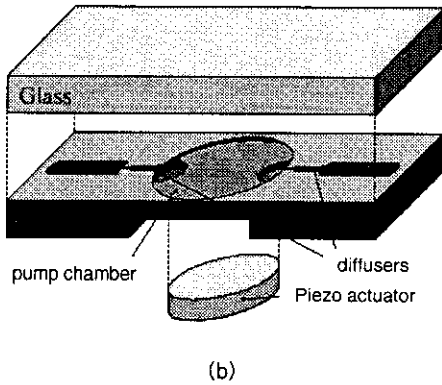
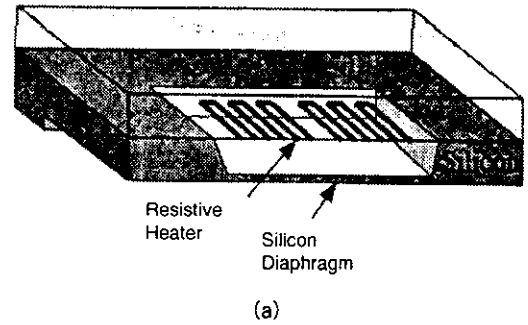
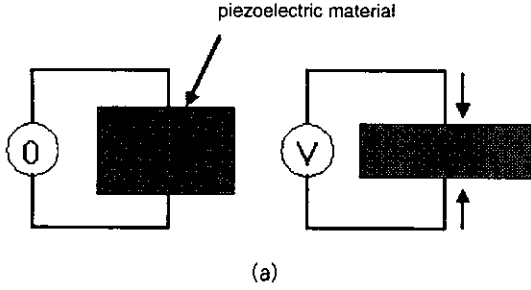


그림 2. 압전형 구동기
(a) 압전 구동 원리 (b) 압전 구동 방식 펌프 구조

그림 3. 열공압 구동기 및 펌프
(a) 열공압 구동기 구조 (b) 열공압 구동 방식 펌프

서(transducer)로서 이용되고 있다. 기존의 전자식 구동기의 주류를 이루는 코일을 이용한 솔레노이드 방식으로는 구현하기 어려운 빠른 응답속도의 실현 및 소형 경량화가 가능하며 소비전력이 작고 전자노이즈의 방해받지 않는다는 장점을 갖고 있다. 압전 세라믹을 이용하는 경우 다른 구동방식에 비하여 큰 힘을 낼 수 있고, 간단한 구조로 제작할 수 있다. 그러나, 비교적 높은 인가 전압이 필요하며 변위가 작은 단점이 있다.

그림 2의 (b)는 디스크 형태의 압전 물질을 이용한 펌프이다. [2] 밸브 대신 노즐·디퓨저를 이용하였다. 펌프 챔버의 지름은 6 mm 이고, 노즐·디퓨저를 이용하였기 때문에 구동 주파수에 따라 양방향 펌핑이 가능하다. 100 V의 구동 전압에서 공기는 545 $\mu\text{/min}$, 물은 30 $\mu\text{/min}$ 의 유량을 보였다.

2.3 열공압형

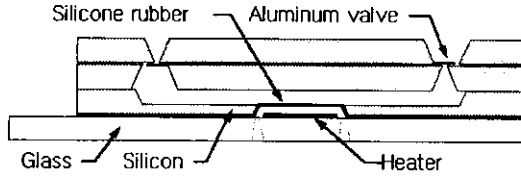
열공압형은 그림 3의 (a)와 같은 초소형 히터에 전압을 인가하여 이 때 발생하는 열로 밀폐된 공동 내의 공기를 팽창시켜 박막을 구동한다. 다른 구동 방식에 비해 구동 전압이 낮고, 구동기의 변위가 큰 장점이 있으나 펌프 자체의 온도가 상승하고 응답 속도가 느린 문제가 있다.

그림 3의 (b)는 열공압 구동기를 채택한 펌프의 사진이다. [3] 펌프의 크기는 $9 \times 10 \text{ mm}^2$ 이고 박막은 polyimide로 되어 있으며 지름은 3.8 mm 이다. 표면 미세 가공 기술로 박막을 제작한 후 주형에 의해 제작된 몸체에 박막을 옮기는 AMANDA라는 공정에 의해 제작되었다. 20 Hz, 14 V에서 평균 소모 전력은 160 mW 일 때 가스 유량은 210 $\mu\text{/min}$ 정도이다. 사진에서 나선 형태의 히터를 볼 수 있다.

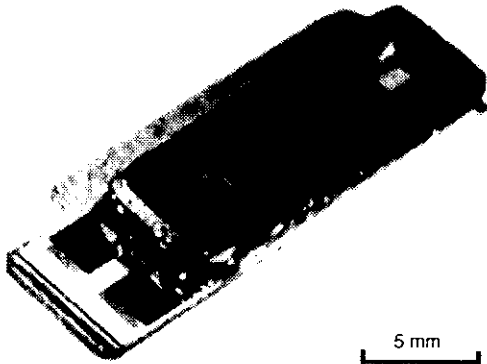
2.4 상변화형

구동 방식은 열공압형과 유사하며 공기 대신 액체를 이용한다. 공동 내 작동 액체를 히터 열로 가열하여 기체로 기화시킨다. 이 때 발생하는 공동 내 부피 팽창을 이용하여 박막을 구동시키는 방법이다. 장·단점은 열공압형과 같으며 상대적으로 온도 상승이 적다.

그림 4는 상변화 펌프의 구조와 사진이다[4]. 펌프의 크기는 $22 \times 6 \times 2 \text{ mm}^3$ 이다. 박막은 큰 변위를 얻기 위해 유연한 재료인 실리콘 러버(silicone rubber)를 사용하였다. 전압과 주파수가 각각 8 V, 2 Hz 인 구형파를 70%의 듀티비로 가했을 때 97 $\mu\text{/min}$ 의 유량을 보였다.

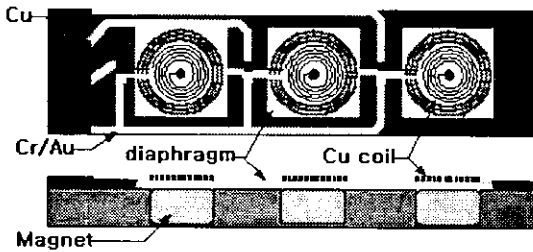


(a)

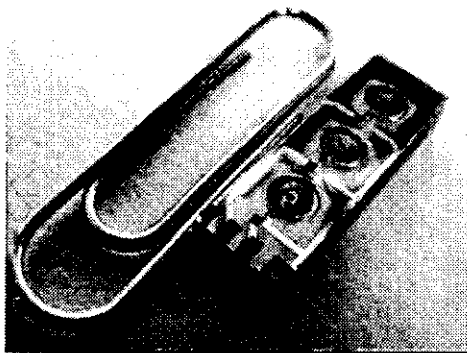


(b)

그림 4. 상변화형 구동기.
(a) 구동기 구조 (b) 상변화형 펌프



(a)



(b)

그림 5. 전자 구동기.
(a) 전자 구동기 구조 (b) 제작된 전자 구동기

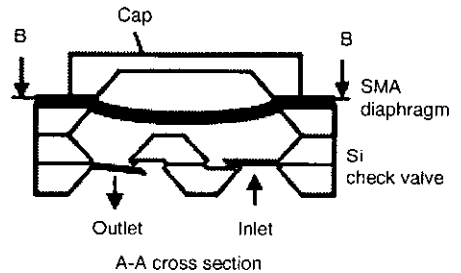
2.5 전자기형

전자기형은 전자석의 원리를 응용한 방식이며, 마이크로 코일과 영구자석을 이용하여 제작한다. 마이크로 코일에 전류를 인가하면 발생하는 전자기력에 의하여 박막이 구동된다. 코일에서 발생하는 열은 상변화형 펌프보다 적으나, 다른 구동 방식에 비하여 제작 공정이 복잡하다.

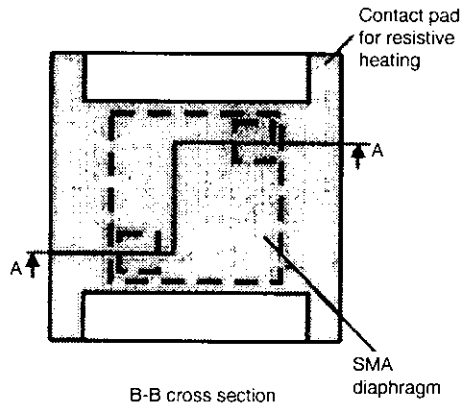
그림 5는 전자 구동기의 구조도와 제작된 사진이다. [5] 전체 크기는 $22 \times 7 \times 2.3 \text{ mm}^3$ 이다. 박막 위쪽에 있는 코일과 아래쪽 자석 사이의 전자기력에 의해 구동된다. 코일에 100 mA의 전류를 흘렸을 때 박막의 변위가 30 μm 로 나타났다. 이 구동기에 밸브 부분을 추가하여 펌프로 이용할 수 있다.

2.6 형상 기억 합금형

형상 기억 합금(SMA : shaped memory alloy)이란, 티탄과 니켈의 합금 등과 같이 어느 온도 이하에서는 작은 힘으로 매우 큰 변형이 일어나고 그것을 고온으로 올리면 큰 힘을 발생시키면서 원래의 모양으로 되돌아가는 성질(형상 기억 효과)을 가진 합금을 말한다. 이러한 재료를 이용하여 구동기를



(a)



(b)

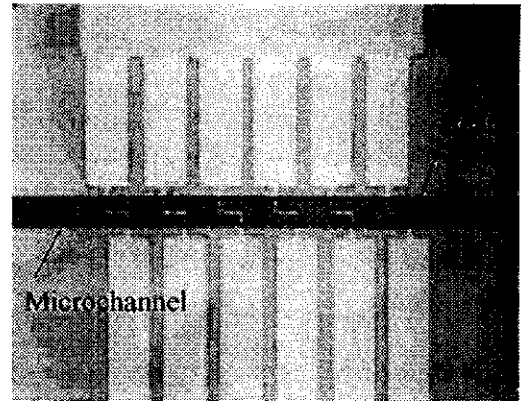
그림 6. 형상 기억 합금 구동기.
(a) 구동기 단면도 (b) 구동기 평면도

제작한다. 이 때문에 압전소자와 같이 구조재료이면서 구동기로서 사용하기 쉽다. 일반적으로 응답 속도가 느리고 일괄 제작 공정에 부적합하지만, 최근 스퍼터링 등의 박막 공정으로 형성 기억 합금 박막을 만들 수 있게 되어 마이크로머시닝 공정과의 적합성도 크게 개선되었다. 또, 소형화하면 무게에 비례해서 열용량이 주는 반면, 표면으로부터의 방열량이 상대적으로 늘기 때문에 보다 빠른 응답이 기대되는 것도 소형화에 적합하다.

그림 6은 형성 기억 합금 박막을 이용한 펌프로 체크 밸브가 있는 일반적인 펌프 형태이다. (6.7) 형성 기억 소재인 TiNi를 플래쉬 증착 공정으로 증착하고, HF/HNO₃/H₂O 용액으로 식각하였다. SMA 박막의 왕복 운동으로 펌핑을 하게 된다. 구동 박막의 지름은 5 mm 이다. 1.7 Hz 로 2 J 의 에너지를 가할 때 1 μl 의 토출량을 보인다.

2.7 기포형

미세 유로 사이에 존재하는 여러 개의 마이크로 히터에 연속적으로 전압을 인가하면 연속적인 기포들이 만들어진다. 이렇게 연속적으로 발생된 기포에 의하여 기포 사이에 존재하는 유체가 이동된다. 이 경우 밸브가 필요없는 구조를 갖게 되어 펌프의 크기를 줄일 수 있으며, 간단한 제조 공정으로 펌프의 제작이 가능하다. 그림 7은 기포형 펌프의 원리와 그 사진을 보여 주고 있다. (8) 채널의 지름은 3.4 μm 이고 길이는 726 μm 이다. 24 V, 2 Hz 입력에 대해 히터의 전력 소모는 58 mW 이고, 유량은 0.5 n l/min 이다. 극미량의 유량 제어 가능하다.

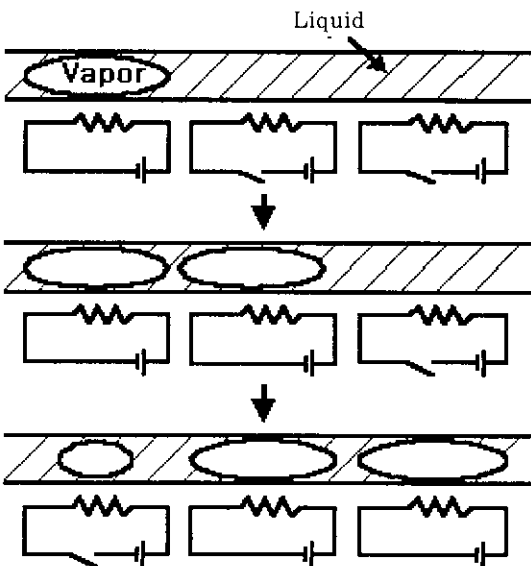


(b)

그림 7. 기포형 구동.
(a) 구동 원리 (b) 기포형 펌프

2.8 전기 삼투/전기 영동형

전기 삼투(electroosmosis)와 전기 영동(electrophoresis)은 전기 유체 역학적인 구동 방식이라고 할 수 있으며, 가동부가 필요 없는 방식이다. 전기 삼투는 음전하로 대전된 모세관 벽에 인접한 양이온에 전기장이 걸려서 발생하게 되는 유체의 흐름이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 용융 실리카(fused silica) 표면의 실라놀 기(silanol groups)가 pH 2 이상이 되는 용액을 만나면 SiOH SiO⁻ + H⁺ 로 분리가 되어 표면이 음전하를 띠게 되고 모세관 벽 근처의 용액은 양전하를 띠게 되어 전기장이 걸리면 양이온들이 음극으로 이동하면서 유체가 흐르게 된다. 전기 영동은 용액 속의 대전된 입자들이 전기장 내에서 질량 대 전하비에 따라 이동하는 것



(a)

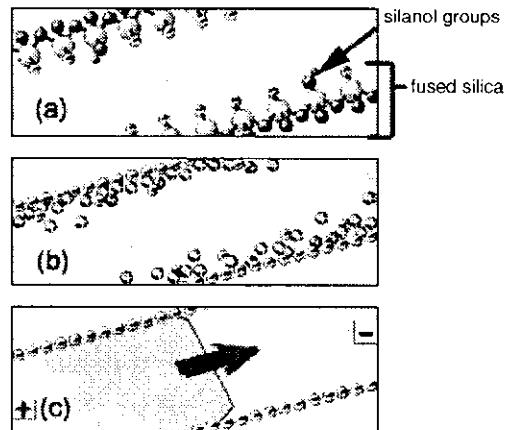


그림 8. 전기 삼투의 원리.

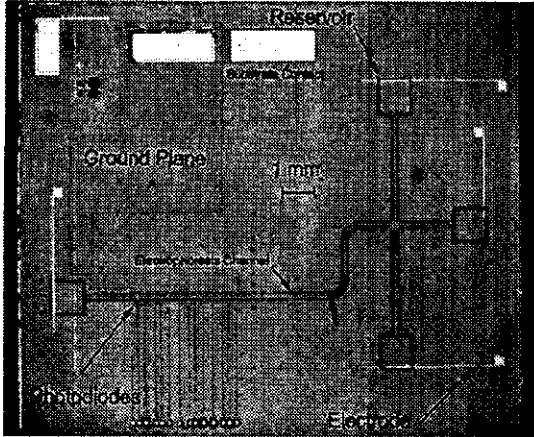


그림 9. 전기 삼투/영동형 펌프

을 말한다. 전기 삼투형 및 전기 영동형은 구동부가 필요 없는 장점으로 인하여 최근 생물학, 화학, 유전학적인 각종 장치의 미세 유량 제어에 활발히 응용되고 있다. 특히 전기 영동형은 미량의 시료내에서 입자들을 분리하는데 이용되고 있다.

그림 9는 DNA 분리를 위한 칩으로서 전기 삼투와 전기 영동으로 유체를 이동시키고 시료를 분리한다(9). 시료 분리 채널의 길이는 0.9 cm 이고, 채널에 걸린 전기장은 110 V/cm 이다.

2.9 EHD(ElectroHydroDynamic)형

EHD 펌프는 전장과 유체 속에 유도된 전하들간의 상호작용으로 구동되며 전기력이 유체에 직접 작용하기 때문에 전기 삼투와 같이 기계적 구동부가 필요없다는 이점이 있다. EHD 펌프에는 유도형(induction type)과 주입형(injection type)이 있다.(10) 그림 10의 (a)는 주입형 EHD 펌프를 보여준다. 주입형 EHD 펌프에서 원동력은 전기 화학적 반응에 의하여 한 쪽 혹은 양 쪽 전극으로부터 액체로 주입되는 이온에 작용하는 쿨롱 힘이다. 주입형 EHD 펌프는 펌핑할 유체와 직접 닿아 있는 두 개의 투과성 전극이 필요하다. 전극 사이에서 일어나는 압력의 변화가 유체를 이동시킨다. 그림 10의 (b)는 유도형 EHD 구동 원리를 나타내는 그림이다. 유도형 EHD 펌프는 유체-유체 또는 유체-고체 경계면에 수직으로 작용하므로 유도전하를 유체의 흐름 방향으로 밀고 당기기 위한 전기적 진행파(traveling electric wave)가 필요하다. 이 방식은 전기 전도성이 없는 액체에 사용할 수 있다. 그림 10의 (c)는 EHD 방식의 펌프이다.(11) 채널은 깊이가 100 μm, 폭이 3 mm, 길이가 30 mm 이다. 유량은 DC 60 V 일 때, 10 μl/min 정도이다.

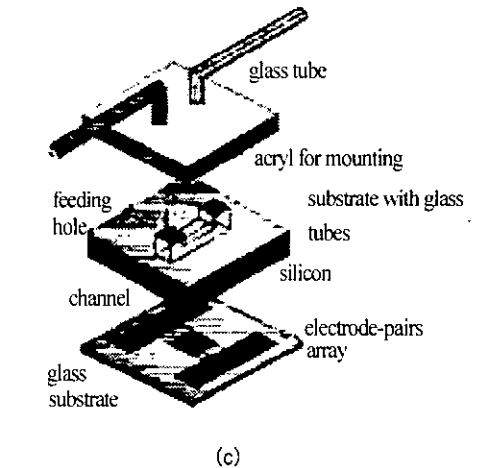
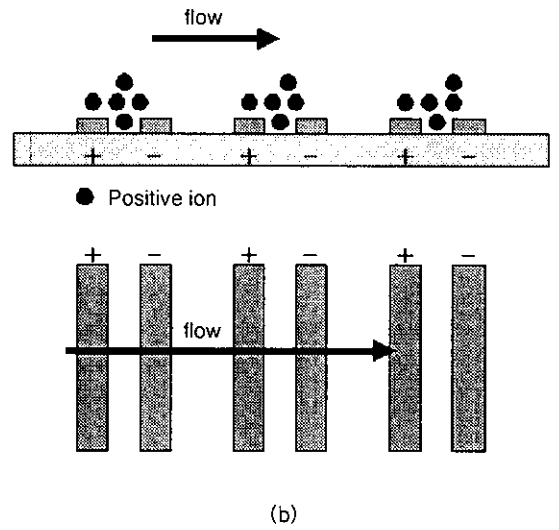
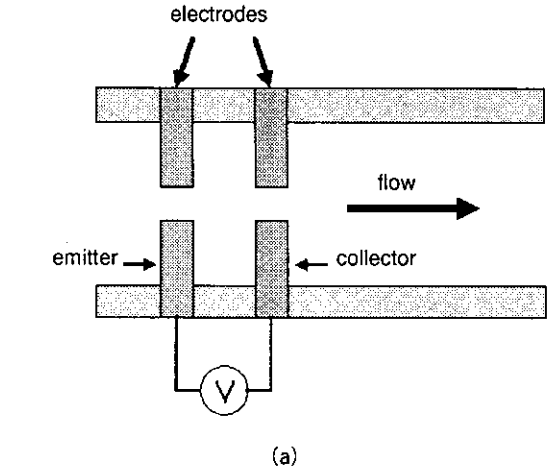


그림 10. EHD 구동 (a) 주입형 EHD 펌프 (b) 유도형 EHD 구동원리 (c) 유도형 EHD 펌프

3. 결 론

위에서 펌프에 응용 가능한 여러 가지 구동 방식에 대해서 간략히 알아보았다. 유체 소자에 있어서 중요한 부분을 차지하고 있으며, 사용 용도에 따라 그 특징 및 사양이 다르므로 다양한 형태의 펌프가 개발되고 있다. 앞에서도 언급했듯이 초소형 유체 소자의 시장성은 상당히 큰 것으로 알려져 있다. 이에 따라 세계적으로 구동기와 펌프에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 국내에서도 더욱 많은 지원과 인력으로 연구가 이루어지기를 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] Cleopatra Cabuz et al., "Mesoscopic Sampler Based on 3D Array of Electro- statically Activated Diaphragm," Proc. Transducers '99, pp. 1890~1893, 1999.
- [2] Wouter van der Wijngaart et al., "The First Self-Priming and Bi-Directional Valve-less Diffuser Micropump for both liquid and gas," Proc. IEEE MEMS 2000, pp. 674~679, 2000.
- [3] W. K. Schomburg et al., "AMANDA- surface micromachining, molding, and diaphragm transfer," Sensors and Actuators, A76, pp. 343~348, 1999.
- [4] 심우영, 이상우, 양상식, "상변화 구동방식 마이크로 펌프의 제작 및 시험," 대한전기학회 논문지, 49C권 6호, pp. 360~366, 2000.
- [5] K. H. Kim, S. S. Yang, "Fabrication and test of an electromagnetic micro actuator with a planar coil on a parylene diaphragm," Proc. MEMS, ASME, pp. 281~286, 2000.
- [6] E. Makino et al., "Dynamic thermo- mechanical properties of evaporated TiNi shape memory thin film," Sensors and Actuators, A78, pp. 163~167, 1999.
- [7] E. Makino et al., "Micromachining of TiNi shape memory thin film for fabrication of micropump," Sensors and Actuators, A 79, pp. 251~259, 2000.
- [8] Thomas K. Jun et al., "Microscale Pumping with Traversing Bubbles in Microchannels," J. Applied Physics, vol. 83, No. 11, pp. 5658~5664, 1998.
- [9] J. R. Webster et al., "Electrophoresis System

with integrated on Chip Fluorescence Detection," Proc. IEEE MEMS 2000, pp. 306~310, 2000.

- [10] Gregory T. A. Kovacs, "Micromachined Transducers source book," McGraw- Hill.⁽¹¹⁾ Si-hong Ahn et al., "Fabrication and experiment of a planar micro ion drag pump," Sensors and Actuators, A70, pp. 1~5, 1998.

저 자 약 력

성명 : 양상식

❖학력

1980년 서울대 기계공학과 학사

1983년 서울대 대학원 기계공학과 석사

1988년 University of California, Berkely
기계공학과 박사

❖경력

1988년~1989년 New Jersey Institute of Technology
1989년 11월~현재 아주대 전자공학부 교수

성명 : 김근영

❖학력

1999년 아주대 전자공학부 학사

현재 아주대 대학원 전자공학과 석사과정