

박막펌핑을 이용한 Nano Fountain-Pen의 유동 특성에 관한 수치적 연구

이진형* · 이영관* · 이석한** · 김훈모*** · 김윤제***

Numerical Analysis of the Flow Characteristics in the Nano Fountain-Pen Using Membrane Pumping

J.-H. Lee*, Y.-K. Lee*, S.-H. Lee**, Hun-Mo Kim*** and Youn J. Kim***

Key Words: Nanolithography (나노 전사법), Nano fountain-pen (나노 만년필), Membrane pumping (박막 펌핑)

ABSTRACT

Nano fountain-pen is a novel device to make the constant patterning in micro process using new designed probe. Fountain-pen nanolithography (FPN) is applied for constant supply of liquid in conjunction of patterns and surface variation in the micro process. In this study, nano fountain-pen is composed with reservoir, micro channels, tip and secondary chamber. Instead of traditional method only using capillary force, liquid can be definitely and exactly injected with membrane pumping by the repulse force of tip. It is difficult to perform experiments in the micro range so that we carried out a numerical analysis for internal flow, using a commercial code, FLUENT. The velocity, pressure and flow rate are obtained under laminar, unsteady, three-dimensional incompressible flow with no-slip condition, and results are graphically described.

1. 서론

나노시스템 개발에서의 중요 핵심기술인 나노패터닝 (nano-patterning)과 관련된 기술 및 공정을 나노전사법 (nanolithography)이라 한다. 반도체 메모리 소자의 집적도는 최소 선폭에 의해 결정되는데, 이는 단순히 집적도를 높이는 차원이 아니라 반도체 소자가 소형화되면 내부배선 간의 정전용량 결합 (capacitive coupling)과 소비전력을 줄일 수 있어 소자 전체의 전기적 특성과 동작속도를 높이는 측면에서 매우 중요하다. 최소선폭의 크기 (CD: Critical Dimension)가 이미

수십 nm이하로 내려가고 있으며, 이에 따라 더 미세한 패터닝 선폭이 요구되는데 현재 사용하고 있는 광학전사법 (photo-lithography)으로는 구현하기 어렵다. 그러므로 새로운 나노전사법의 개발이 필요하며, 이는 두 가지 개념으로 나눌 수 있다. 첫째, 선폭은 파장에 비례하므로 짧은 파장을 이용하면 빛의 해상도가 증가하여 기존의 광학전사법으로도 미세한 패터닝이 가능하다. 짧은 파장인 X선, 전자선 (e-beam) 등을 사용하는 전사법이 이에 속하며, 이러한 전사법을 사용하기 위해서는 적합한 포토레지스트 개발이 선행되어야 한다. 또한 빛의 파장이 짧을수록 에너지는 높아지므로 재료의 안정성이 요구되며, 초점거리가 짧아짐에 따라 포토레지스트 막의 두께가 얇아져야 한다. 고 에너지의 입자일수록 제어장치 개발의 부담이 있다. 둘째, 기

* 성균관대학교 대학원

** 성균관대학교 정보통신공학부

*** 성균관대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : yjkim@skku.edu

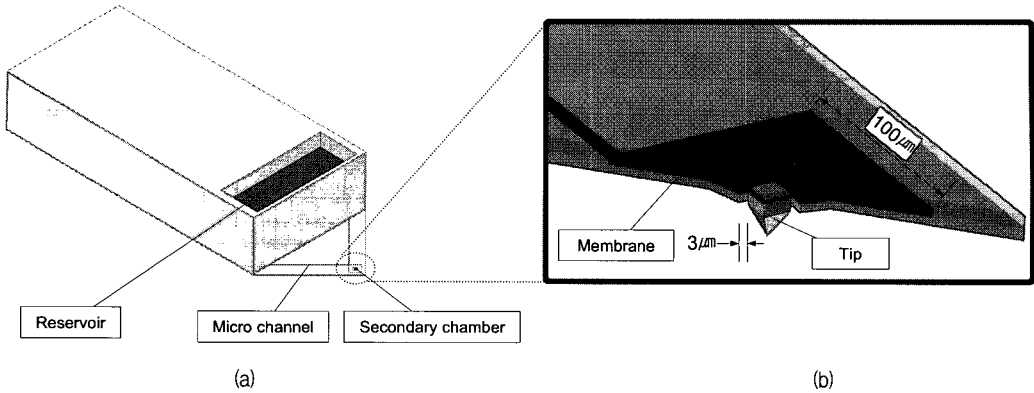


Fig. 1 Schematic of the nano fountain-pen : (a) feeding reservoir (b) cantilever with a secondary chamber and a tip

존의 방법과는 다른 새로운 전사법을 말하는데, SPM (Scanning Probe Microscope)을 이용한 전사법이 이에 속한다. SPM은 STM (Scanning Tunneling Microscope), AFM (Atomic Force Microscope), NSOM (Near-field Scanning Optical Microscope)을 사용하여 패터닝하는 기술을 통칭하며 물질 표면을 측정하는 장비이므로 패터닝과 패터닝을 확인하는 공정이 같은 기기로 수행된다는 장점이 있다. 이러한 SPM 기술은 탐침을 마치 펜촉처럼 사용하여 원하는 분자를 탐침에 묻혀 원하는 장소에 선택적으로 고착시키는 dip-pen 기술과 이를 보완한 새로운 개념인 FPN (Fountain-Pen Nanolithography)기술이 있다. 현재 FPN에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나, multi-tip의 형태로 되어있기 때문에 패터닝의 범위는 sub- μm 단위에 머물러 있다. 또한 단순히 모세관력 (capillary force)만을 이용하여 유체를 공급하기 때문에 공정속도가 제한적이라는 단점이 있다^(1~3). 그러나 본 연구의 nano fountain-pen은 Fig. 1과 같이 reservoir, micro channel, tip, 보조 챔버 (secondary chamber)로 구성되어 있으며, 기존의 dip-pen 기술과는 달리 지속적인 용액의 공급이 가능하다는 장점이 있다. 또한 tip의 반발력에 의한 박막 펄핑을 이용하여 확실하고 정확한 분사가 이루어지며 tip의 끝이 nano scale이기 때문에 nano 범위에서의 패터닝이 가능하다.

Nano fountain-pen은 제작 공정이 복잡하고 고가이기 때문에 시제품의 제작에 앞서 수치해석이 요구된다. 이에 nano fountain-pen의 주요 요소인 보조 챔버 내부유동을 해석하여 nano fountain-pen 구동 시 발생할 수 있는 문제점을 미리 예측하여 보완하고 보조 챔버의 형상을 최적화하는 연구가 필요하다. 본 연구에서

는 tip의 수직이동거리에 따라 내부 체적이 변하기 때문에 분사 유량을 제어할 수 있음을 보조 챔버 내부유동을 해석하여 그 결과를 고찰하였다. 상용코드인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였으며 박막의 수직이동에 따른 유동해석을 위해 DMM (Dynamic Mesh update Method) 기법을 사용하였다.

2. 지배방정식

채널 및 챔버가 micro scale이며 Re수가 10^{-2} 이하의 고점도 유동인 Stokes 유동영역이므로 유동해석을 위한 지배방정식으로 아래와 같은 3차원, 비정상상태, 비압축성, 층류유동의 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다.

연속방정식:

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \tag{1}$$

운동량 보존법칙:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

위 식에서 τ_{ij} 는 점성항을 나타내며 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \tag{3}$$

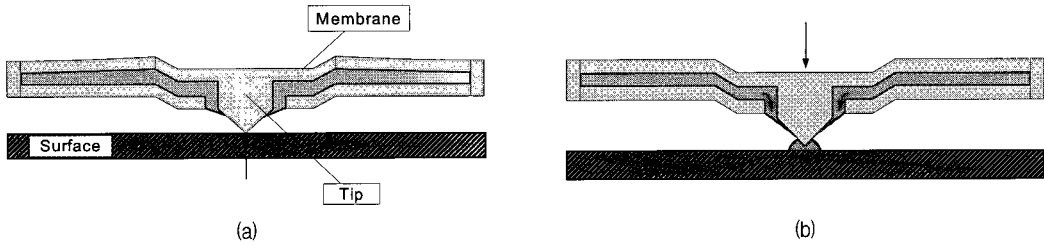


Fig. 2 Operation of the nano fountain-pen : (a) the expansion of the volume to contact a tip at surface (b) the injection along a tip by a strength f stability

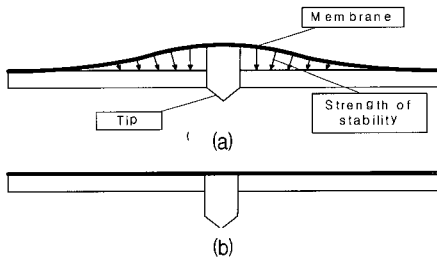


Fig. 3 The process of real deforming a membrane : (a) 0 sec (b) 1 sec

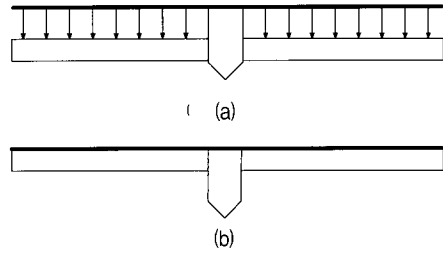


Fig. 4 Schematic of a deforming process : (a) 0 sec (b) 1 sec

여기서 μ 는 점성계수이며, δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수이다.

Fig. 2는 nano fountain-pen의 작동원리를 보여준다. Nano fountain-pen의 tip은 박막에 연결되어 있으며, tip이 표면에 닿으면 tip과 표면사이의 반발력에 의해 박막이 변형된다. 박막의 변형량에 따라 보조 챔버 내부의 체적이 증가하게 되고, 내압이 감소하게 되어 유체가 채널에서 보조 챔버로 유입된다 (Fig. 2(a) 참조). Tip이 표면에서 분리되면, 박막의 복원력에 의해 보조 챔버 내의 체적이 감소하고 내부 압력이 증가하여 유체가 보조 챔버에서 출구로 일정하게 분사된다. (Fig. 2(b) 참조). 이러한 과정에 있어서 보조 챔버 내부의 체적변화에 따른 시스템의 질량 변화는 입구속도 (u_i)와 출구속도 (u_o)를 고려하여 다음 식으로 나타낸다(4).

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int \rho dV \right) + \rho A_o u_o - \rho A_i u_i \quad (4)$$

위 식은 시스템의 질량 변화가 없기 때문에 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int dV = A_i u_i - A_o u_o \quad (5)$$

3. 수치해석

3.1 해석 모델

실제 nano fountain-pen은 Fig. 3과 같이 박막이 양 끝에 고정되어 있으므로, tip과 표면사이의 반발력에 의해 curve형태로 변형한다^{(5),(6)}. 본 연구에서 tip의 이동거리는 $1 \sim 2 \mu m$ 으로 제한하였으며, 박막이 복원되는 시간을 1 sec로 가정하였다. 박막의 면적 ($100 \times 100 \mu m^2$)에 비해 tip의 수직 이동거리 ($1 \sim 2 \mu m$)가 매우 작기 때문에 Fig. 4와 같이 박막에 균일한 분포 하중이 발생하여 연직방향으로 일정 속도로 이동하는 것으로 가정하였다. 박막이 tip과 표면 사이의 반발력에 의해 변형한 상태에서 시작하여 박막이 복원되어 정지된 상태와 그 이후 3 sec 동안의 유동에 대한 해석을 수행하였다. 즉, 박막이 복원되는 과정에서의 보조 챔버 내부 체적 변화에 따른 유동 변화에 대한 해석만을 수행하였다. 해석에 사용한 보조 챔버의 전체적인 크기는 $L \times W \times H$ ($100 \mu m \times 100 \mu m \times 3 \mu m$)이고 수직 이동거리에 따라 $1 \mu m$ 과 $2 \mu m$ 의 두 가지 모델을 해석하였다. 입구는 $3.59 \times 10^{-11} kg/s$ 의 질량유량이 일정하게 유입되며, 출구는 대기압 상태이다. Tip과 출구 사이의 간격은 $3 \mu m$ 이며 출구 면적은 $180 \mu m^2$ 으로 설정하였다.

Fig. 5는 본 연구에 사용된 보조 챔버 모델과 3차원

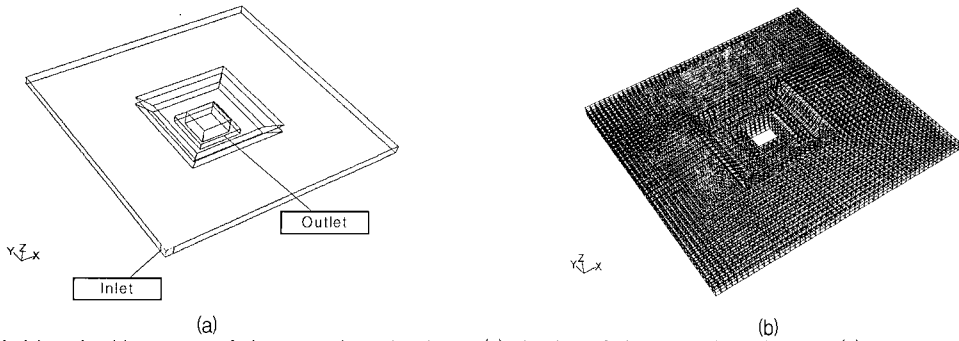


Fig. 5 Model and grid systems of the secondary chamber : (a) drawing of the secondary chamber (b) grid systems of the secondary chamber

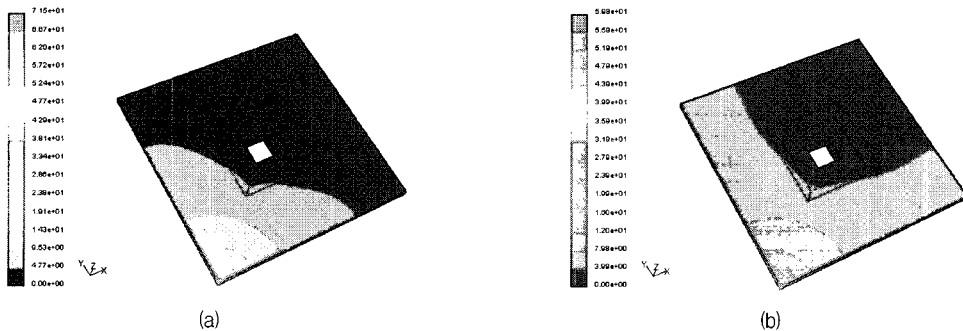


Fig. 6 Pressure distribution in the secondary chamber for different values of the membrane velocity : (a) membrane velocity ($1 \mu\text{m/s}$) (b) membrane velocity ($2 \mu\text{m/s}$)

격자계를 나타낸 것이다. 유체는 입구를 통해 채널에서부터 보조 챔버로 유입되며, 박막의 수직이동에 따라 내부 유동이 변화한다. 수치해석영역은 주된 관심사가 되는 tip과 박막을 중심으로 보조 챔버 전체를 대상으로 하였고, 3차원 정렬격자계로 구성하였다. 사용된 격자수는 약 600,000 개이며 격자의 quality는 0.5로 FLUENT의 일반적인 격자 신뢰 quality인 0.7이하를 유지하였다.

3.2 수치해석방법

보조 챔버 내부는 비정상, 비압축성, 층류 유동으로 가정하였으며, reservoir에서 채널을 따라 모세관력 (capillary force)에 의해 일정한 유량으로 보조 챔버로 유입된다. 박막의 수직 이동거리를 각각 $1 \mu\text{m}$ 과 $2 \mu\text{m}$ 로 해석하였으며, 이동시간은 1 sec로 동일하다고 가정하였다⁽⁷⁾. 이를 구현하기 위해 내부 유체에 해당하는 격자를 박막이 움직일 때마다 remeshing함으로써 동적인 과정에서의 유동해석이 가능한 DMM (Dynamic Mesh update Method)기법을 이용하였다. 초기 1 sec

동안은 박막이 분포하중을 받아 일정한 속도로 이동하여 정지할 때까지를 해석하고, 이후 박막이 정지한 상태에서의 유동을 4 sec까지 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 보조 챔버 내부의 압력장을 나타낸 것이다. 압력분포를 살펴보면 입구 부분의 압력이 다른 부분에 비해 가장 높은 값을 가지며, 출구로 갈수록 압력이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 박막의 이동속도가 증가하면 입구에서의 압력이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 박막의 이동에 의해 생성된 내부압력 증가가 입구에서 유입되는 유량에 의해 생성된 압력에 대해 저항으로 작용하여 발생한 결과이다.

Fig. 7은 보조 챔버 내부의 속도분포를 나타낸 것이다. 속도분포를 살펴보면 입구와 출구사이의 일부에만 속도가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 속도가 존재하는 부분을 제외한 나머지 부분이 실제 유동장에 영향을 미치지 못하는 사공간이라는 것을 보여

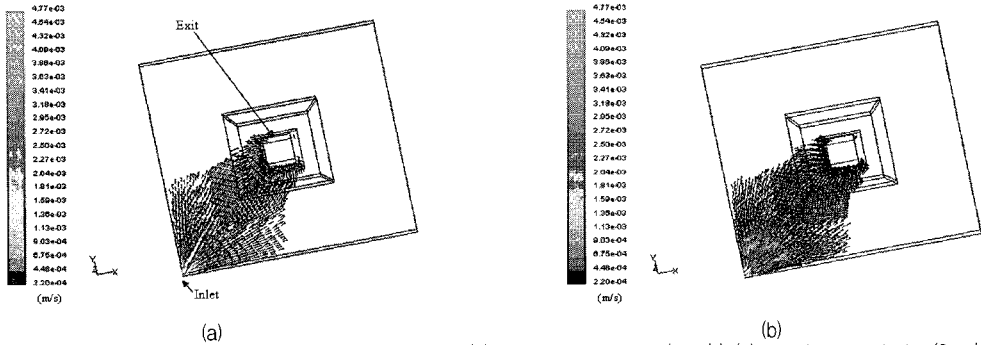


Fig. 7 Velocity distribution in the secondary chamber : (a) membrane velocity ($1 \mu\text{m/s}$) (b) membrane velocity ($2 \mu\text{m/s}$)

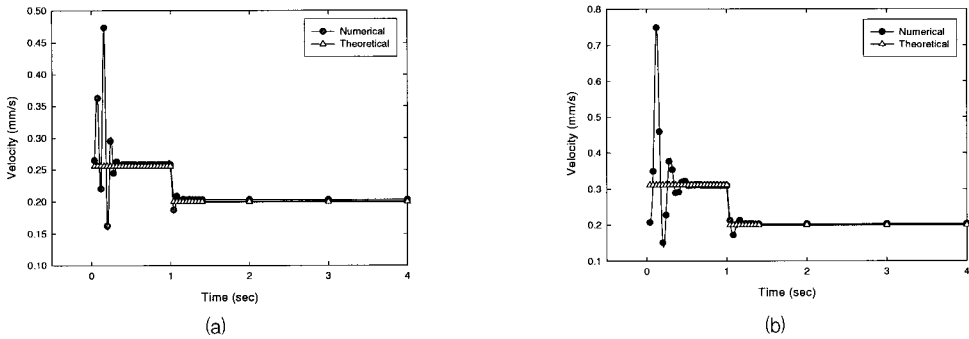


Fig. 8 Transient velocity distributions at the outlet for different values of the membrane velocity : (a) membrane velocity ($1 \mu\text{m/s}$) (b) membrane velocity ($2 \mu\text{m/s}$)

준다. 박막의 이동속도가 증가하면 입구에서의 속도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 압력장에서와 마찬가지로 박막의 이동에 의해 발생한 내부압력 증가가 입구속도에 대한 저항으로 작용하여 발생한 결과이다. 박막의 이동속도가 증가할수록 출구 속도가 증가하지만, 속도장의 분포는 유사한 것을 알 수 있다. 이로부터 박막의 이동속도 변화와 사공간 발생은 관련이 없는 것으로 판단할 수 있다.

박막의 이동속도가 각각 $1 \mu\text{m/s}$ 에서 $2 \mu\text{m/s}$ 로 증가함에 따른 출구 속도를 Fig. 8에 수치 해석값과 이론값을 나타내었다. 해석 결과를 보면 수치 해석값과 이론값이 유사한 것을 알 수 있다. 초기에 유속의 변화가 급격하게 일어나는 것은 유동이 안정화되지 않았기 때문이며, 이후 일정한 속도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 또한 박막이 정지한 후 속도가 일시적으로 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 유체의 관성에 의한 것으로 사료된다. 박막이 정지한 이후, 유동은 속도가 동일한 값으로 유지되므로 정상상태 유동으로 볼 수 있다. 이 결과에 따라 본 연구에서 적용한 nano fountain-

pen은 박막의 이동 속도 차에 따라 일정시간 (1 sec)동안 일정한 유량을 분사한다는 것을 알 수 있다. 이는 tip의 반발력에 따른 박막의 변형량 변화에 따라 일정 범위에서의 유량제어가 가능한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 nano fountain-pen의 제작과 실험에 앞서 수치적인 연구를 수행함으로써 nano fountain-pen의 내부 유동 특성을 분석하여 실제 분사가 이루어질 때, 박막 변형에 따른 분사량 제어 가능성을 파악하기 위한 연구이다. 가장 큰 관심 요소는 분사량이 박막의 변형에 따른 보조 챔버 내부체적의 변화에 따라 일정한 값을 유지하는 것이다. Tip이 표면에 닿았을 때 tip의 수직이동거리가 $1 \mu\text{m}$ 과 $2 \mu\text{m}$ 인 두 가지 모델로 설정하여 수치해석한 결과, 각각 일정 시간동안 일정한 유속으로 분사됨을 알 수 있었다. 분사시간이 1 sec로 짧은 원인은 박막의 복원력에 의해 원래 상태로 돌아오는 시간을 1 sec로 가정하였기 때문이다. 보조 챔버 내

부 체적 감소에 따라 분사시간 동안 일정한 유량이 분사되는 것을 확인할 수 있었으며, 복원시간을 증가시킴으로서 분사시간을 증가시킬 수 있다. 박막이 정지한 상태에서는 채널로부터 지속적으로 유체가 공급되는 것을 볼 수 있다. 그러나 작동이 끝난 후에는 유체의 공급이 중지되어야 하기 때문에 출구 간극을 변화시켜 유체의 공급이 이루어지지 않고 출구에서 정지하는 모델에 대한 연구를 진행할 것이다.

보조 챔버의 입구와 출구부분을 제외한 나머지 모서리 부분에서 속도가 거의 없는 사공간이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 실질적인 분사에 있어서 유량 손실뿐 아니라 공간적인 손실을 가져올 것으로 판단된다. 따라서 보조 챔버의 형상을 원형 또는 타원형으로 변형하는 것이 모서리에서의 손실을 줄일 수 있는 형상으로 사료되며, 팁의 위치가 보조챔버의 끝단으로 이동하는 것이 분사 효율을 높일 수 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2005년도 21세기 프론티어 나노메카트로닉스 사업단 (과제번호: 2005-0083) 연구기금으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) K.-H. Kim, C. Ke, N. Moldvan and H. D. Espinosa, 2003, "Massively Parallel Multitip Nanoscale Writer with Fluidic Capabilities-Fountain Pen Nanolithography (FPN)", Proceedings of the 4th International Symposium on MEMS and Nanotechnology, pp. 235~238.
- (2) S. Deladi, J. W. Berenschot, N. R. Tas, G. J. M. Krijnen, J. H. de Boer, M. J. de Boer and M. C. Elwenspoek, 2005, "Fabrication of Micromachined Fountainpen with in Situ. Characterization Possibility of Nanoscale Surface Modification", J. Micromech. Microeng., Vol. 15, pp. 528~534.
- (3) D. Bullen, X. Wang, J. Zou, S. W. Chung, C. A. Mirkin, and C. Liu, 2004, "Design, Fabrication, and Characterization of Thermally Actuated Probe Arrays for Dip Pen Nanolithography", J. Microelectromech. System, Vol. 13, pp. 594~602.
- (4) F. M. White, 2003, "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, fifth edition, pp. 138~147.
- (5) A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, 1998, "A Numerical Design Study of the Valveless Diffuser Pump Using a Lumped-mass Model", J. Micromech. Microeng., Vol. 9, pp. 34~44.
- (6) M. Richer, R. Linnemann and P. Woias, 1998, "Robust design of gas and liquid micropumps", J. Sensors and Actuators A 68, pp. 480~486.
- (7) L.-J. Yang, T.-J. Yao and Y.-C. Tai, 2004, "The Marching Velocity of the Capillary Meniscus in a Microchannel", J. Micromech. Microeng., Vol. 14, pp. 220~225.