

## Micro-stereolithography 기술을 이용한 용액분석 소자 제작

### Fabrication of the Liquid Analyzer using Micro-stereolithography Technology

이영태  
(Young-Tae Lee)

#### Abstract

In this paper, using micro-stereolithography technology, I fabricated a liquid analyzer to measure ion concentration of a solution. Micro-stereolithography is a technology to fabricate 3-dimensional structure by applying laser beam on liquid photo-polymer. This technology makes it possible to do preassemble fabrication without any extra assembling step after the process. So, the liquid analyzer could be fabricated at very low cost with very simple process by micro-stereolithography technology. The liquid analyzer consists of a chamber for containing the solution, a pump using piezoelectric effect of PZT disk, a static mixer and a sensor for measuring ion concentration using Pt electrodes.

**Key Words** : micro-stereolithography, MEMS, pump, mixer, ion concentration, liquid analyzer

#### 1. 서 론

MEMS의 기술이 발전함에 따라, 그 응용 분야도 점차 넓어지고 있다. 특히 lab-on-a chip, DNA 칩, 단백질 칩 등의 유체소자 및 시스템 분야에 대한 적용은 매우 효과적으로 생각되며, 현재 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 유체소자의 구조가 점차 복잡해짐에 따라, 현재의 실리콘 중심의 MEMS 기술만으로는 효과적인 제작이 힘들고, 제작 기술의 한계 때문에, 자유로운 설계가 불가능하

다. 이러한 제작 기술의 한계를 극복하기 위하여 다양한 기술들이 개발되고 있다[1,2]. 제작기술의 개발에 있어서, MEMS의 실용화를 고려한다면, 낮은 제작 단가, 신뢰성, 재현성 및 대량생산의 용이성 등이 반드시 확보되어야 할 것이다. 본 논문에서는 복잡한 MEMS 구조 제작에 응용되고 있는 micro-stereolithography 기술을 새로운 형태의 유체 소자 제작에 응용하여, 그 가능성을 평가했다. Micro-stereolithography 기술은 광경화 수지(photo-polymer) 용액 위에 레이저빔을 조사하여 3차원 구조물을 제작할 수 있는 기술로, 3차원 구조물의 preassemble 가공이 가능하며, 공정이 간단하고, 공정 단가가 낮다는 장점을 가지고 있다[3-7].

본 논문에서는 micro-stereolithography 기술을

---

안동대학교 전기전자공학교육과  
(경북 안동시 송천동 안동대학교,  
Fax : 054-823-1766  
E-mail : ytleee@andong.ac.kr)  
2001년 9월 6일 접수, 2001년 9월 20일 1차심사완료  
2001년 11월 9일 2차심사완료

사용하여, 용액 중의 이온농도를 측정하는 유체분석소자를 제작하고, 그 특성을 분석하였다. 유체분석소자는 재질이 수지(polymer)이고, 용액 저장용 챔버(chamber), 펌프(pump), 믹서(mixer) 및 이온농도 측정용 센서(sensor)로 구성되어있다.

## 2. Micro-stereolithography 기술

현재 micro-stereolithography를 실현하기 위한 기술이 다수 발표되어 있지만, 아직 실용화 단계에는 도달하지 못하고 있다. 본 논문에서는 micro-stereolithography 기술 중에, 비교적 간단한 공정으로 3차원 가공이 가능하며, 가공 정도 및 신뢰성 면에서 우수한 RP(Rapid-prototyping) 기술을 유체 소자 제작에 응용하고, 그 결과를 분석했다[3,4]. RP 기술은 기계 분야에서 새로운 제품 개발 시에 시제품 또는 몰드(mold)를 제작하기 위하여 사용되고 있다. Micro-stereolithography의 원리도를 그림 1에 나타냈다.

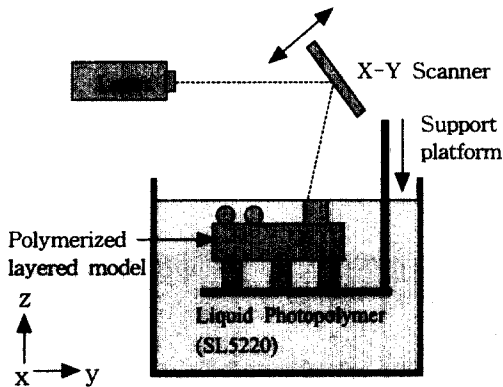


그림 1. Micro-stereolithography의 원리.  
Fig. 1. Principle of a micro-stereolithography.

제작하고자 하는 입체 구조의 CAD 데이터를 z축에 대하여 등 간격(slice size)이 되도록 xy 평면의 단면 데이터를 가공한다. 가공된 단면 데이터를 기초로 하여, 광경화 수지 용액(liquid photo polymer) 표면에 자외선 빔을 x, y축 방향으로 조사하여 경화시키고, z축 방향으로 증합 반응에 의해 경화된 구조물을 약간 하강(slice size 만큼)시

킨 후에, 다시 자외선 빔을 조사하여 경화시키는 것을 반복하여 복잡한 3차원 구조물을 만드는 기술이다. 이 기술을 사용하면, 대부분의 유체소자에 포함되는 닫힌 채널(closed channel)과 같은 구조물을 공정 후에 조립과정 없이 제작이 가능하다. 이것은, 실리콘 공정을 사용하는 경우, 먼저 에칭 공정[8-10]으로 열린 채널(open channel)을 제작하고, 그 위에 실리콘 또는 유리를 덮어서 채널을 완성하는 것과 비교하면, 공정 상의 신뢰성 및 경제성 면에서 유리할 것으로 생각된다. 본 논문에서 사용한 장비는 SLA-350으로 광원은 파장이 325nm인 He-Cd 레이저를 사용했으며, 광경화 수지는 SL5220을 사용했다.

## 3. 용액분석 소자 설계

본 논문에서 제작한 용액분석 소자의 구조를 그림 2에 나타냈다. 소자의 구조는 회석 용액, 시약 및 분석 대상 용액 등을 저장하기 위한 챔버(Chamber), 용액을 순환시키기 위한 펌프(pump), 각종 용액의 혼합을 위한 믹서(Mixer), 센서 부 및 신호처리용 칩으로 구성되어 있다.

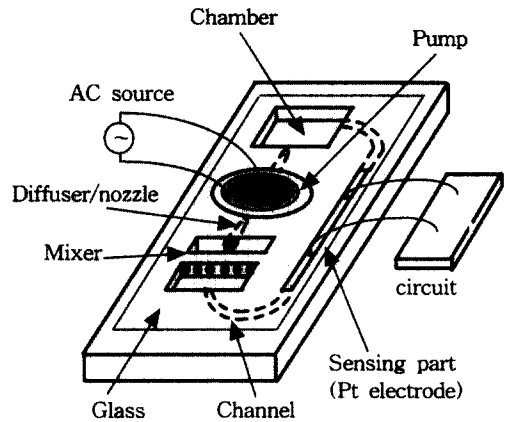


그림 2. 용액분석 소자의 구조.  
Fig. 2. Structure of the liquid analyzer.

이 소자는 0.1ml 정도의 용액 중의 이온 농도를 측정하여 용액의 특성을 분석하는 방식으로 되어있다. 소자의 챔버에 분석 대상 용액과 시약 등을 주입하

고, 펌프를 가동시켜, 챔버 내의 용액을 믹서 및 채널을 통하여 순환시키면서, 센서를 이용하여 용액을 분석한다.

용액분석 소자의 용액을 효과적으로 순환시키기 위하여 PZT를 이용한 기계식 펌프(mechanical pump)를 사용했다[11,12]. PZT를 이용한 기계식 펌프는 다른 방식의 펌프에 비해 펌핑 압력이 강하고, 전자 기파, 열 등에 의해 용액이 변질될 우려가 적은 장점이 있다. 펌프는 깊이 1mm, 지름 14mm의 원형 챔버에 유리 진동막(glass diaphragm)을 접착하고, 그 위에 PZT 디스크를 접착한 간단한 구조로 되어 있다. 또한, 본 펌프에는 check valve가 없는 diffuser/nozzle 개념의 non-movable 밸브를 사용하였다[12-14]. 이 밸브는 특정 방향으로 채널의 지름을 크게 해서, 상대적으로 유체저항을 작게 함으로서, 결과적으로 특정 방향으로 펌핑하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 이 밸브는 구조가 간단하고 펌프 작동 시에 움직이는 부분이 없기 때문에 반복 동작의 피로에 의한 파괴의 우려가 적다는 것이 장점이다. 하지만, 용액이 펌프 양쪽 방향으로 모두 흐를 수 있다는 문제점이 있지만, 본 논문과 같이 용액의 순환의 용도로는 매우 효과적이다. 본 소자에는 분석대상 용액과 시약 등의 혼합 및 반응을 가속시키기 위하여 간단한 구조의 정적 믹서(static mixer)를 사용했다[5]. 믹스는 6개의 채널로 구성되어 있으며 각 채널의 크기는 길이 2mm, 지름 0.5mm  $\phi$ 이다.

본 소자에서 채널은 용액을 순환시키는 목적 이외에, 채널 중에 백금 전극을 형성하여 이온 농도를 측정하는 역할도 한다. 채널은 백금 전극 형성을 위하여 일부 열린 채널(open channel)의 형태로 제작되었다. 백금 전극은 약 5mm 간격으로 제작했으며, 이온 농도의 측정 메커니즘은, 두 백금 전극 간을 통과하는 용액의 전기 저항을 측정하여 이온 농도를 검출하는 방식으로 되어있다.

#### 4. 제작 공정

용액분석 소자의 제작 공정을 그림 3에 나타냈다. 소자 본체는 micro-stereolithography 기술을 이용하여 제작한다. 소자 모델링은 범용 CAD tool을 사용했고, 제작은 RP(rapid prototyping) 장비인 SLA-350을 사용했다. 본 소자 제작에는 SL5220

광경화 수지(photo-polymer)를 사용했다.

그림 4에 제작된 소자의 diffuser/nozzle의 단면 사진을 나타냈다. 사진에서 슬라이스 라인을 확인할 수 있으며, 그 두께는 100 $\mu$ m이다. 그림 5에 믹서부의 사진을 나타냈다. 그림 5에서, 용액 혼합을 위한 6개의 채널을 확인할 수 있다.

진동판(diaphragm)은 0.16mm의 유리판을 에폭시(epoxy)를 이용하여 소자 본체에 접착하였다. 이온 농도 측정용 백금전극을 형성하기 위하여, 전기화

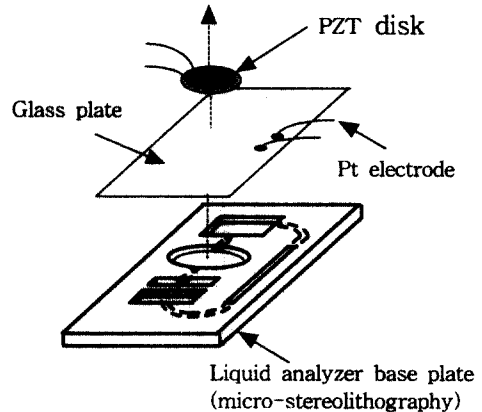


그림 3. 용액분석 소자 제작 공정.

Fig. 3. Fabrication process of the liquid analyzer.

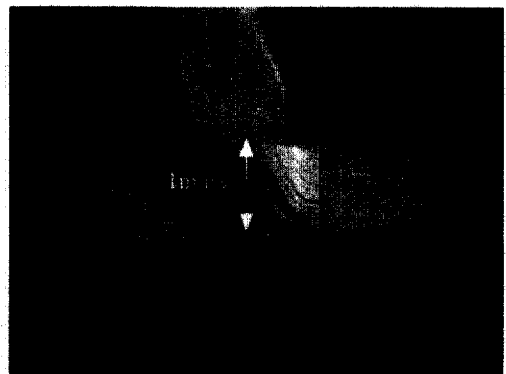


그림 4. Diffuser/nozzle 사진.

Fig. 4. Photograph of diffuser/nozzle.

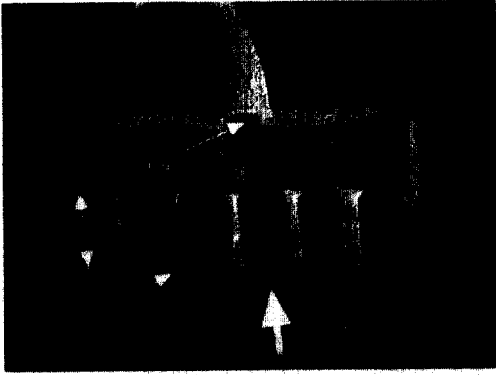


그림 5. 믹서 사진.  
Fig. 5. Photograph of the mixer.

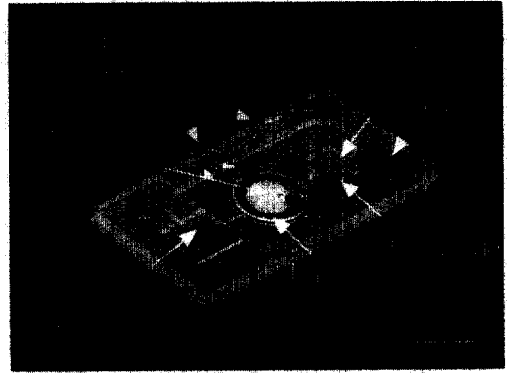


그림 7. 제작된 용액분석 소자 사진.  
Fig. 7. Photograph of the fabricated liquid analyzer.

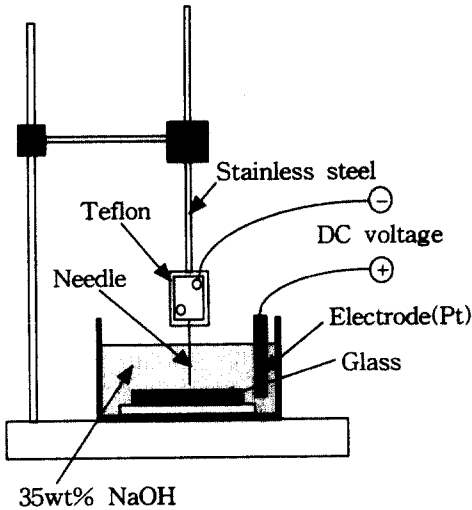


그림 6. 전기화학 방전가공 장치.  
Fig. 6. Apparatus of the electro-chemical discharge drilling.

학 방전가공법을 이용하여, 유리 표면에 0.4mm의 구멍을 생성했다[15,16]. 전기화학 방전가공 장비는 본 연구실에서 제작한 것으로, 약 35wt%의 NaOH 수용액 중에 있는 유리판에 방전용 바늘을 접촉시킨 후, 바늘과 NaOH 수용액 사이에 DC 40V 정도의 전압을 인가할 때, 바늘 끝에서 발생하는 방전에 의한 열을 이용하여 구멍을 생성하는 구조로 되어있다. 그림 6에 방전가공 장치의 구조도를 나타냈다.

방전가공법에 의해 생성된 구멍에 약 0.3mmφ의 백금 선을 주입하여, 도전성 에폭시(conductive epoxy)로 고정하였다. 생성된 백금 전극의 간격은 약 5mm이다. 마지막으로 두께 0.2mm, 지름 10mmφ의 PZT 디스크를 도전성 에폭시를 이용하여 유리 판 위에 정착했다. 제작된 용액분석 소자를 그림 7에 나타냈다.

### 5. 결과 및 고찰

제작된 용액분석 소자의 특성을 분석하기 위하여, 소자를 구성하고 있는 펌프, 믹서 및 백금 전극 등의 성능을 측정했다. 먼저 용액을 순환시키기 위한 펌프의 특성을 살펴보기 위하여, 본 소자에 사용하고 있는 같은 크기 및 구조의 펌프를 제작했다[11]. 그림 8은, 펌프의 전원 전압 주파수를 140Hz로 고정하고, Vp-p를 50V에서 200V까지 변화시키면서 펌프의 입구 및 출구의 수두차(pressure head difference)를 측정한 결과이다. Vp-p가 50V에서는 8mm, 200V에서는 80mm의 수두차를 나타냈다. 그림 9는 PZT의 구동 주파를 변화시키면서 수두차를 측정한 결과로, 80Hz 근처에서 1차 피크, 140Hz 근처에서 2차 피크를 나타냈다. 최대 수두차는 140Hz 근처에서 나타남을 알 수 있다. 본 소자에는 용액을 효과적으로 혼합하기 위하여

정적 믹서를 사용하고 있다. 그러나 정적 믹서 뿐 아니라 PZT를 이용한 펌프도 동적 믹서 (dynamic mixer)와 같은 역할을 하기 때문에[14], 실질적으로 용액의 혼합이 이중으로 이루어진다.

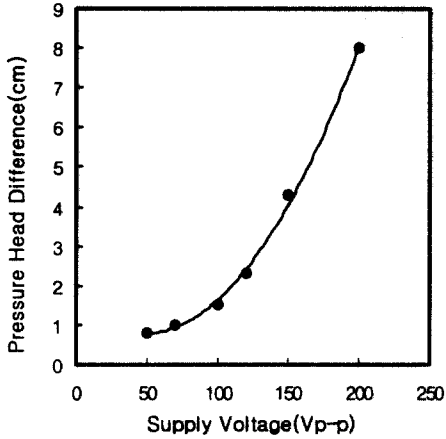


그림 8. 펌프의 수두차 측정 결과.  
Fig. 8. Measured pressure head difference.

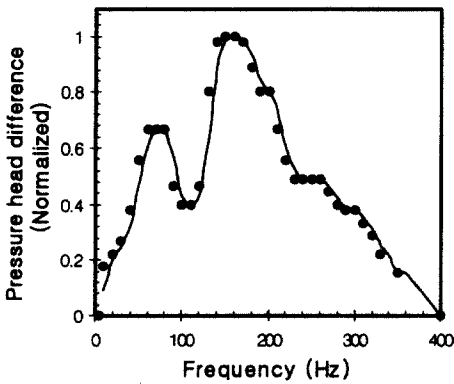


그림 9. 펌프의 주파수 특성.  
Fig. 9. Frequency response of the pump.

그림 10에 용액분석 소자의 용액 혼합 특성을 나타냈다. 측정은, 먼저 소자 내에 초순수(DI water)를 펌프로 순환시키면서, 백금전극을 통하여 수심에서 수백  $\mu\text{A}$ 의 전류를 공급했다. 소량의 NaCl 용액을 소자의 용액 저장용 챔버에 주입하면서, 백금전극 양단의 전압을 측정하였다. 측정 결과로부터,

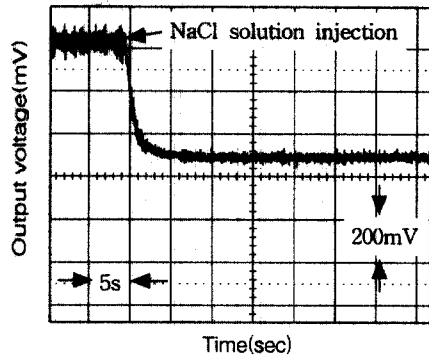


그림 10. 용액 혼합 특성.  
Fig. 10. Characteristics of the mixing operation.

용액의 혼합이 비교적 빠르게 이루어짐을 알 수 있었다.

백금전극에 인가하는 전류를 과다하게 증가시키면, 그림 11에 나타난 것과 같은 현상을 관찰할 수 있었다. 전극 양단에 적은 전류를 인가하였을 경우에는 그림 11의 ①과 같이 비교적 평탄한 전압을 유지하다가, 전류를 증가시키면, 그림 11의 ②와 같이 전압이 갑자기 감소하는 현상을 나타냈다. 이 현상은 높은 전압에 의한 전기분해 현상으로, 이때 소자 내의 전극 주위에는 다량의 기포가 발생하였고, 채널 주위에 백색 침전물이 관찰되었다.

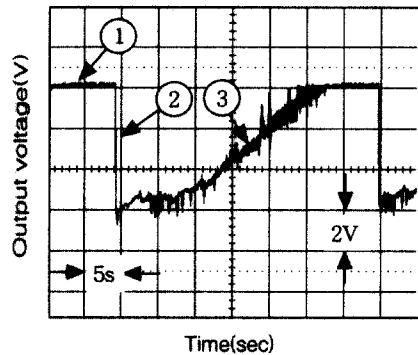


그림 11. 전기 분해 현상.  
Fig. 11. Electrolysis phenomenon.

전기분해 시에 발생한 기포는  $Cl_2$ 와  $H_2$ , 백색 침전물은 전기분해의 부산물로 발생하는  $NaOH$ 로 추정된다. 그림 11의 ③과 같이 전기분해가 진행될수록 전압이 증가되며, 이 때에 채널 내의 기포의 양도 현저히 감소함을 알 수 있었다. 이 현상은 용액내의 이온농도 감소와 기포에 의해, 용액의 저항 증가의 영향으로 추정할 수 있다. 실제로, 전기 분해 직전과 직후에 전극 양단의 저항을 측정한 결과, 최대 8배까지 증가된 것을 확인했다.

전기분해 현상은 그림 11의 측정 결과와 같이 반복해서 발생했다. 이와 같은 전기분해 현상을 없애기 위해서는, 교류 전원을 사용하는 등의 전원의 최적 조건을 찾는 것이 중요하다.

본 논문에서 제작한 소자는, 이온농도를 측정하기 위하여 용액의 저항을 측정하는 방식을 채택하고 있다. 용액의 이온농도 변화에 따른 저항 변화를 측정하기 위하여, 용액분석 소자에 초순수(DI water)를 주입하고, 펌프를 이용하여 순환시켰다. 순환하고 있는 초순수에 0.9% NaCl 수용액을 조금씩 주입하면서, 백금 전극 양단의 저항을 측정하였다. 그림 12에 나타낸 결과는 100ml의 초순수에 0.9% NaCl 수용액을 0.1ml씩 증가시키면서 측정한 결과이다.

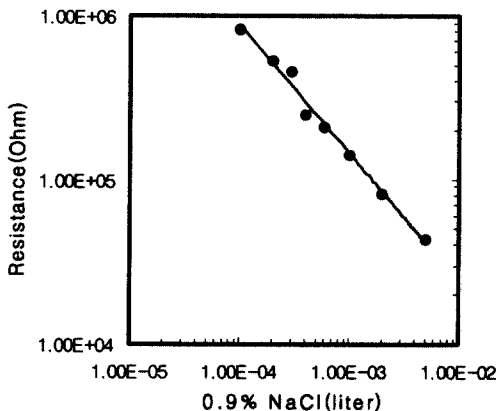


그림 12. 이온 농도에 대한 저항 변화 측정 결과.

Fig. 12. Measured result of resistance variation as a function of ion concentration.

그림 12로부터, 이온 농도에 대한 저항의 변화가 비교적 선형적으로 나타남을 알 수 있다. 따라서, 이온 농도와 저항 값에 대한 교정(calibration) 처리 후에 용액의 이온 농도 분석소자로 사용이 가능할 것으로 생각된다. 본 소자는 단순히 이온농도 측정 뿐 아니라 용액 및 시약 혼합기, 반응기, 채널 형태를 다소 변경하면 혈구 카운터에 응용할 수 있는 등 다양한 분야의 적용이 기대된다.

## 6. 결 론

Micro-stereolithography 기술을 이용하여 유체 분석 소자를 제작했다. 이 방법은, 실리콘 공정을 이용한 유체 소자와 비교해서, 제작 공정이 간단하고, 소자 제작 단가 면에서도 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 생각되어, MEMS 분야에의 적극적인 적용이 기대된다.

제작된 용액분석 소자의 펌프를 이용한 용액 순환, 믹서에 의한 용액 혼합 능력 등은 분석 결과 우수한 특성을 나타냈다. 또한 용액의 이온 농도를 변화시키면서 측정용 백금전극 양단의 저항을 측정 한 결과 비교적 우수한 감도와 직선성을 나타냈다. 본 소자는 이온농도 측정 뿐 아니라 다양한 형태의 유체 소자에 응용이 기대된다. 향후, 더욱 정밀한 구조물 제작을 위한 micro-stereolithography 장비 개발이 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30400-003-1) 지원으로 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] W. Menz, "LIGA and related technologies for industrial application", *Transducers '95*, pp.138-C3, 1995.
- [2] M. Esashi, M. Takinami, Y. Wakabayashi and K. Minami, "High-rate directional deep dry etching for bulk silicon micromachining", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 5, pp.1-6, 1995.

- [3] A.Bertsch, H.Lorenz, P.Renaud, "3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography", Sensors and Actuators, 73, pp.14-23, 1999.
- [4] Koji Ikuta, Tadahiro Hasegawa, Takao Adachi, Shoji Maruo, "Fluid drive chips containing multiple pump and switching valves for biochemical IC family", MEMS 2000, pp.739-744, 2000.
- [5] Arnaud Bertsch, Stephan Heimgartner, Peter Cousseau, Philippe Renaud, "3D micromixers-downscaling large scale industrial static mixers", MEMS 2001, pp.507-510, 2001.
- [6] Yoshiaki Mizukami, Daniel Rajniak, Masatoshi Nishimura, "An intergrated micro-electrophoretic chip fabricated using a new stereolithographic process", MEMS 2000, pp.751-756, 2000.
- [7] Koji Ikuta, Atsushi Takahashi, Shoji Maruo, "In-chip cell-free protein synthesis from DNA by using biochemical IC chip", MEMS 2001, pp.455-458, 2001.
- [8] 강형근, 임성훈, 임연호, 한윤봉, 황종선, 한병성, "새로운 ICP 장치를 이용한 고온 초전도체의 dry etching과 기존의 wet etching 기술과의 비교", 전기전자재료학회논문지, 14권 2호, pp.158-162, 2001.
- [9] 송정균, 정두찬, 신무환, "단결정 6H-SiC의 광전 화학습식식각에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권 2호, pp.117-122, 2001.
- [10] 정귀상, 박진성, 이원재, 송재성, "전기화학적 식각정지에 의한 고수율 실리콘 박막 멤브레인 제작", 전기전자재료학회논문지, 14권 3호, pp.223-227, 2001.
- [11] 이영태, 서희돈, "Stereolithography 기술을 이용한 마이크로 펌프 제작", 한국센서학회지, 제10권, 제4호, pp.232-238, 2001.
- [12] Ron L.Bard, Nigel R. Sharma, Fred K. Forster, Martin A. Afromowitz, Robert J. Penney, "Design high-performance micro-pumps based on no-moving-parts valves", Microelectromechanical System (MEMS) ASME 1997, pp.45-53, 1997.
- [13] Anders Olsson, Goran Stemme, Erik stemme, "A valve-less planar fluid pump with two pump chamber", Sensors and Actuators, A46-47, pp.549-556, 1995.
- [14] Z. Yang, H. Goto, M. Matsumoto, T. Yoda, "Micromixer incorporated with piezoelectrically driven valveless micropump", Micro Total Analysis System '98, pp.177-180, 1998.
- [15] Shuichi Shoji, Masayoshi Esashi, "Photoetching and electrochemical discharge drilling of pyrex glass", Technical Digest of the 9th Sensor Symposium, Japan, pp.27-30, 1990.
- [16] 이환훈, 이영태, "전해 방전법에 의한 유리의 미세 구멍 가공", 한국전기전자재료학회추계 학술대회 논문집, 14권 1호, pp. 89-92, 2001.