

## 유연하고 신속한 표면미세가공기술을 이용한 Micro-fluidic Channel 제작

### Fabrication of Micro-fluidic Channels using a Flexible and Rapid Surface Micro-machining Technique

김진산, 성인하, 김대은\*

연세대학교 대학원 기계공학과, 서울 서대문구 신촌동 134

\*연세대학교 기계공학부, 서울 서대문구 신촌동 134

#### Abstract

Recently, the need for transporting and manipulating minute amount of fluids in microscale channels (so-called micro-fluidics) has been increasing, especially in biotechnology and biochemical processing. This work demonstrates that the mechano-chemical process which consists of mechanical abrasive action combined with chemical process can be used to fabricate micro-fluidic channels more rapidly and cost effectively than other methods. In this work, capillary filling of fluids in micro-channels was investigated by theoretical approaches and experiments. From the experimental results, it is expected that a complex micro-fluidic system can be fabricated using the micro-fabrication technique and microsystem packaging method described in this work.

#### 1. 서론

현재의 기계산업 및 21세기를 주도할 기술분야로 주목받고 있는 정보/통신, 바이오, 환경, 우주항공 등의 산업분야에서 필요로 하게될 미래 첨단 제품들의 공통적인 기술적 특징은 극소화, 다기능화, 저전력화로 요약되어지고 있다. 향후 수년 이내에, 극소형 가스터빈이나 약물투여용 바이오 칩처럼 작고

가벼워 자원소비 및 환경오염을 줄이면서도 더욱 높은 정확성과 고효율의 제품을 생산해 낼 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이를 위해서는 무엇보다 우선적으로 비용, 시간, 유연성면에서 경쟁력 있는 미세구조물 제작 기술이 중요하다. 이러한 이유로, 최근들어 미세패턴 및 구조물을 제작하기 위해 초정밀 미세절삭가공기술, 미세 성형기술 등 다양한 방법에 의한 대체기술들이 연구, 개발되어 오고 있다. 그러나, 아직은 연구실차원에서의 가능성 입증이나 개발상태에 머물러 있고 실제 현업에 적용하기에는 해결해야 할 기술적 문제들이 많이 남아있다. 이러한 배경으로부터, 본 연구팀에서는 저렴성, 유연성, 신속성, 비실리콘 재료로의 가공대상의 확장을 특징으로 하는 기계-화학적 방법에 의한 미세 구조물 제작 기술을 개발, 제안한 바 있다[1,2].

미세유체소자(microfluidic device)[3-5]는 미세 생화학 시스템의 해석 또는 합성에 많은 잇점을 제공한다. 기존의 DNA나 프로테옴(proteom) 분석 신약특성 분석 기술은 분석 시료에 비해 부피가 큰 여과장치가 필요하며 통합적으로 운용되기 어렵고, 인력과 비용 소모가 많은 등의 단점이 있다. 특히 유전자분석과 같이 시료의 양이 적을 경우 기존의 분석기술은 정확성에 대한 한계가 있다. 이러한 이유로, 최근들어 마이크로스케일의 미세채널을 이용하여 시료를 운송하고 조작하는 micro-fluidic device에 대한 연구가 진행중인데,

이러한 'lab-on-a-chip' [6,7] 기술을 이용하면 작은 칩 위에 전기적 센서, 히터와 같은 전자소자 및 분석 시료를 흘려주는 유로를 통합하여 만들 수 있기 때문에 기존의 분석법에 비해 저렴하며, 극히 적은 양의 시료로서 빠르고 정확한 분석이 가능하게 된다. 이러한 lab-on-a-chip을 이용한 분석시스템을  $\mu$ TAS(micro-Total Analysis System) [8,9]라고 하며, 이에 대해 최근 많은 연구가 진행중에 있다.

한편, 이러한  $\mu$ TAS에 이용되는 소자는 대부분 반도체공정에서 이용되는 포토리소그래피 기술을 이용하여 실리콘 또는 유리에 제작되고 있다. 그러나, 이러한 방법은 제작시간이 길고, 초기 설비비가 많이 들며, 기판의 균열가능성 등 소자의 안정성에 문제가 있다. 따라서, 최근들어 nano-imprinting 등의 기술을 이용하여 elastomer에 제작하는 방법이 연구되고 있는데, 이 역시 치수의 정확도나 이형(release)시 형상왜곡문제 등 해결해야 할 문제가 많이 남아있다.

이러한 배경으로부터, 본 연구에서는 그간 개발해온 저렴하고 신속한 기계-화학적 미세 표면가공기술을 이용하여 미세유로채널을 제작하고 미세유체소자 제작으로의 가능성을 검증하고자 한다. 우선, 이론적 접근을 통하여 미세유로의 제작에 있어서 원하는 유속과 유동거리 등에 대한 제약조건 등을 살펴보고, 미세유로채널을 갖는 간단한 소자 제작을 위해 표면미세가공기술 및 미세기전시스템(MEMS)에서 활용되는 패키징 기술을 이용한다. 이러한 방법을 이용하면 전체크기가 밀리미터 스케일의 micro-fluidic device라도 수시간내에 제작 가능하다.

## 2. 실험방법 및 내용

### 2.1 실험장치 및 실험방법

기계-화학적 가공기술의 기본개념은 우선 시료표면에 이후의 화학적 에칭에 대한

보호층역할을 하는 리지스트(resist)를 형성시키고 이를 미세탐침을 이용, 미세탐침에 하중을 가하여 기계적 가공을 통해 제거한후, 가공된 패턴 또는 영역을 선택적으로 에칭하여 원하는 형상을 얻는 것이다. 본 기술에 의해 에칭시간 조절에 따라 고종횡비(high-aspect ratio)를 갖는 3차원 미세구조 제작이 가능하고 실리콘 및 실리콘을 기반으로 하는 재료뿐만 아니라 다양한 금속재료로도 패턴 및 구조물 제작이 가능하다는 큰 장점을 가진다.

이러한 방법으로 실리콘 위에 제작된 마이크로 채널은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 그 기능을 검토하기 위하여 미세기전시스템에서 사용되는 패키징방법 중 하나인 음극접합법을 이용하여 glass와 접합시켜 모세관을 형성하였다.

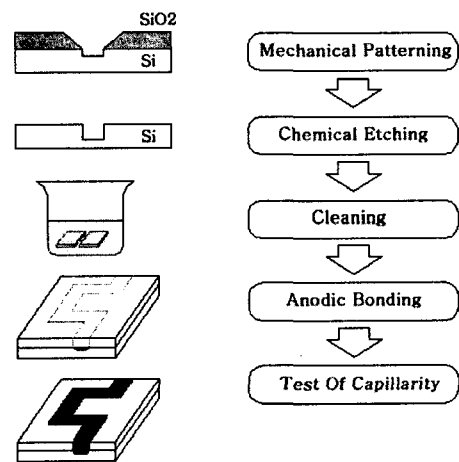


Fig. 1 Schematic of micro-fabrication process for micro-fluidic channel

마이크로 채널제작을 위해 미세패턴은 서브 마이크로미터 수준의 이송정밀도를 갖는 3개의 리니어 액츄에이터와 하중제어를 위한 정밀저울로 구성된 자체제작한 마이크로 머시닝 센터를 이용하여 제작하였다[1]. 마이크로 유로 채널은 프로그래밍을 통해 손쉽게 디자인이 변경될 수 있다. 머시닝 센터의 공구는 끝단반경  $2\mu\text{m}$ 의 다이아몬드 팁을 사용하였다.

기계-화학적가공 후에 모세관력(capillary force)에 의한 미세 채널에서의 유체 유동을 관찰하고자 앞서 언급한대로 Fig. 2에 보이는 바와 같이 음극접합법을 이용하여 채널이 형성된 실리콘 시편과 glass를 접합하였다.

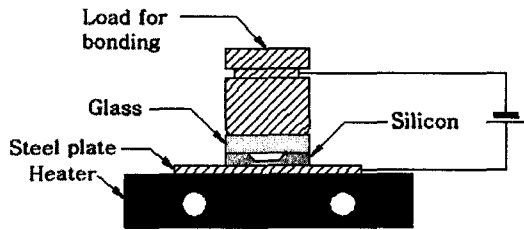


Fig. 2 Experimental setup for anodic bonding

본 연구에서는 대기중에서 온도 300-400℃, 전압 600-800 Volt, 압력 약 30-35 KPa 의 조건하에 약 40-50분 음극접합을 수행하였다.

실리콘 시편과 glass의 접합상태를 평가하고 모세관력에 의한 micro-fluidic channel 내부에서의 유체 흐름을 관찰하기 위해 유체로서 흑색 ink를 사용하였다.

## 2.2 실험 시편

실리콘의 경우, 다양한 재료에 대한 리스트로서의 적합성을 예비실험을 통하여 확인결과, SiO<sub>2</sub> 가 가장 적합하였다[1]. 따라서, 70nm 두께로 가열성장(thermal growth)시킨 SiO<sub>2</sub>박막을 갖는 P-type Si(100)을 시편재료로 사용하였고, 음극접합을 위해서 glass는 Corning사의 Pyrex 7740 을 사용하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 Capillarity의 이론적 고찰

배분력의 조절에 의해 반경 2μm의 다이아몬드 팁으로 기계가공 및 화학적 가공 후 얻어지는 패턴의 폭은 약 1 μm 정도로 미세한 패턴을 얻을 수 있으나, 본 연구에서는 유동

확인을 용이하게 하기 위하여 최종적으로 가공된 선 폭이 10μm 이상 되도록 하였다. Fig. 3는 깊이 1.5μm, 폭 12μm 크기의 단면으로 가공된 미세 채널의 이미지이다.

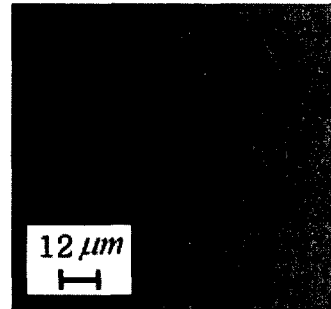


Fig. 3 Optical micrograph of a micro-channel

미세채널에 ink를 주입시켜 모세관현상에 의한 유동을 확인하기에 앞서, 모세관내에서의 유체의 filling rate와 최대 이동 가능 거리를 이론적으로 살펴보았다.

모세관력에 의해서 유체가 미세 채널을 채울때의 filling rate는 식 (1)과 같이, 표면장력(surface tension)  $\gamma$  와 유체점도(viscosity)  $\eta$ , 모세관의 수력학적 반경  $R_H$  (모세관의 체적 대 표면적의 비), 유체에 의해 채워지는 모세관의 길이  $z$  에 의해서 결정된다[10-13].

$$\frac{dz}{dt} = \frac{R_H \gamma_{LV} \cos \theta}{4\eta z} = \frac{R_H (\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{4\eta z} \quad (1)$$

여기서,  $\theta$  는 유체의 표면과의 접촉각(contact angle),  $\gamma_{LV}, \gamma_{SV}, \gamma_{SL}$  은 각각 liquid-vapor, solid-vapor, solid-liquid 간의 interfacial free energy를 나타낸다. 따라서, 모세관의 filling rate는 유체를 포함하는 모세관 길이 및 유체점성에 반비례하고 단면적의 크기에 비례함을 알 수 있다. 또한, filling rate는 모세관이 채워지거나 유체점도가 높아짐에 따라 감소하게 된다. Fig. 3에 제시된 채널에 대해 계산해보면 최소 약 2.5 mm/s 의 filling rate를 얻을 수 있는데, 유동은 매우 빠르게 모세관내에서 움직임을 예측할 수 있으며,

실험을 통해서도 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 4와 같이 채널의 단면 형상을 토대로 모세관력에 의한 유동흐름의 최대 이동 가능 거리를 이론적으로 계산해 보았다.

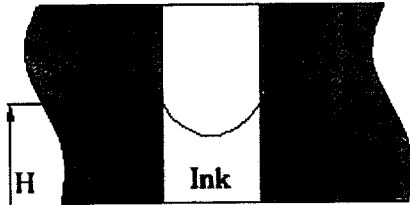


Fig. 4 Modeling of capillary filling

실리콘벽과 ink사이의 접촉각, 유리벽과 ink사이의 접촉각이 같다고 가정하면  $\theta = 0\sim 9^\circ$  정도의 값을 갖는다. 상온(22°C)에서 물의 표면장력 0.072 N/m, 비중량  $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$  으로 하고, 채널을 통과하는 ink의 무게는 모세관력과 같다고 가정하고 식을 전개하면[14],

$$\gamma AH = FL \cos \theta \quad (2)$$

여기서 A는 채널의 단면적, H는 ink가 지나간 길이, F는 표면장력이며 L은 접촉길이이다. 따라서, 제작된 채널의 경우 단면적은 약  $16.4\mu\text{m}^2$ 이고 접촉길이는 약  $27\mu\text{m}$  정도이므로 식 (2)에 의해  $H \approx 11.94 \text{ m}$  가 되므로 제작된 채널길이(4.2 mm)에서는 충분히 유동이 가능함을 알 수 있다.

### 3.2 Micro-fluidic channel의 실험적 검증

제작된 미세 채널의 실험적 검증을 위해 음극접합을 시도하였는데, Fig. 5는 음극접합후의 이미지로서 전체표면에서 접합이 완전하게 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 이렇게 제작된 미세 채널내에 압력차이로 발생한 모세관력에 의해 유동이 형성되었음을 보여주는 광학현미경 이미지이다. 흑색 ink를 채널입구에 주입시켰을 때 ink가 채널의 경로를 따라 예측했던 대로 매우 빠르게

반대편 출구로 흘러나가는 것을 확인할 수 있었다.

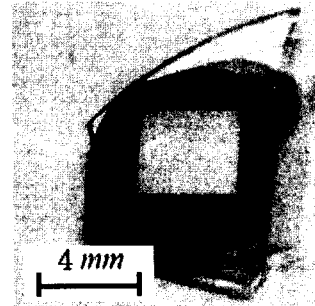
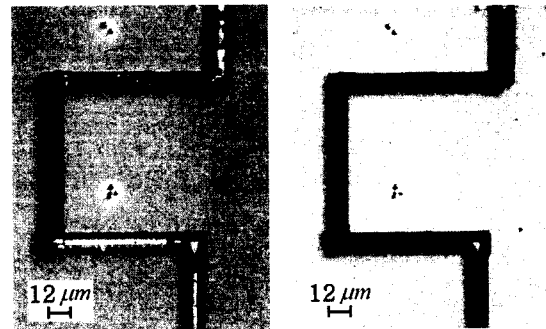


Fig. 5 Optical image which shows complete silicon-to-glass bonding state



(a) Before capillary filling (b) After capillary filling  
Fig. 6 Optical micrographs of capillary filling in the micro-fluidic channel

## 4. 결론

본 연구에서는 미세채널에서의 모세관현상에 대한 이론적 고찰 및 기계-화학적 표면 미세가공기술을 이용하여, 12(width) x 1.5(depth) ( $\mu\text{m}$ )의 micro-fluid channel을 제작하고 음극접합법을 이용해 micro-channel에서의 모세관력에 의한 유동을 확인해 보았다. 본 연구를 통하여 미세 유로채널의 형상에 따른 모세관력에 의한 최대 유동가능 거리 및 유동속도를 이론적으로 예측하여 미세 유로 디자인에 활용할 수 있음을 보였다.

제안된 기계-화학적 표면 미세가공기술은

간단한 설비로 빠르게 미세 유로를 제작할 수 있으며 유로의 디자인 또한 쉽게 변경할 수 있어, 경제적이고 효과적으로 복잡한 채널을 갖는 micro-fluidic device 및 시스템 제작이 가능하리라고 생각된다.

#### 후 기

본 내용은 과학기술부 21C 프론티어 개발사업 중 “지능형 마이크로시스템 개발 사업단”의 지원을 받아 수행한 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] J. M. Lee, W. H. Jin, D. E. Kim, “Application of Single Asperity Abrasion Process for Surface Micro-machining”, *Wear*, Vol. 251, pp. 1133-1143, 2001.
- [2] J. M. Lee, I. H. Sung, D. E. Kim, “Process Development of Precision Surface Micro-machining using Mechanical Abrasion and Chemical Etching”, *Microsystem Technologies*, In press, 2002.
- [3] T. Chovan, A. Guttman, “Microfabricated Devices in Biotechnology and Biochemical Processing”, *Trends in Biotechnology*, Vol. 20, No. 3, pp. 116-122, 2002.
- [4] T. Laurell, G. M. Varga, S. Ekstrom, M. Bengtsson, J. Nilsson, “Micro-fluidic components for protein characterization”, *Reviews in Molecular Biotechnology* Vol. 82, pp. 161-175, 2001.
- [5] H. Becker, L. E. Locascio, “Polymer microfluidic devices”, *Talanta*, Vol. 56, pp. 267-287, 2002.
- [6] S. Mouradian, “Lab-on-a-chip: Applications in proteomics”, *Current Opinion in Chemical Biology*, Vol. 6, No.1, pp. 51-56, 2002.
- [7] L. J. Kricka, “Microchips, microarrays, biochips and nanochips: personal laboratories for the 21st century”, *Clinica Chimica Acta*, Vol. 307, No. 1-2, pp. 219-223, 2001.
- [8] J. Khandurina, A. Guttman, “Bioanalysis in microfluidic devices”, *Journal of Chromatography A*, Vol. 943, pp. 159-183, 2002.
- [9] S. C. Jakeway, A. J. de Mello, E. L. Russell, “Miniaturized total analysis systems for biological analysis”, *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, Vol. 366, No. 6-7, pp. 525-539, 2000.
- [10] D. Myers, *Surfaces, Interfaces, and Colloids*, VCH publishers, NewYork, pp. 87-109, 1991.
- [11] P. G. de Gennes, “Wetting : Statics and dynamics”, *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 57, No. 3, pp. 827-863, 1985.
- [12] M. Dong, F. A. Dullien, I. Chatzis, “Imbibition of Oil in Film Form over Water Present in Edges of Capillaries with an Angular Cross Section”, *J. Coll. Interf. Sci.*, Vol. 172, No.1, pp. 21-35, 1995.
- [13] E. Kim and G. M. Whitesides, “Imbibition and Flow of Wetting Liquids in Noncircular Capillaries”, *J. Phys. Chem. B*, Vol. 101, pp. 855-863, 1997.
- [14] A. W. Adamson, A. P. Gast, *Physical Chemistry of Surfaces*, 6th edition, John Wiley & Sons, NewYork, pp.11-13, 1997