

나노 파운틴펜의 동적해석에 관한 연구

A Study on Dynamic Analysis of Nano Fountain Pen

이영관†·김훈모, 김윤제*·이석한**

Young-Kwan Lee, Hun-Mo Kim, Youn-Jae Kim, Suk-Han Lee

Key Words : Fountain Pen Nano-Lithography(나노 파운틴펜), Nano Patterning(나노 패터닝), Active Membrane Pumping(능동적 박막 펌핑)

ABSTRACT

In this study, flow characteristics of the FPN (Fountain Pen Nano-Lithography) using active membrane pumping are investigated. This FPN has integrated chamber, micro channel, and high capacity reservoir for continuous ink feed. The most important aspect in this probe provided control of fluid injection using active membrane pumping in chamber. The flow rates in channel by capillary force are theoretically analyzed, including the control of mass flow rates by deflection of membrane. The above results are compared with numerical simulations that calculated by commercial code, FLUENT. The velocity of fluid in micro channel shows linear behaviors. And the mass flows are proportional to the second order function of pumping pressure that is imposed to membrane.

기 호 설 명

- γ : 표면장력 (N/m)
- p : 압력 (Pa)
- F : 힘 (N)
- A : 면적 (m²)
- u : 속도 (m/s)
- ρ : 밀도 (kg/m³)
- G : 중력가속도 (m/s²)
- V : 체적 (m³)
- Q : 체적유량 (m³/s)

1. 서 론

AFM (Atomic Force Microscopy)은 본래 나노 스케일 로 표면 물성을 측정하기 위해 개발되었다(1). 하지만 현재

는 초기 목적과 달리 표면 물성 변형(2), 나노 리소그래피 (3, 4) 등과 같은 분야에도 적용되고 있다. 이 중 나노 리소 그래피는 대표적인 나노 패터닝 기술인데, 반도체 회로 등의 집적도 향상을 위해서는 현재 수십 나노 스케일의 선포이 요구되고 있다.

나노 패터닝 방식 중 현재 가장 선도적이라고 볼 수 있는 DPN (Dip-pen Nano Lithography)은 반응 표면에 물리- 화학적 변화를 일으킬 수 있는 액체를 팁의 표면에 코팅시 키고 근접시키면서 접촉 시점이 될 때 액체와 반응 표면 사 이에 표면 장력에 의한 매니스커스 (meniscus)가 생기고 용액을 따라 잉크가 반응 표면으로 이송하게 된다. 이 때 AFM 장비를 통해 팁을 제어함으로써 미세 패터닝을 하는 방식으로 다중의 일반 AFM 팁을 이용하여 패터닝 하기 때 문에 빠른 공정이 가능하다(5, 6). 하지만 현재 DPN 형태의 패터닝 기술은 팁 표면에 맺히는 잉크의 양에 한계가 있으 므로 광대역의 패터닝을 위해서는 코팅을 위해서 빈번한 탈 착이 필요하고 작업 도중 중단해야하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 잉크 주입 장치를 별도로 구성한 마이크로 피펫에 의한 공정 등이 소개된바 있다(7-9). 그러나 구조상 작은 패터닝 속도의 결점을 가지고 있기 때문에 이 역시 DPN과 마찬가지로 Millipede(10)나 MEMS plotter(11)와 같이 수백 개의 다중 팁 구조로의 보완에 그쳤다.

† 성균관대학교 대학원
E-mail : kimhm@me.skku.ac.kr
Tel : (031) 290-7450, Fax : (031) 290-7666

* 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 정보통신공학부

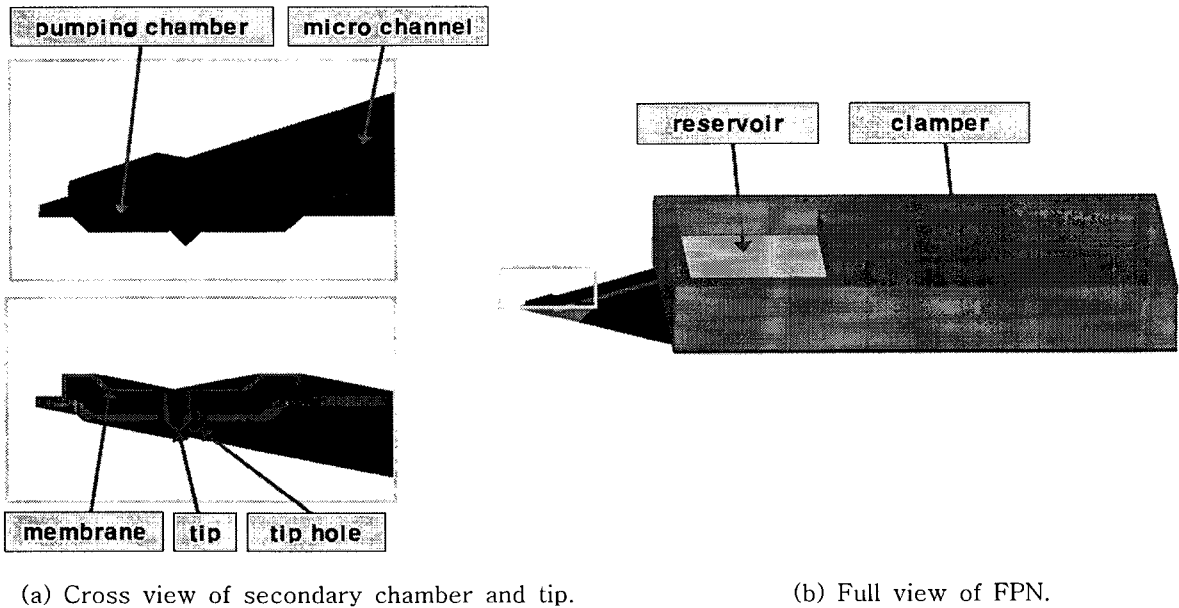


Fig. 1 Schematic of the nano fountain-pen.

이러한 빈번한 탈착에 의한 단점을 극복하기 위해 FPN (Fountain Pen Nano-Lithography)이 제안되었다. 현재 제안된 FPN 중 첫 번째 방식은 다중 팁에 대용량 저장조로부터 모세관 현상을 통해 각각의 채널로 유체를 공급해주고 채널 내부의 모세관 현상만을 통해 팁의 끝까지 이송 및 분사를 수행하는 방식이 있다(12). 하지만 이 방식은 분사량의 제어가 팁과 반응 표면 간의 접촉 시간으로만 이루어진다는 단점이 있다. 또 다른 방식은 두 개의 팁이 하나의 조합으로 유체 분사와 반응 표면의 측정을 동시에 수행하게 된다. 이는 토출구를 FIB (Focused Ion Beam)를 이용해 가공한 방식으로 저장조의 개념과 이송 방식은 동일하다(13). 그러므로 이 방식 역시 분사량 제어는 팁의 접촉 시간을 통해서만 가능하다.

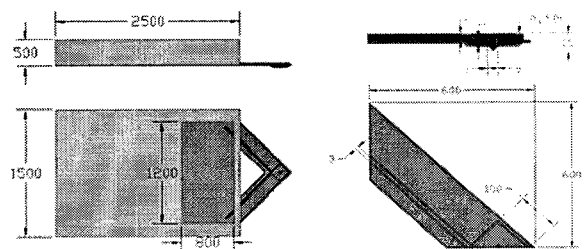
그러나, 본 연구에서 적용한 능동적 박막 펌핑을 이용한 FPN은 Fig. 1과 같이 대용량 저장조 (reservoir)와 클램퍼 (clammer), 마이크로 채널 (micro channel), 팁 (tip), 펌핑을 위한 박막 (active membrane pumping)과 펌핑 챔버 (pumping chamber) 등의 구성을 통해 지속적인 용액의 공급을 가능케 하였고 팁의 반발력에 의한 박막 펌핑을 이용한 펌핑 챔버 내부의 압력차를 통한 분사이므로 분사량 및 패턴 사이즈의 제어가 가능하다. 또한 팁이 나노 스케일이기 때문에 나노 범위에서의 패턴링이 가능하다.

박막 펌핑을 이용한 FPN은 제작 공정이 복잡하고 고가이기 때문에 시제품 제작에 앞서 해석적 연구가 요구된다. 본 연구에서는 주저장조에서 토출구까지 마이크로 펌핑 및 모세관 현상 등을 고려한 이론적 유동 특성해석과 상용코드인 FLUENT를 통한 시뮬레이션 결과와 비교하여 FPN의 제작 전 작동원리의 타당성에 대한 사전 검증을 하고자 한다.

2. 작동 원리

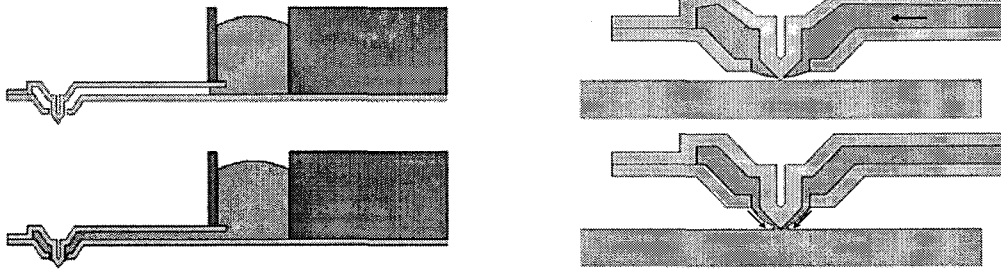
박막 펌핑을 이용한 FPN은 크게 팁과 펌핑 챔버 및 채널이 위치한 캔틸레버 부분, 대용량 저장조가 위치한 AFM 장비에 로딩을 위한 파이렉스 클램퍼 부분으로 나눌 수 있다. 본 구조물은 MEMS 공정을 이용하여 제작되며 캔틸레버는 PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)를 이용하여 SixNy를 증착한다. 펌핑 챔버를 구성하기 위한 박막은 마찬가지로 SixNy를 이용했으나 펌핑을 위한 가압에 대한 충분한 탄성력과 박막의 평탄도와 순도를 높이기 위해 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하게 된다(14). 그리고 파이렉스 클램퍼 부분은 SixNy로 만들어진 구조물에 별도 공정을 통해 제작된 파이렉스를 본딩하여 최종 형상을 구현한다.

Fig. 2는 디자인된 형상의 모델링 및 시뮬레이션을 위해 개략적으로 기술한 치수이다. 그 중 Fig. 2(a)에서 클램퍼의 사이즈는 AFM 장치에 로딩을 위해 적합한 치수로 정하였고



(a) AFM loading part and (b) Tip and cantilever reservoir [unit: μm].

Fig. 2 Configuration of the fountain-pen.



(a) Flow from reservoir to pumping chamber. (b) Injection of fluid by the deflection of membrane.

Fig. 3 Schematic of the working mechanism of nano fountain-pen.

Fig. 2(b)에서 캔틸레버는 기존 AFM 팁에 사용되는 삼각형 태의 캔틸레버 치수를 적용하였다(15).

기존의 FPN 방식과 비교했을 때 본 연구에서 사용한 대용량 저장조와 마이크로 채널 구조는 동일하다. Fig. 3(a)와 같이 대용량 저장조에 공급된 유체는 팁과 펌핑을 위한 펌핑 챔버로의 이송을 위해 마이크로 채널을 거치게 된다. 미세 구조 상에서 중력장의 영향은 미미하므로 무시하며 채널 내부면의 모세관 현상에 의해 이송되는 메커니즘만을 고려한다. 마이크로 채널을 통해 이송된 유체는 펌핑 챔버를 채우게 된다. 그리고, Fig. 3(b)와 같이 팁에 가해진 기계적인 압력은 팁과 연결된 펌핑 챔버의 덮개부분을 이루고 있는 Si₃N₄ 재질의 박막에 변형을 주게 되고 결국 이는 펌핑 챔버 내부 압력 변화에 영향을 준다. 이 때 내부에 채워진 잉크는 팁에 가해지는 압력에 따라 일정량이 분사하게 된다.

3. 모델링

3.1 채널 유동

(1) 모세관력

Fig. 4 예시와 같이 정상 상태에서 액체가 고체 표면과 채널 내부의 기체 상태에 동시에 접촉했을 경우 접촉각 0~180°사이의 θ_c 를 갖게 된다. 이 때 세 가지 표면장력은 γ_{sg} (고체와 기체 사이의 표면장력), γ_{lg} (액체와 기체 사이의 표면장력) 및 γ_{sl} (고체와 액체 사이의 표면장력)로 이루어진다. 이러한 세 가지 표면장력에 대한 힘의 균형은 다음과 같은 Young의 수식으로 표현된다(16).

$$\gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta_c = \gamma_{sg} \quad (1)$$

또한 액체와 기체 사이의 압력차 Δp_{la} 는 식 (2)와 같이 Laplace 식으로 표현된다(17).

$$\Delta p_{la} = \frac{\gamma_{la}}{r} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

위 식을 통하여 모세관력으로 인한 마이크로 채널 내부의 액체와 기체의 압력차는 다음과 같이 표현된다[18].

$$\Delta p_{la} = \frac{2(h+w)\gamma_{la} \cos \theta_c}{wh} \quad (3)$$

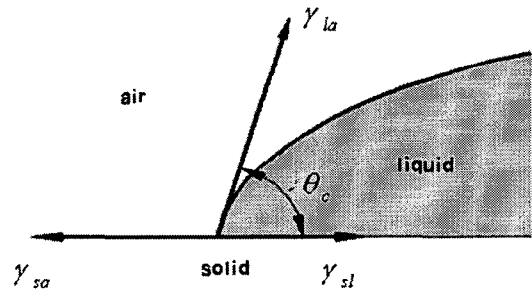


Fig. 4 The liquid/solid/air interface of a droplet

(2) 모세관 메니스커스의 진행

Fig. 5는 채널 내부 유동에 대해 도식화한 것으로 h 는 채널 높이, H 는 채널 중앙점으로부터의 대용량 저장조에 저장된 유체 수심을 각각 나타낸다.

여기서 유체 메니스커스의 진행은 비압축성 Navier-Stokes 방정식에 의해 표현된다. 이를 수평상태의 속도 변위 u 만 있다고 가정할 경우 미분 방정식을 통해 모세관 메니스커스의 진행을 $L(t)$ 로 표현할 수 있다.

연속 방정식:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0; (\Rightarrow u = u(y, t)) \quad (4)$$

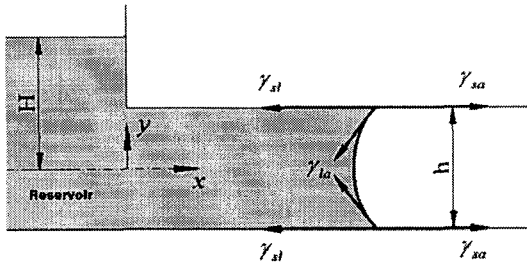


Fig. 5 The configuration of a micro channel.

운동량 방정식:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{1}{L(t)} \left[\rho GH + \frac{2(h+w)(\gamma_{sa} - \gamma_{sl})}{wh} \right] \quad (6)$$

메니스커스 진행 변위:

$$u(0,t) = \frac{dL(t)}{dt} \quad (7)$$

경계조건:

$$u\left(\frac{h}{2}, t\right) = 0, \text{ (no-slip 경계조건)} \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(0,t) = 0, \text{ (대칭조건)} \quad (9)$$

초기조건:

$$u(y,0) = 0; \quad L(0) = L_0 \quad (10)$$

위 식을 통하여 다음과 같이 진행 변위를 시간에 대해 제곱근 형태로 간단화 할 수 있다.

$$L(t) = \sqrt{L_0^2 + Ct} \quad (11)$$

여기서 C는 확산 계수이며 다음 식으로 표기된다(18).

$$C = \frac{h^2}{4\mu} \left[\rho GH + \frac{2(\gamma_{sa} - \gamma_{sl})}{h} \right] \quad (12)$$

3.2 박막 펌핑

박막 변형에 대한 모델링은 Fig. 6과 같이 먼저 내부에 유체가 채워지면서 작용되는 펌핑 챔버 내부의 압력 변화에 의한 변형과 턱에 작용하는 집중하중에 의한 변형을 들 수 있다. 여기서 F는 턱에 가해지는 집중하중이고, p는 펌핑 챔버 내의 유체 유입에 따른 압력을 나타낸다. 또한 박막의 네 모서리는 고정된 것으로 가정하였다.

이 두 변형에 공통적으로 적용되는 식은 평판에 작용하는 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p_z(x,y)}{D} \quad (13)$$

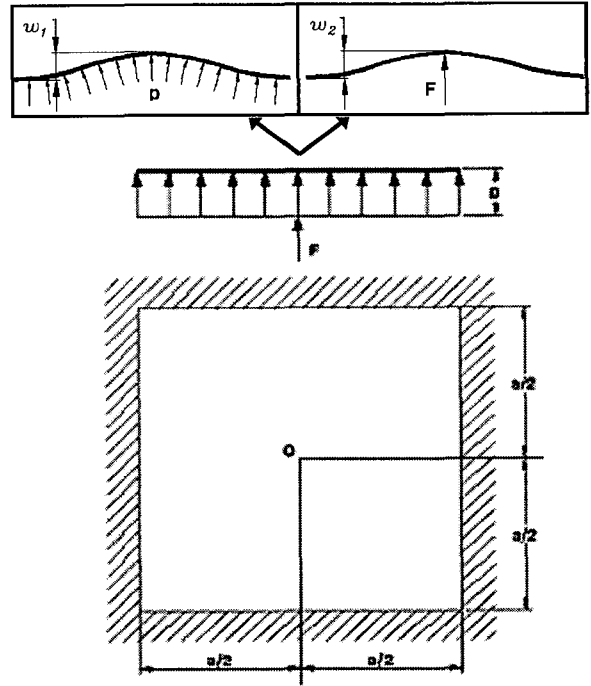


Fig. 6 Schematic of the concentration and distribution load activated membrane.

여기서 D는 박막의 연성강도로 다음과 같다.

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (14)$$

경계조건:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \text{ (경계면 모두 고정)} \quad (15)$$

(1) 펌핑 챔버 내 유체압에 의한 박막의 변형

Fig. 6에서 내부압 p에 의한 변형으로써 펌핑 챔버 내의 유체 유입에 따른 압력 변화와 박막 변형과의 관계는 형상이 정사각형일 경우 다음과 같다[19].

$$w_1 = \frac{4pa^4}{D\pi^5} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}}{m^5} \times \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{m\pi}{2}} \right) \quad (16)$$

Table 1. Properties of Si₃N₄.

Young's modulus	85~105 GPa
Poisson's ratio	0.22~0.27
Thickness	0.25 μm

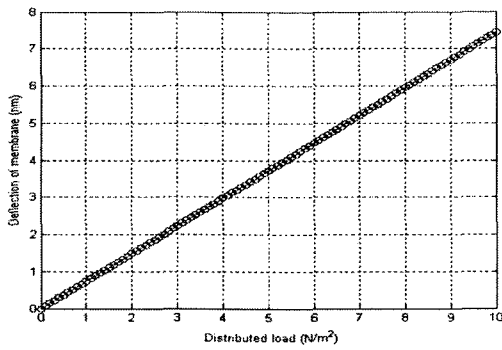


Fig. 7 Deflection of membrane with distributed load at the pumping chamber.

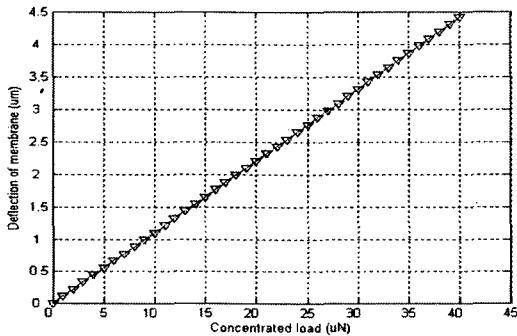


Fig. 8 Deflection of membrane with concentration load at the tip.

여기서 박막의 연성강도는 $D \approx 1.05 \times 10^{-9} N \cdot m$ 이고, 파운틴 팬에 적용한 박막 재료는 SixNy이며, 물성치는 Table 1과 같다.

앞서 계산한 채널 내부압에 대한 박막의 변형량을 Matlab를 통해 이론적으로 해석한 결과는 Fig. 7과 같다.

(2) 팁에 가해지는 압력에 의한 박막의 변형

Fig. 6에서 집중하중 F 에 의한 변형으로써 펌핑을 위해 팁에 가해지는 압력과 박막 변형과의 관계는 앞서와 마찬가지로 형상이 정사각형일 경우 다음과 같다.

$$w_2 = \frac{Fa^2}{2D\pi^3} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^3} \times \left(\tanh \frac{m\pi}{2} - \frac{\frac{m\pi}{2}}{\cosh^2 \frac{m\pi}{2}} \right) \quad (17)$$

이 때 Matlab를 통해 계산한 변형량은 Fig. 8에 도시하였다.

두 결과를 비교했을때 펌핑 챔버 내 유체 유입에 따른 박막 변형은 펌핑을 위한 집중 하중에 의한 변형에 비하면 미미함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 분사에 관한 모델링에서 집중하중 만을 고려하였다.

(3) 박막 펌핑을 통한 유체의 분사

분사압은 챔버 내부의 용적 변화로 인한 압력 차이를 이용하여 모델링 하였다. 여기서 채널을 통한 유체 유입에 의한 압력 차이는 앞서 계산한 바와 같이 매우 작기 때문에 박막 변형에 따른 용적변화는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다(19).

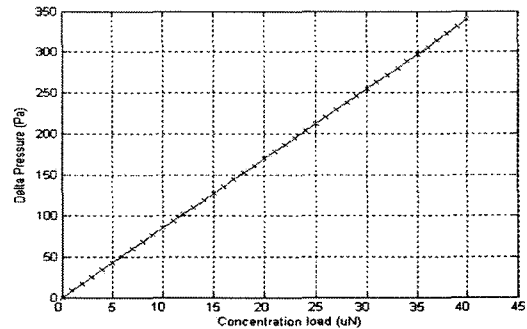


Fig. 9 Injection pressure distribution with concentration load at the tip.

$$\Delta V = A \frac{Fa^2}{2D\pi^3} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^3} \times \left(\tanh \frac{m\pi}{2} - \frac{\frac{m\pi}{2}}{\cosh^2 \frac{m\pi}{2}} \right) \quad (18)$$

작동 유체가 물일 경우, 위 식을 이용하면 물의 압축률은 $E=218 \text{ kgf/cm}^2$ 이므로 다음 식을 이용하여 팁의 인가압에 따른 차압을 구할 수 있다.

$$\Delta P = E \times \frac{\Delta V}{V} \quad (19)$$

Fig. 9는 팁에 가해지는 집중하중에 의한 분사압 변화를 나타낸 것이다.

또한 질량유량은 $\dot{m} = \rho A \vec{u}$ 이고 인입속도와 압력과의 관계는 베르누이 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\vec{u}_{in} = \sqrt{\frac{-2P_{in}}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_{in}}{A_{out}} \right)^2 \right]}} \quad (20)$$

4. 결과 및 고찰

(1) 채널부

정상 상태, 층류 유동일 경우 물과 내부 표면은 no-slip 상태로 접촉각은 83° 로 가정하였으며, 유입구 압력은 대기압 상태로 설정하였다. Fig. 10은 상용코드인 FLUENT를 이용하여 구한 속도벡터를 나타낸다.

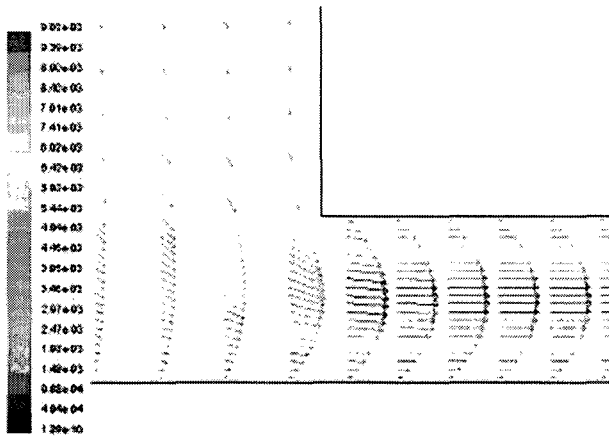


Fig. 10 Two-dimensional velocity vector distributions from the reservoir to channel.

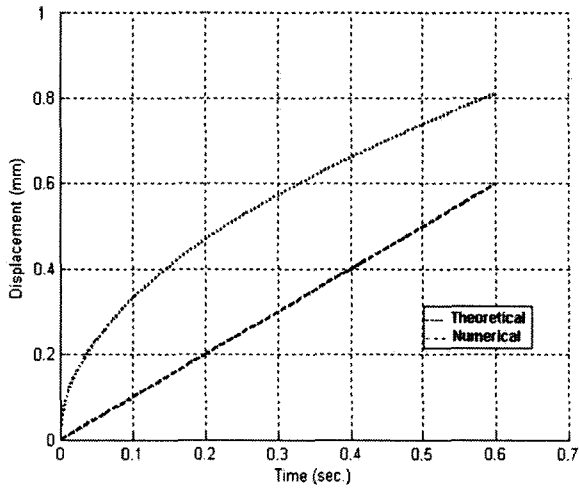


Fig. 11 Comparison of the theoretical and numerical results of the transient flowing displacement.

위와 같은 시뮬레이션 결과와 앞서 계산한 모델링의 이론적인 결과를 Fig. 11에 비교하였다. 이 때 $\gamma_{sa} - \gamma_{st} = \gamma_{la} \cos \theta_c$ 이고 표면 장력 크기는 $\gamma_{la} = 0.073 \text{ N/m}$ 이며 물과 SixNy의 접촉각은 $\theta_c = 83^\circ$ 로 하였다.

그림에서 채널 내부에서 시간에 따른 유체 이동 변위는 이론적 해석을 통한 결과와 시뮬레이션 결과가 1 mm/s 유속으로 유사함을 알 수 있다. 이 때 시간경과에 따라 차이가 줄어드는 것은 대용량 저장조에서 채널 내부로 유입되는 지점의 형상이 수직을 이루기 때문에 정체 영역이 생기는 것으로 판단할 수 있다.

(2) 박막 펌핑부

과운틴 펌은 Fig. 6과 같이 박막 모서리가 고정되어 있기 때문에 팁에 압력이 가해지면 박막이 곡면 형태로 변형된다. 그러나 본 연구에서는 박막의 넓이 ($100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$)에 비해 수직 이동거리 ($1 \sim 2 \mu\text{m}$)가 매우 작기 때문에 Fig. 12와 같이 박막이 수직으로 일정한 속도 ($1 \mu\text{m/s}$)로 이동하여 펌핑 챔버 내부에 균일한 분포하중이 가해지는 것으로 가정하였다. 또한 해석에 사용한 펌핑 챔버의 전체 체적은 $L \times W \times H$ ($100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$)이고 입구와 출구의 면적은 각각 $9 \mu\text{m}^2$, $108 \mu\text{m}^2$ 이다.

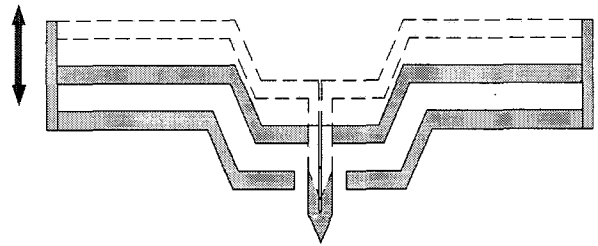


Fig. 12 Schematic of the membrane movement.

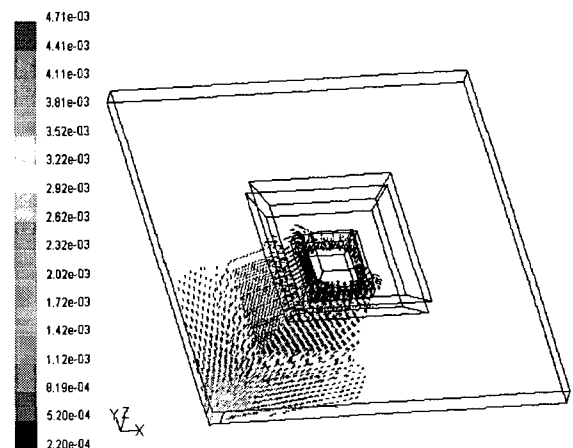


Fig. 13 Distributions of the velocity vector fields.

속도 벡터장은 Fig. 13에 도시하였는데, 이를 유량에 관한 data로 변환하여 앞서 분석한 이론적 해석 결과와 비교하면 Fig. 14와 같다. 결과를 볼 때 압력 변화에 따른 질량

유량이 이론적인 것과 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 앞서 계산한 박막 변형을 위해 가해지는 압력과 유량에 관한 관계를 얻을 수 있다.

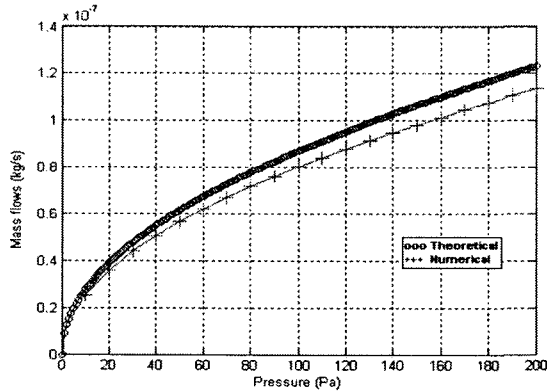


Fig. 14 Comparison of the theoretical and numerical results of the mass flow rates with pressure variations.

5. 결론

모세관력만을 이용하여 분사하는 기존의 방식과 같이 팁의 접촉 시간에만 의존할 경우 유체 및 반응 표면의 상태에 따른 분사량 예측은 거의 불가능하다. 그러므로 강제적인 분사를 통해서 분사량의 예측 및 제어가 필요하다. 본 연구에서는 파운틴 펜의 제작과 실험에 앞서 시뮬레이션 연구를 수행함으로써 수 μm 단위의 파운틴 펜 내부 유동특성을 분석하였고, 대용량 저장조에서 펌핑 챔버 간의 유체 이송이 모세관력을 통해서 가능함을 보였다. 또한 분사량이 팁의 가압에 따른 박막 변형에 대해 선형적으로 분사량이 증가함을 볼 수 있었다.

향후 보다 다양한 입계 차원에 대한 시뮬레이션을 수행하여 최적의 파운틴 펜 형상을 설계하고 실험적 검증을 통한 실제 파운틴 펜의 제작에 있어서 보다 원활한 공정과 제작비용의 절감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2005년도 21세기 프론티어 나노메카트로닉스 사업단 연구기금으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Binning, G., Quate, C. F. and Gerber, Ch., 1986, "Atomic force microscope," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 56 pp. 930~933
- (2) Bhushan, B., Israelachvili, J. N. and Landman, U., 1995, "Nanotribology: friction, wear and lubrication at atomic scale," *Nature*, Vol. 374, pp. 607~616
- (3) Piner, R. D., Zhu, J., Xu, F., Hong, S. and Mirkin, C. A., 1999, "Dip-pen nanolithography," *Science*, Vol. 283, pp. 661~663
- (4) Meister, A., Jeney, S., Liley, M., Akiyama, T., Stauer, U., de Rooij, N. F. and Heintzelmann, H., 2003, "Nanoscale dispensing of liquids through cantilevered probes," *Microelectron. Eng.*, Vol. 67~68, pp. 644~650
- (5) Hong, S., Zhu, J., and Mirkin, C. A., 1999, "Multiple Ink Nanolithography: Toward a Multiple-Pen Nano-Plotter," *Science*, Vol. 286, pp. 523~525
- (6) Hong, S. and Mirkin, C. A., 2000, "A nanoplotter with both parallel and serial writing capabilities," *Science*, Vol. 288, pp. 1808~1811
- (7) Lewis, A., Kheifetz, Y., Shambrodt, E., Radko, A., Khachatryan, E., and Sukenik, C., 1999, "Fountain pen nanochemistry: Atomic force control of chrome etching," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 17, pp. 2689~2691
- (8) Shalom, S., Lieberman, K., Lewis, A., Cohen, S. R., 1992, "A micropipette force probe suitable for near-field scanning optical microscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 63, No. 9, pp. 4061~4065
- (9) Lieberman, K., Lewis, A., Fish, G., Shalom, S., Jovin, T. M., Schaper, A., Cohen, S. R., 1994, "Multifunctional, micropipette based force cantilevers for scanned probe microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, No. 5, pp. 648~650
- (10) Vettiger, P., Despont, M., Drechsler, U., Durig, U., Haberle, W., Lutwyche, M. I., Rothuizen, H. E., Stutz, R., Widmer, R., Binnig, G. K., 2000, "The Millipede - More than one thousands tips for future AFM data storage," *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 44, No. 3, pp. 323~340, 2000
- (11) Zhang, M., Bullen, D., Chung, S.-W., Hong, S., Ryu, K. S., Fan, Z., Mirkin, C. A., Liu, C., 2002, "A MEMS nanoplotter with high-density parallel dip-pen nanolithography probe array," *Nanotechnology*, Vol. 13, pp. 212~217

(12) Kim, K. H., Ke, C., Moldovan, N. and Espinosa, H. D., 2003, "Massively parallel multi-tip nanoscale writer with fluidic capabilities—fountain pen nanolithography (FPN)" Proc. 4th Int. Symp. on MEMS and Nanotechnology, pp. 235~238

(13) Deladi, S., Berenschot, J. W., Tas, N. R., Krijnen, G. J. M., de Boer, J. H., de Boer, M. J. and Elwenspoek, M. C., 2005, "Fabrication of micromachined fountain pen with in situ characterization possibility of nano scale surface modification," J. Micromech. Microeng., Vol. 15, pp. 528~534

(14) Madou, M. J., 2002, "Fundamentals of Microfabrication The Second Edition," CRC, pp. 148

(15) Sader, J. E., 1995, "Parallel beam approximation for V-shaped atomic force microscope cantilevers," Rev. Sci. Instrum., Vol. 66, pp. 4583~4587

(16) Colgate, E. and Matsumoto, H., 1990, "An Investigation of Electro-Wetting-Based Microactuation," J. Vac. Sci. Technol., Vol. A8, pp. 3625~3633

(17) Sobolev, V. D., "Surface Tension and Dynamic Contact Angle of Water in Thin Quartz Capillaries," J. Colloid Interface Sci., Vol. 222, pp. 51~54

(18) Yang, Lung-Jieh, Yao, Tze-Jung and Tai, Yu-Chong, 2004, "The marching velocity of the capillary meniscus in a microchannel", J. Micromech. Microeng. Vol. 14, pp. 220~225

(19) Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S., 1959, "Theory of Plates and Shells The Second Edition", McGRAW-HILL New York.