

마이크로펌프의 제작 및 응용

이 상 우, 양 상 식

아주대학교 전자공학부

1. 서론

마이크로머시닝 기술을 이용한 Microelectromechanical System(MEMS)은 1980년대 후반부터 발전하기 시작하여 각종 센서와 구동기들이 개발되었다. 특히 마이크로펌프는 그 크기가 수 cm 혹은 수 mm로서 화학물 분석 시스템이나 세포 융합 시스템, 약물 전달기 등 생물학, 화학 및 의공학 분야에의 넓은 응용 가능성을 보여 주고 있다. 이에 따라 미소 유량 제어가 가능한 마이크로펌프의 개발에 관한 연구가 활발하다. 이 글에서는 최근까지 연구된 마이크로펌프의 종류를 살펴보고 각각의 구조와 특성을 소개한다. 또한 마이크로펌프 제작 및 응용 예로서 pH 박막을 갖는 열공압형 마이크로펌프와 비등 및 전기분해 구동형 초소형 주사기에 대하여 기술한다.

2. 마이크로펌프의 종류

마이크로펌프는 크게 운동방식 및 구조와 구동방식에 따라 분류할 수 있다. 운동방식에 따라 유체를 펌핑하는 구동방식이 구별된다. 박막의 왕복운동에 의해 구동되는 펌프는 두 개의 밸브나 노즐/디퓨저를 갖는 형태가 있으며 연동운동에 의해 구동되는 펌프는 3개 이상의 박막을 갖는다. 전극과 유로만으로 구성되어 움직이는 부분이 없는 펌프도 있다. 운동부가 있는 펌프의 구동방식에는 정전형, 압전형, 열공압형, 전자기, 자기변형, 비등형 등이 있고 운동부가 없는 펌프의 구동방식에는 버블젯 및 EHD, 전기영동, 전기침투 등이 있다. 표 1은 마이크로펌프를 운동방식 및 구조, 구동원리에 따라 분류한 것이다.

표 1. 운동방식 및 구조, 구동원리에 따른 분류.

구동부 운동방식	구조	구동방식
왕복운동	1 개의 박막 + 2 개의 밸브 1 개의 박막 + Nozzle/diffuser	정전, 압전, 전자기, 자기변형, 열변형, 열공압, 비등, 전기분해, SMA, 광구동
연동운동	3 개 이상의 박막	
고 정	전극과 유로	Bubble jet, EHD, Electrophoresis, Electroosmosis

2.1 정전형 펌프

정전형 펌프는 두 평행판 사이에 전압을 인가하여 두 평행판이 서로 밀고 잡아당기는 힘을 이용한다. 그림 1은 정전형 펌프의 단면도이다[1]. 구동부(actuation unit)는 대응전극(counter electrode)과 마주보는 박막 칩으로 구성되어 있다. 두 개의 동일한 밸브 칩이 합쳐져서 수동형 체크 밸브를 이루고, 박막과 두 밸브 사이의 공간이 펌프 챔버가 된다. 인가전압 200 V에서 최대 850 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량을 보여준다. 정전형 펌프는 수 ms의 고속응답의 구동이 가능하지만 100 V 이상의 고전압으로 구동되는 문제를 갖는다.

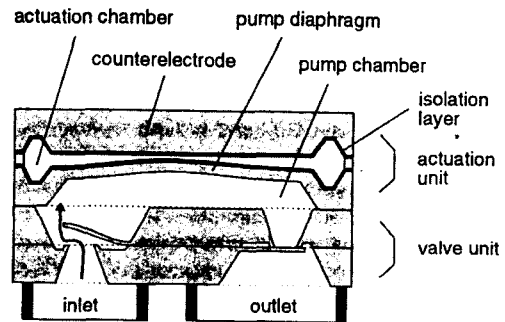


그림 1. 정전형 펌프의 단면도

2.2 압전형 펌프

압전형 펌프는 압전 세라믹의 전왜효과를 구동원리로 하여 구동된다. 그림 2는 압전 펌프의 단면도이다[2]. 실리콘 박막에 접합된 압전 원판(disk)과 두 개의 외팔보형 밸브로 이루어진다. 물의 경우 최대 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량을 보여준다. 압전형 펌프는 다른 구동 방식보다 상대적으로

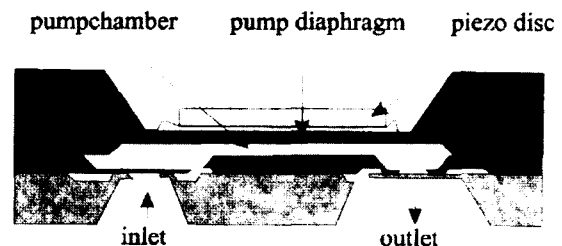


그림 2. 압전형 펌프의 단면도

큰 힘을 낼 수 있고, 보다 간단한 구조로 이루어지지만 높은 인가 전압을 필요로 한다.

2.3 열공압형 펌프

열공압 펌프는 마이크로히터에 전압을 인가하여 히터의 온도가 증가함에 따라 공동 내의 공기가 팽창함으로써 박막이 휘어지는 원리를 이용하여 구동된다. 그림 3은 열공압형 펌프의 단면도이다[3]. 이 펌프는 히터 전극을 갖는 챔버와 두 개의 체크 밸브로 이루어진다. 2 W의 전력에 대해 최대 60 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량을 보여준다. 열공압형 펌프는 펌프 구동 중 펌프 내에 발생하는 열로 인해 펌프 자체의 온도가 상승하는 문제가 있지만 비교적 다른 구동 방식에 비해 구동 전압이 낮고, 구동기의 변위가 큰 장점이 있다.

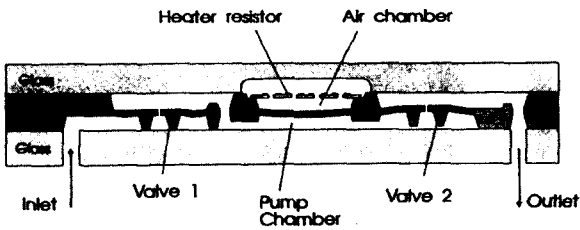
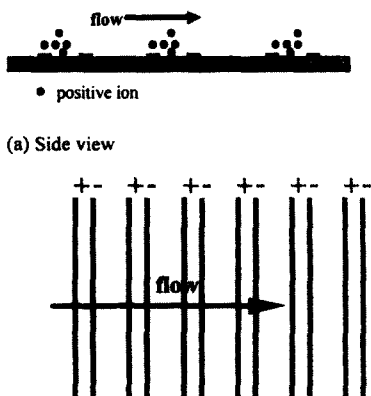


그림 3. 열공압형 펌프의 단면도

2.4 EHD 펌프

EHD 펌프는 전장과 유체 속에 유도된 전하들간의 상호작용으로 구동되며 전기력이 유체에 직접 작용하기 때문에 기계적 운동부가 필요 없다는 이점이 있다. EHD 펌프에는 유도형(induction type)과 주입형(injection type)이 있다. EHD 유도형 펌프는 많이 연구되는 형태로서, distribution transformer의 냉각에 쓰이는 절연 유체나 지하 전력 케이블 내의 오일 등을 위한 large scale 펌프와 같이 상업 용에 직접 적용될 수 있다. 이들 펌프는 유체-유체 또는 유체-고체 경계면에 수직으로 작용하므로 유도전하를 유



(b) Top view

그림 4. 유도형 EHD 펌프

체의 흐름 방향으로 밀고 당기기 위한 진행 전파(traveling electric wave)가 필요하다. 그림 4는 유도형 EHD 펌프를 보여준다[4]. 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 압력의 변화가 발생하고 이미터와 컬렉터 사이에 유체 이동이 생긴다. 그림 5는 주입형 EHD 펌프를 보여준다[5].

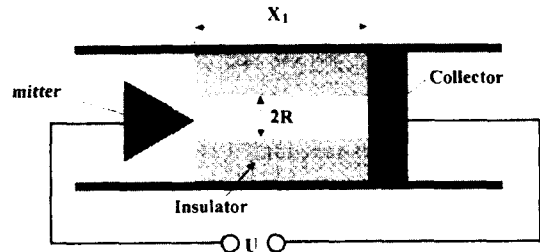


그림 5. 주입형 EHD 펌프

2.5 버블 제트

버블 제트 잉크 제트 프린터 헤드에 사용되고 있다. 노즐의 근처에 배치된 히터에서 발생한 열로 인하여 잉크에 버블이 생성되고 이 압력으로 인하여 주사 액체를 분사한다. 그림 6은 비등 방식을 이용한 잉크제트 헤드의 구동과정을 보여준다[6].

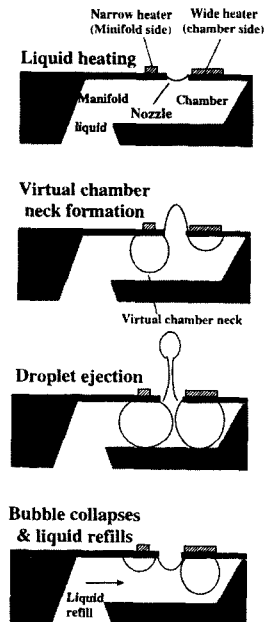


그림 6. 비등 방식 펌프

3. 마이크로펌프의 제작 및 응용 예

최근 화학물 분석 시스템이나 의학용 분야에서 응용 가능한 마이크로펌프들이 제작되고 있다. 이 절에서는 그 중 pH 박막을 갖는 열공압형 펌프와 비등 및 전기분해를

구동원리로 이용한 초소형 주사기의 제작 예를 살펴본다.

3.1 열공압형 마이크로펌프의 제작 예

열공압형 마이크로펌프의 구동부인 박막은 여러 가지 방법으로 제작할 수 있는데 여기에서는 p+ 실리콘으로 제작한 열공압형 펌프의 제작 예를 보인다[7][8].

3.1.1 구조 및 동작원리

그림 7은 열공압형 마이크로펌프의 구조를 보여준다. 상부가 마이크로 구동기이고 하부는 노즐·디퓨저이다. 열공압형 구동기는 식각 정지법에 의하여 제작되는 편평한 p+ 실리콘 박막과 파이렉스 유리에 증착된 알루미늄 미세히터로 구성된다.

알루미늄 히터에 전압이 인가되면 히터의 온도가 증가함에 따라 공동 내의 공기가 팽창함으로써 박막이 휘게 되며 펌프 챔버 내부의 부피가 줄고 압력이 상승하며 유체가 디퓨저와 노즐 밖으로 유출된다. 그리고 인가된 전압이 끊어지면 공동내 공기의 온도가 하강하고 팽창했던 박막이 복귀하며 챔버내에 유체가 유입된다. 이때 노즐과 디퓨저는 양쪽 방향의 유량이 다르다. 따라서 구동기의 작동을 반복하면 순방향(입구에서 출구 쪽)으로 순(net)유량이 생긴다.

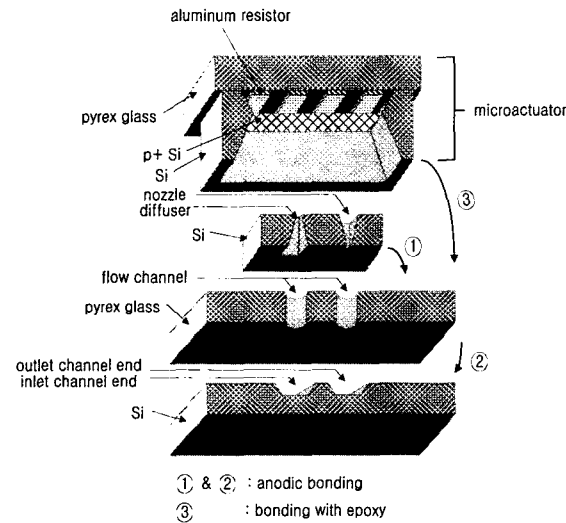


그림 7. p+ 막을 갖는 열공압형 펌프의 구조

3.1.2 제작 공정

그림 8은 편평한 박막을 갖는 열공압형 구동기의 제작 공정을 보여준다. 먼저 앞면에 박막의 진동공간을 형성하기 위하여 25% KOH 수용액을 사용하여 80°C에서 10 μm 깊이로 식각한다. 그 다음 앞면에 붕소를 고농도로 도핑하기 위하여 확산원 BN1100을 이용하여 1100°C에서 600분간 산화산을 행하고, 900°C에서 20분 동안 저온산화 공정을 한 후 HF로 BSG(borosilicate glass)를 제거한다. 후산화는 1000°C에서 습식으로 80분간 행한다. n형 웨이퍼의 붕소 농도가 $8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 이상이면 이방성 식각용액인 EPW (Ethylendiamine : Pyrocatechol : DI Water = 375

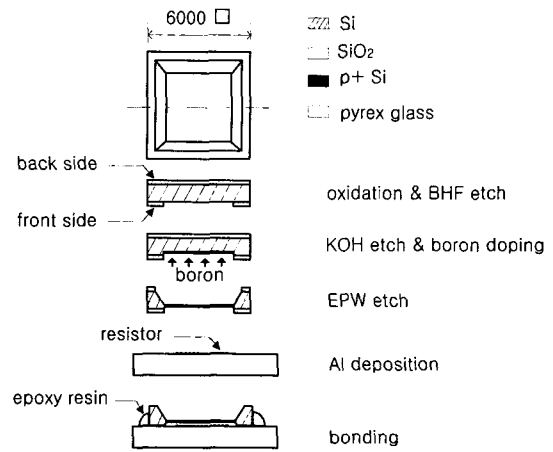


그림 8. 제작 공정도



그림 9. 제작된 편평한 박막을 갖는 구동기 사진

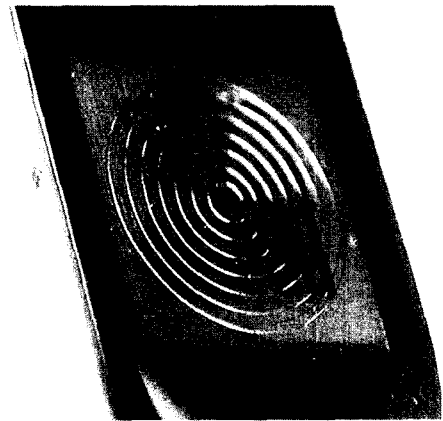


그림 10. 제작된 주름진 박막을 갖는 구동기 사진

ml : 60 g : 120 ml)에 의한 식각율이 1/100 이하로 감소하는 성질을 이용하여 p+ 박막을 제작한다. 뒷면 EPW 식각 공정을 약 7시간 30분 동안 수행하여 두께 2 μm인 p+ 박막을 제작한다. 마지막으로, 파이렉스 유리에 알루미늄을 증착하고 저항을 제작한 후, 박막이 제작된 실리콘 웨이퍼와 에폭시 수지를 이용하여 접합함으로써 열공압형 구동기를 완성한다. 주름진 박막을 갖는 구동기의 경우, 우선 비등방 식각을 통하여 5 μm 깊이의 박막 진동 공간을 만들고 이 식각된 면에 주름의 깊이가 10 μm인 주름진

형태의 구조를 제작한다. 그 다음 붕소 도핑으로 p+ 식각 정지층을 형성한 후 뒷면 식각을 통하여 주름진 박막을 제작한다. 그림 9와 10은 제작된 편평한 p+ 박막과 주름진 p+ 박막을 갖는 마이크로 구동기의 확대사진이다.

3.1.3 특성시험

구동기의 온도에 대한 응답 성능을 시험하기 위해 마이크로 히터에 20 V의 계단 전압을 10 초간 인가한 후 전압을 끊었을 때의 박막의 움직임을 측정하였다. 그림 11은 측정된 편평한 박막의 변위 응답이고 박막의 상승응답 시상수가 하강응답 시상수에 비해 큼을 알 수 있다. 그림

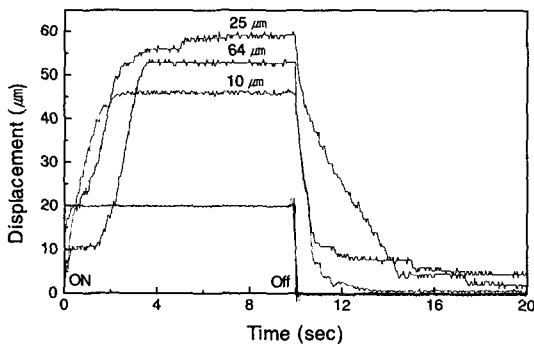


그림 11. 편평한 박막의 10 초간 전압 인가에 대한 변위 응답.

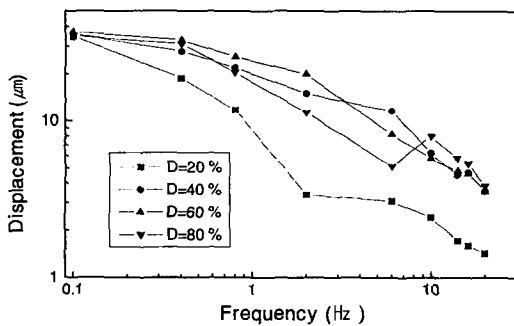


그림 12. 편평한 박막에 대한 인가전압이 20 V일 때 듀티비에 따른 박막 변위의 주파수응답.

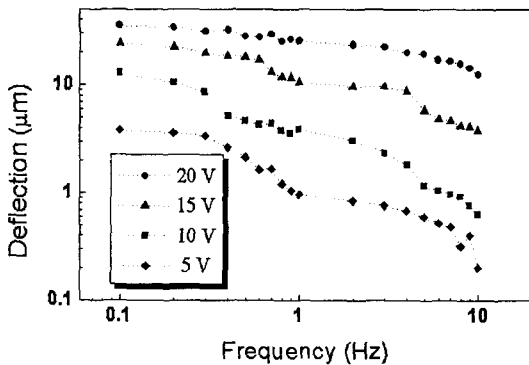


그림 13. 주름진 박막에 대한 듀티비 40 %일 때 다양한 인가 전압에 따른 박막 변위의 주파수응답.

12는 편평한 박막일 때 20 V 구형과 전압에 대해 듀티비를 변화시키며 박막의 변위를 측정한 결과이다. 측정된 주파수 대역에서 전체적으로 듀티비가 20 %일 때 변위가 작고, 60 %일 때 변위가 큼을 알 수 있다. 그림 13은 듀티비가 40 % 일 때 주름진 박막의 전압에 대한 주파수 응답이다.

그림 14는 두 가지 박막의 경우에 대하여 주파수에 대한 유량비로서 비디오 레코더의 정지 영상으로부터 유량비의 변화를 측정하였다. 편평한 박막일 때 최대 유량비는 4.3 $\mu\text{l}/\text{min}$ 이고 주름진 박막의 경우 14 $\mu\text{l}/\text{min}$ 이었다.

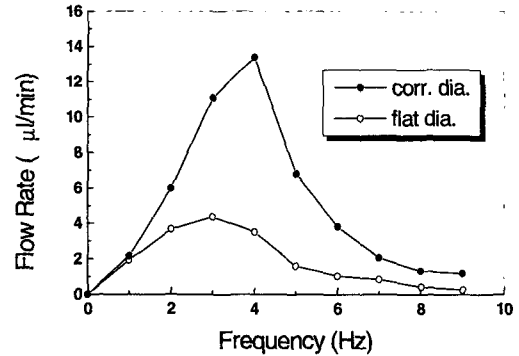


그림 14. 두 가지 박막에 대한 10 V인가전압, 40 % 듀티비일 때 측정된 유량비.

3.2 초소형 주사기의 제작 예

초소형 혈관 내시경을 이용한 의료 진단 및 수술시 혈관 내에서 미량의 약품을 정량적으로 주사할 수 있는 초소형 주사기의 제작 예를 보인다.

3.2.1 구조 및 구동원리

초소형 주사기는 그림 15의 (a)에서 보는 바와 같이 두 장의 유리판과 한 장의 실리콘 웨이퍼가 접합된 구조로 이루어진다. 실리콘 러버 막 하부의 공동은 비등 및 전기분해가 이루어질 전해액으로 채워지고 상부의 공동에는

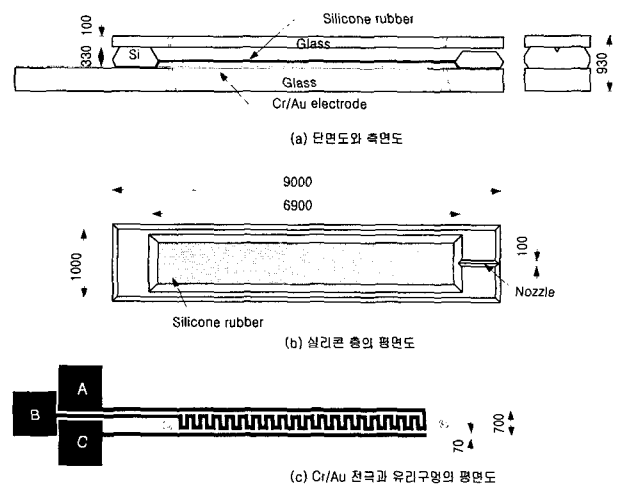


그림 15. 초소형 주사기의 구조

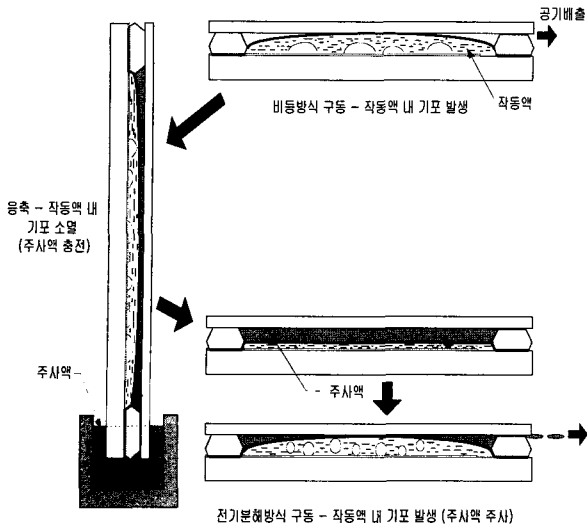


그림 16. 주사기의 작동방법.

주사될 주사액이 채워진다. 그림 15의 (b)는 큰 변위를 낼 수 있는 실리콘 러버 박막이 부착된 실리콘 층의 평면도이고, 그림 15의 (c)는 비등 방식 및 전기분해 방식 구동이 가능하도록 설계된 금속 전극의 평면도이다. 주사기의 구동에는 비등 방식과 전기분해 방식이 혼합되어 사용되는데, 비등 방식으로는 구동기에 제작된 노즐을 통하여 저수조 내로 주사액을 충전시키고 전기분해 방식으로는 주사액을 분사시킨다. 그림 16은 주사기의 작동 방법을 보여준다. 우선 비등 구동으로 작동액내에 기포를 발생하여 실리콘러버 박막을 팽창시켜 주사액이 담긴 수조에 담긴 후 전원을 차단하여 작동액 내 기포를 소멸시키면서 주사액을 충전한다. 이후 전기분해 구동에 의하여 작동액내에 기포를 발생시켜 주사액을 주사한다.

3.2.2 제작공정

그림 17은 초소형 주사기의 제작 공정도이다. 그림 17 (a)의 전극용 기판은 두께 500 μm 인 파이렉스 유리판 (Corning #7740)이고, 그 위에 Cr/Au를 증착한 후 사진 식각 공정을 통하여 그림 15의 (c)와 같은 형태의 전극을 제작하고 전해액을 주입하기 위한 구멍을 전기화학 방전 가공 (EDM, Electro-Chemical Discharge Machining)[10]으로 제작한다. 구동기 박막의 제작에 사용된 웨이퍼는 두께가 $330 \pm 10 \mu\text{m}$ 인 4 inch n형 <100> 실리콘 웨이퍼이다. 주사기의 구동기 박막은 높은 신축성과 접착력을 가진 실리콘 러버 (Shin-Etsu KE 1800)를 사용한다. 전극과 구동기 박막 사이에 작동 액체가 주입되는 공간을 형성하기 위하여 그림 17 (b)와 같이 웨이퍼의 앞면에 사진 식각 공정과 이방성 식각을 통하여 130 μm 깊이의 공간을 만든다. 구동기 박막인 실리콘 러버 막을 형성하기 위해 먼저 p+ 박막 제작 공정을 수행한다. 그림 17 (c)에서 고체 확산원, BN1100을 이용하여 고농도 붕소 층을 제작한다. 이 웨이퍼의 뒷면을 그림 17 (d)와 같이 이방성 식각액으로 220 분간 식각하여 두께 2 μm 인 p+ 박막을 제작한다.

이 때 주사기의 노즐도 동시에 제작되는데, 노즐의 단면은 V자 형의 홈 모양이고 그 폭과 깊이가 각각 100 μm 와 70 μm 이다. 유로를 갖는 주사기의 경우, 이 식각 공정을 통하여 깊이가 200 μm 인 유로가 동시에 제작된다. 제작된 p+ 박막 위에 그림 17 (e)와 같이 실리콘 러버를 5700 rpm으로 60 초간 스핀 코팅한다. 코팅된 실리콘 러버는 비접촉 단차 측정기로 3 개의 샘플을 측정할 결과 $30 \pm 5 \mu\text{m}$ 의 균일한 두께를 갖는다. 이 실리콘 기판과 전극이 제작된 파이렉스 유리판을 그림 17 (f)와 같이 실리콘 러버의 접착력을 이용하여 접착한 후 상온에서 6 시간동안 경화시킨다. 그림 17 (g)에서는 완전히 접착된 실리콘 기판과 파이렉스 유리판을 3 분간 등방성 식각액(질산 : 초산 : 불산 = 85ml : 10ml : 5ml)으로 처리하여 p+ 막을 제거함으로써 30 μm 두께의 실리콘 러버 막을 갖는 구동기를 완성한다. 두께 100 μm 인 커버 글래스(knittel)에 에폭시 수지 (CIBA-GEIGY)를 5700 rpm으로 30 초 동안 스핀 코팅한다. 이 커버 글래스와 제작된 구동기를 접착하여 그림 17 (i)와 같은 주사기를 완성한다. 그림 18은 커버 글래스와 접합하기 전의 구동기의 사진이다.

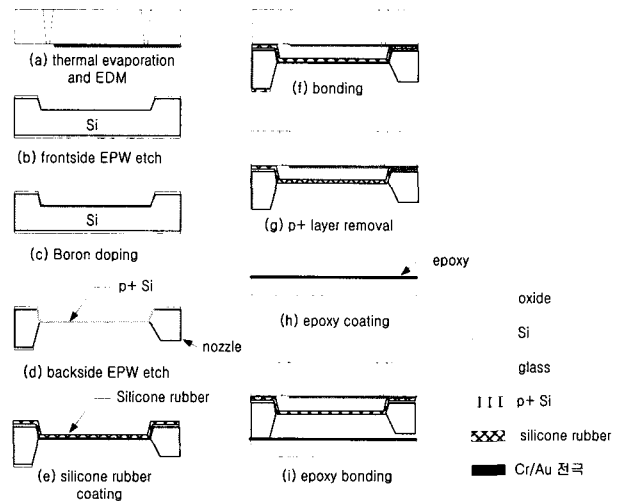


그림 17. 주사기의 제작공정.



그림 18. 제작된 구동기와 직경 0.5mm 스프링의 비교

3.2.3 성능 시험

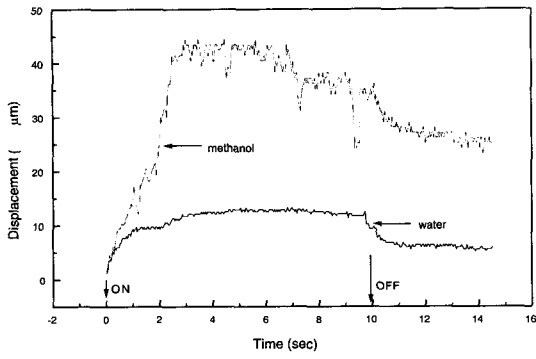


그림 19. 물과 메탄올에 대한 비등 구동방식의 변위.

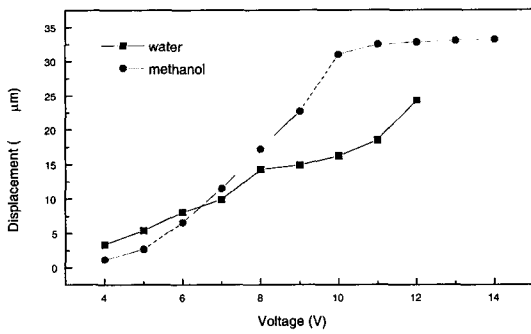


그림 20. 물과 메탄올에 대한 비등 구동방식의 변위.

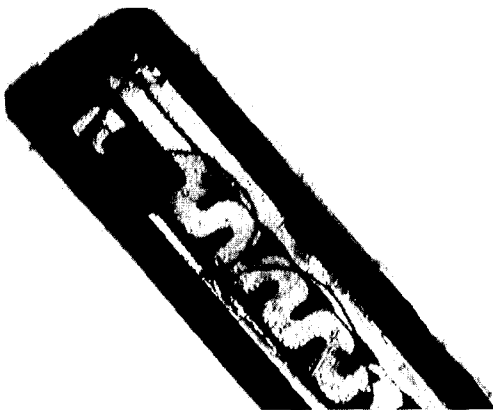


그림 21. 물의 전기분해에 의한 기포 발생 사진.

그림 19는 구동기 챔버내에 물과 메탄올을 각각 충전한 후 비등방식으로 10 V 인가 전압에 대한 박막 중심의 변위를 보여주고 있다. 물의 경우는 전압 인가 후 5 초 정도에서 정상상태에 도달하게 되는데, 이 때의 최대 변위는 약 14 μm 이다. 메탄올의 경우 7 초 정도의 상승시간 후 최대 43 μm 의 변위를 보여준다. 그림 20은 두 가지 액체에 대하여 인가전압을 달리할 때 전압 인가 10초 후에 박막 중심의 변위를 측정된 것이다.

그림 21은 전극에 6 V 직류전압을 인가했을 때 물의 전기분해로 발생된 기포가 투명한 박막을 통하여 보이는 사진이다. 그림 22는 물의 전기분해 구동시 박막의 중심

변위를 보여준다. 인가 전압이 5 V일 때는 3 초 정도의 상승 시간 후 42 μm 의 정상상태 변위를 나타내고, 10 V일 때는 3 초의 상승 시간 후 약 68 μm 의 정상상태 변위를 나타낸다. 그림 23은 10 V의 전압을 인가한지 8 초 후 물의 전기분해에 의하여 주사액이 주사되는 사진이다. 그림 24는 인가 전압이 10 V일 때, 물과 염화나트륨 수용액의 전기분해에 의한 주사량을 보여준다. 그림에서 염화나트륨 수용액의 경우 (1)과 (2)는 각기 다른 실험 결과로서

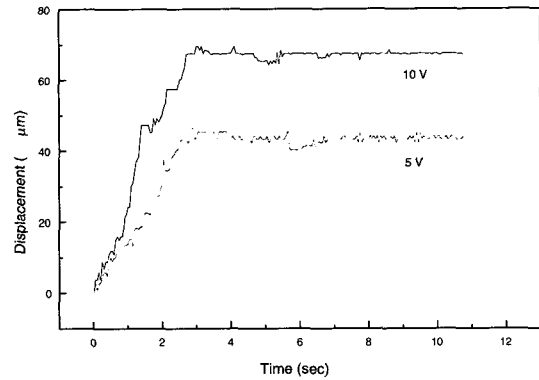


그림 22. 물의 전기분해 구동시 박막의 중심변위.

유량 시험용 유로

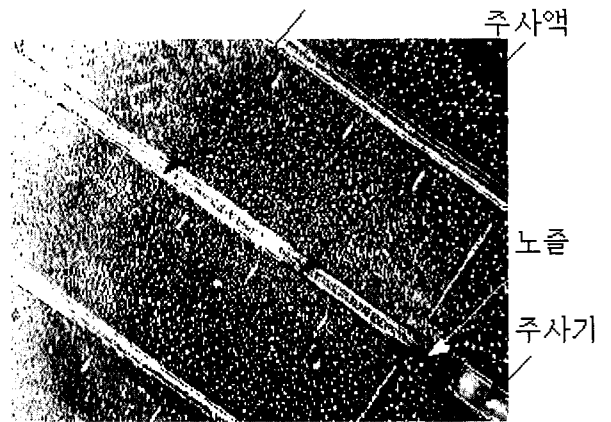


그림 23. 10 V 전압인가 8 초 후 물의 전기분해에 의한 주사량 시험 사진.

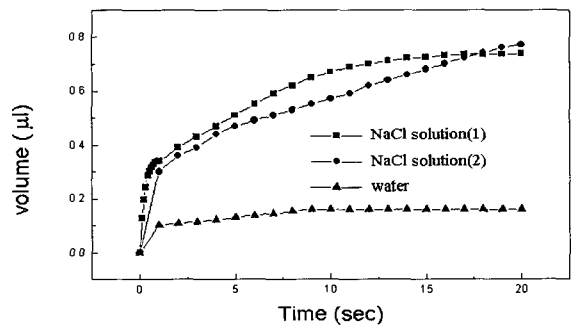


그림 24. 물과 염화나트륨 수용액의 전기분해에 의한 주사기의 주사량 곡선(1)과 (2)는 각기 다른 실험 결과임.

주사량의 재현성을 보여준다. 두 작동액의 경우 모두 1 초까지는 고속으로 액체가 주사되고, 1 초 후에는 저속으로 주사됨을 보여준다. 물의 전기분해시 총 주사량은 20 초 후 0.16 μl 이고 염화나트륨 수용액의 전기분해시 총 주사량은 20 초 후 0.74 μl 이다. 염화나트륨 수용액 전기분해의 경우, 노즐에서의 평균 유속은 0 ~ 1 초 사이에서는 약 0.1 m/s이고 1 ~ 20 초 사이에는 약 0.006 m/s이다.

4. 결론

마이크로펌프에는 여러 가지 종류가 있으며 각각의 마이크로펌프는 그 구동 방식에 따라 성능과 특징이 다르다. 2 장에서는 그 대표적인 구동방식과 특징을 살펴보았다. 마이크로펌프의 사용목적과 조건에 따라 구동방식을 선택하고 그 구조를 적절히 설계한다면 화학, 생물학, 의학 분야에서 널리 응용될 수 있다. 3 장에서는 저자의 실험실에서 제작된 마이크로펌프 및 주사기를 소개하였다. 열공압형 마이크로펌프는 화학물 분석시스템에서 화학물을 미세 유량으로 공급하는 펌프로 사용할 수 있고, 초소형 주사기는 혈관 내시경을 통해 삽입되어 미량의 주사액을 국소 부위에 주사할 수 있음을 보여 주었다.

이러한 마이크로펌프의 개발은 지금도 국내외에서 진행 중이며 미세 유량 제어 장치 및 미생물 조작 장치 분야의 발전에 기여하리라 기대된다.

참고문헌

- [1] R. Zengerle, S. Kluge, M. Richter and A. Richter, "A Bidirectional Silicon Micro Pump," Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop, Amsterdam, Netherlands, Jan. 29 - Feb. 2, pp. 19-24, 1995.
- [2] R. Linnemann, P. Woias, C.-D. Senfft, and J. A. Ditteric, "A Self-priming and Bubble-tolerant Piezoelectric Silicon Micropump for Liquids and Gases," Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop, Heidelberg, Germany, Jan. 25-29, pp. 532-537, 1998.
- [3] T. S. J. Lammerink, V.L. Spiering, M. Elwenspoek and J. H. J. Fluitman and A. van den Berg, "Modular Concept for Fluid Handling System," Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop, San Diego, California, U.S.A., Feb. 11-15, pp. 389-394, 1996.
- [4] Si-Hong Ahn and Yong-Kweon Kim, "Fabrication and Experiment of Planar Micro Ion Drag Pump," Transducer 97, Chicago, Illinois, U.S.A., June 16-19, Vol A, pp. 373-376, 1997.
- [5] Si-Hong Ahn, Sung-Hyuk Kim, and Yong-Kweon Kim,

"Fabrication of Planar Micro Ion Drag Pump," MEMS 연구회, 이주대학교, 3월, 30일, pp. 1-12, 1996.

- [6] Fan-Gang Tseng, Chang-Jin "CJ" Kim, and Chih-Ming Ho, "A Novel Microinjector with Virtual Chamber Neck," Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop, Heidelberg, Germany, Jan. 25-29, pp. 57-62, 1998.
- [7] 김 영수, 지 영훈, 양 의혁, 양 상식, "마이크로 히터를 이용한 열공압형 액튜에이터의 제작," MEMS 연구회, 이주대학교, 3월, 30일, pp. 13-19, 1996.
- [8] O. C. Jeong and S. S. Yang, "Fabrication and Drive Test of a Thermopneumatic Micropump with the Corrugated Diaphragm," Proc. ICEE'98, Kyongju, Korea, July, 21-25, Vol. 1, pp. 902-905, 1998.
- [9] S. W. Lee, O. C. Jeong and S. S. Yang, "The Fabrication of a Micro Injector Actuated by Boiling and/or Electrolysis," Proc. IEEE Microelectro - mechanical Systems Workshop, Heidelberg, Germany, Jan. 25-29, pp. 57-62, 1998.
- [10] 정 옥찬, 양 의혁, 양 상식, "유리의 미세 가공을 위한 전기화학 방전 가공기술에 관한 실험적 연구," 대한전기학회 논문지, 제 45권, 9호, pp. 1374-1379, 1996.

저자소개

이 상 우

1996년 이주대학교 제어계측공학과 졸업
 1998년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사)
 1998년 - 현재, 동 대학원 박사과정.
 Tel. (0331)219-2488, E-mail : lswlove@madang.ajou.ac.kr
 <관심 분야>
 ◦ MEMS, 자동제어

양 상 식

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업
 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사)
 1988년 Univ. of California, Berkeley 기계공학과 졸업(공박)
 1988 - 1989년 New Jersey Institute of Technology 연구 조교수
 1989년 - 현재, 이주대학교 공과대학 전자공학부 교수.
 <관심 분야>
 ◦ MEMS, 자동제어, 센서
 Tel. (0331)219-2481, E-mail : ssyang@madang.ajou.ac.kr