

< 논문 >

## 능동적 박막 펌핑에 의한 파운틴 펜 나노 리소그래피 유동 특성에 관한 연구

이진형\* · 이영관\* · 이성근\* · 이석한\*\* · 김윤제\*\*\* · 김훈모\*\*\*\*  
(2005년 10월 27일 접수, 2006년 6월 17일 심사완료)

### A Study on Flow Characteristics of Fountain-pen Nano-Lithography with Active Membrane Pumping

Jin Hyoung Lee, Young Kwan Lee, Sung Kun Lee, Suk Han Lee,  
Youn Jea Kim and Hun Mo Kim

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

#### Abstract

In this study, the flow characteristics of a FPN (Fountain Pen Nano-Lithography) using active membrane pumping are investigated. The 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 the mass flow rates by the deflection of the membrane. The above results are compared with the numerical simulations that calculated by commercial code, FLUENT. The velocity of the fluid in micro channel shows linear behaviors. And the mass flows are proportional to the second order function of the pumping pressure that is imposed to the membrane.

#### 기호설명

$\gamma$  : 표면장력(N/m)  
 $p_{ch}$  : 채널 내부 유동압력(Pa)  
 $F$  : 힘(N)  
 $A$  : 채널 단면적(m<sup>2</sup>)  
 $u$  : 속도(m/s)  
 $\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $G$  : 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)  
 $V$  : 체적(m<sup>3</sup>)

$Q$  : 체적유량(m<sup>3</sup>/s)  
 $r$  : 채널 반지름(m)  
 $w_c$  : 채널 폭(m)  
 $\mu$  : 점성계수(Pa·s)  
 $h_t$  : 박막 두께(m)  
 $\nu$  : 프와슬비  
 $p$  : 챔버 내부 압력(Pa)  
 $A_{mem}$  : 박막 면적  
 $E$  : 탄성계수(Pa)  
 $w_{1,2}$  : 수직 박막 변형량(m)

† 책임저자, 회원, 성균관대 대학원 기계공학부

\* 성균관대 대학원 기계공학부

\*\* 성균관대 정보통신공학부

\*\*\* 회원, 성균관대 기계공학부

\*\*\*\* 회원, 성균관대 기계공학부

E-mail : kimhm@me.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7450 FAX : (031)290-7666

#### 1. 서론

AFM (Atomic Force Microscopy)은 나노 스케일로 표면 물성을 측정하기 위해 개발되었다.<sup>(1)</sup> 현재는 초기 목적과 달리 표면 물성 변형,<sup>(2)</sup> 나노

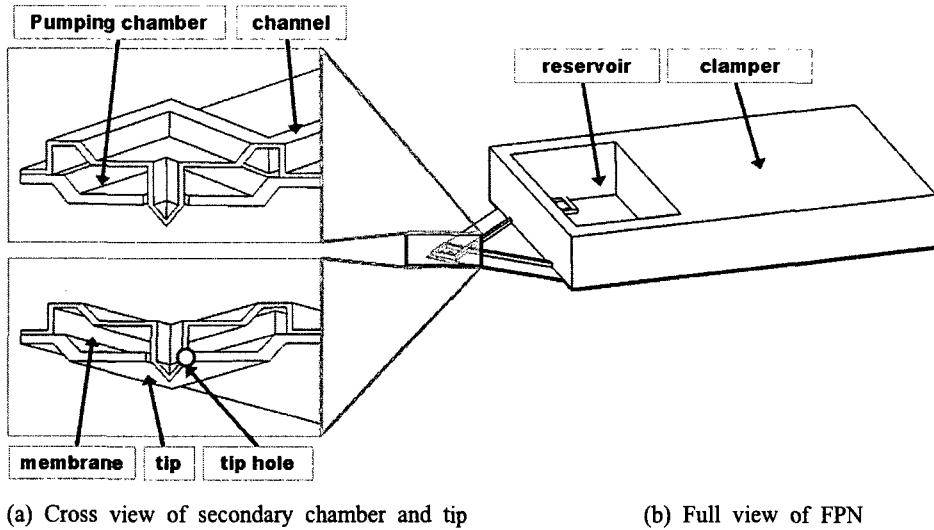


Fig. 1 Schematic of the nano fountain-pen

리소그래피<sup>(3,4)</sup> 등과 같이 다양한 분야 적용되고 있다. 이 중 나노 리소그래피는 대표적인 나노 패터닝 기술로 반도체 회로 등의 집적도 향상을 위해서는 현재 수십 나노 스케일의 선평이 요구된다.

나노 패터닝 방식인 DPN(Dip-pen Nano Lithography)은 반응 표면과 팁이 접촉할 때 액체와 반응 표면 사이에 표면 장력에 의한 메니스커스(meniscus)가 발생하여 잉크가 반응 표면으로 이동하는 원리를 이용한다. 이 때, AFM 장비를 통해 팁을 제어함으로써 미세 패터닝이 가능하고, 다중의 일반 AFM 팁을 이용하여 패터닝하기 때문에 공정이 빠르다는 장점이 있다.<sup>(5,6)</sup> 하지만 현재 DPN 형태의 패터닝 기술은 팁 표면에 맺히는 잉크의 양에 한계가 있기 때문에 빈번한 탈착이 필요하고 작업 도중 중단해야 하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 잉크 주입 장치를 별도로 구성한 마이크로 피펫에 의한 공정 등이 연구되었다.<sup>(7-9)</sup> 그러나 구조상 패터닝 속도가 느리기 때문에 이 역시 DPN과 마찬가지로 Millipede<sup>(10)</sup>나 MEMS plotter<sup>(11)</sup>의 연구결과와 같이 수백 개의 다중 팁 구조로의 보완에 그쳤다.

이러한 단점을 극복하기 위해 FPN(Fountain Pen Nano-Lithography)이 제안되었다. 현재 제안된 FPN은 채널 내부의 모세관 현상만을 통해 팁의 끝까지 이송 및 분사를 수행하는 방식<sup>(12)</sup>과 두 개의 팁이 하나의 조합으로 유체 분사와 반응 표면

의 측정을 동시에 수행하는 방식<sup>(13)</sup>이 있으나, 두 방식 모두 분사량 제어가 팁의 접촉 시간을 통해서만 가능하다는 단점이 있다.

본 연구에서 적용한 능동적 박막 펌핑을 이용한 nano fountain-pen은 Fig. 1과 같이 대용량 저장조(reservoir)와 클램퍼(clamper), 마이크로 채널(micro channel), 팁(tip), 펌핑을 위한 박막(active membrane pumping)과 펌핑 챔버(pumping chamber) 등의 구성을 통해 지속적인 용액의 공급을 가능하다. 팁의 반발력에 의해 펌핑 챔버 내부의 압력차가 발생하고, 이를 통해 분사하므로 분사량 및 패턴 사이즈의 제어가 가능하다. 또한 팁이 나노 스케일이기 때문에 나노 범위에서의 패터닝이 가능하다.

박막 펌핑을 이용한 nano fountain-pen은 제작 공정이 복잡하고 고가이기 때문에 시제품 제작에 앞서 해석적 연구가 요구된다. 본 연구에서는 주 저장조에서 토출구까지 마이크로 펌핑 및 모세관 현상 등을 고려한 유동 특성해석을 통해 nano fountain-pen의 제작 전 작동원리의 타당성에 대한 사전 검증을 하고자 한다.

## 2. 작동원리

박막 펌핑을 이용한 nano fountain-pen은 크게 팁과 펌핑 챔버 및 채널이 위치한 캔틸레버 부분, 대용량 저장조가 위치한 AFM 장비에 장착하

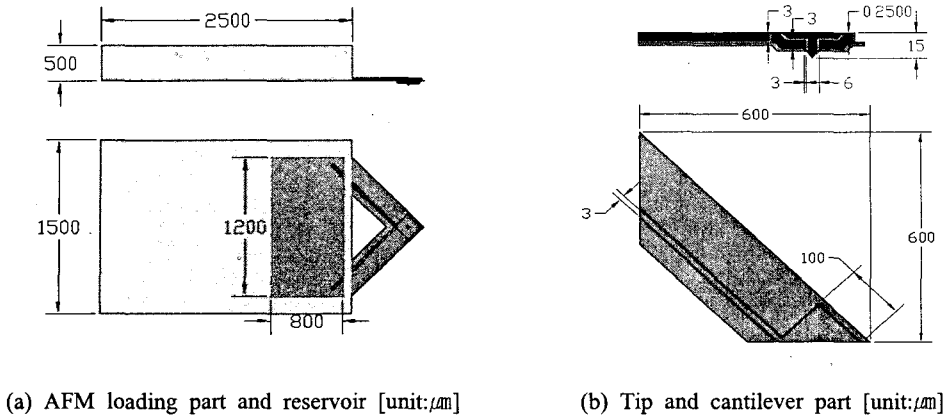


Fig. 2 Configuration of the fountain-pen

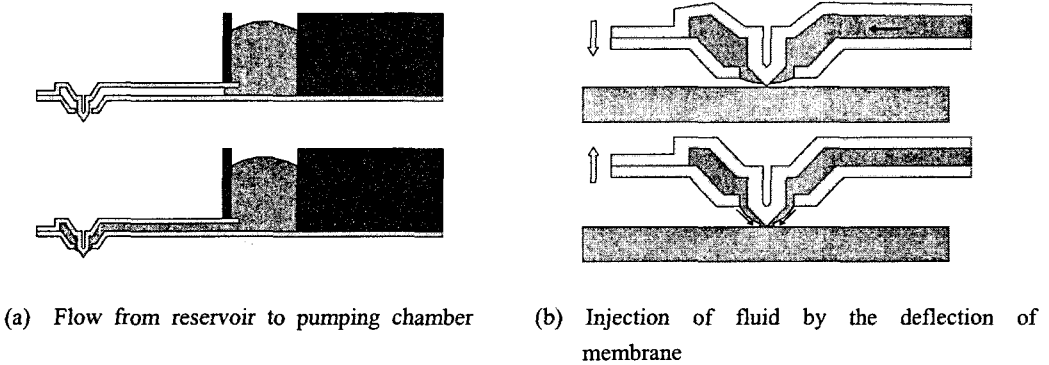


Fig. 3 Schematic of the working mechanism of nano fountain-pen

기 위한 파이렉스 클램퍼 부분으로 나눌 수 있다. Nano fountain-pen은 MEMS 공정을 이용하여 제작되며 캔틸레버는 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)를 이용하여  $Si_xN_y$ 를 증착한다. 펌핑 챔버를 구성하기 위한 박막은 마찬가지로  $Si_xN_y$ 를 이용했으나 펌핑을 위한 가압에 대한 충분한 탄성력과 박막의 평탄도와 순도를 높이기 위해 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)를 이용하였다.<sup>(14)</sup> 그리고 파이렉스 클램퍼 부분은  $Si_xN_y$ 로 만들어진 구조물에 별도 공정을 통해 제작된 파이렉스를 접착하여 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, Fig. 2(b)에

도시한 것과 같이 캔틸레버는 기존 AFM 팁에 사용되는 삼각형태의 캔틸레버 치수를 적용하였다.<sup>(15)</sup>

Fig. 3(a)와 같이 대용량 저장조에 공급된 유체는 팁과 펌핑을 위한 펌핑 챔버로의 이송을 위해 마이크로 채널을 통해 이송되며, 이송된 유체는 펌핑 챔버를 채우게 된다. Fig. 3(b)에서 보여지는 것과 같이 표면과의 접촉으로 인해 팁에 가해진 물리적인 압력은 팁과 연결된 펌핑 챔버의 덮개 부분을 이루고 있는 박막에 변형을 주게 되고, 그에 따라 펌핑 챔버 내부 체적을 변화시킨다. 내부에 채워진 잉크는 챔버 내부의 체적변화에 따라 일정량이 분사하게 된다. 기존의 FPN방법과는 달리 물리력을 이용한다는 점과 대용량 저장조에 의한 지속적인 용액의 공급이 가능하다는 점이 특징이다.

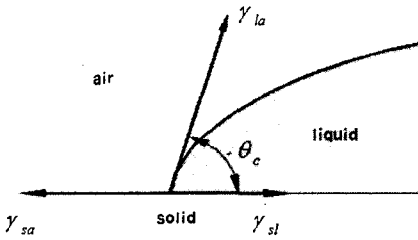


Fig. 4 The liquid/solid/air interface of a droplet

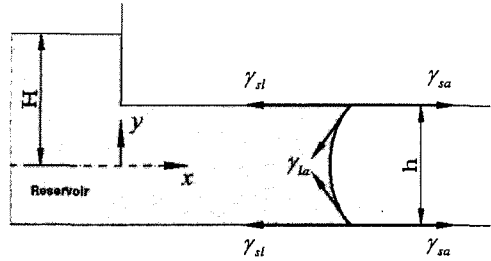


Fig. 5 The configuration of a micro channel

### 3. 모델링

#### 3.1 채널 유동

##### 3.1.1 모세관력

Fig. 4 에서와 같이 정상 상태에서 액체가 고체 표면과 채널 내부의 기체 상태에 동시에 접촉했을 경우 접촉각  $0\sim 180^\circ$  사이의  $\theta_c$ 를 갖게 된다. 이 때 세 가지 표면장력은  $\gamma_{sa}$  (고체와 기체 사이의 표면장력),  $\gamma_{la}$  (액체와 기체 사이의 표면장력) 및  $\gamma_{sl}$  (고체와 액체 사이의 표면장력)로 이루어진다. 이러한 세 가지 표면장력에 대한 힘의 균형은 다음과 같은 Young의 수식으로 표현된다.<sup>(16)</sup>

$$\gamma_{sl} + \gamma_{la} \cos \theta_c = \gamma_{sa} \quad (1)$$

또한 액체와 기체 사이의 압력차  $\Delta p_{la}$ 는 식 (2)와 같이 Laplace 식으로 표현된다.<sup>(17)</sup>

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

위 식을 통하여 모세관력으로 인한 마이크로 채널 내부의 액체와 기체의 압력차는 다음과 같이 표현된다.<sup>(18)</sup>

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

##### 3.1.2 모세관 메니스커스의 진행

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

타낸다.

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

연속 방정식:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

운동량 방정식:

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

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

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.

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

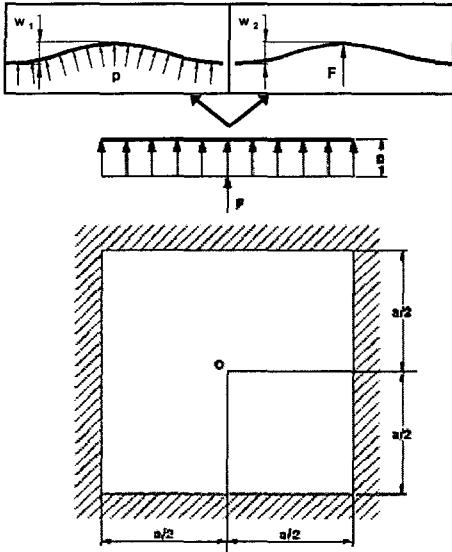


Fig. 6 Schematic of the concentration and distribution load activated membrane

Table 1 Properties of Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>

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

여기서 C는 확산 계수이며 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(18)</sup>

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

3.2 박막 펌핑

박막 변형에 대한 모델링은 Fig. 6과 같이 먼저 내부에 유체가 채워지면서 작용되는 펌핑 챔버 내부의 압력 변화에 의한 변형과 팁에 작용하는 집중하중에 의한 변형이 있다. 여기서 F는 팁에 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.<sup>(19)</sup>

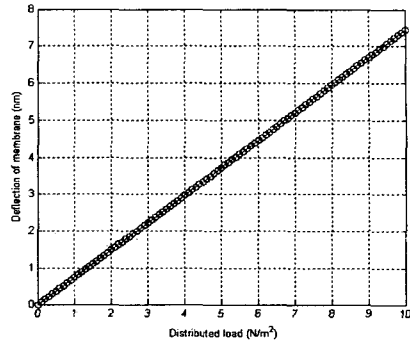


Fig. 7 Deflection of membrane with distributed load at the pumping chamber

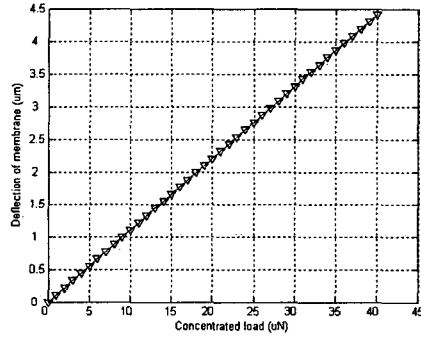


Fig. 8 Deflection of membrane with concentration load at the tip

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

여기서 D는 박막의 연성강도로 다음과 같다.

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

경계조건:

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

3.2.1 펌핑 챔버 내 유체압에 의한 박막의 변형

Fig. 6에서 내부압 p는 채널에서 펌핑 챔버의 유입 시 유체와 기체의 압력차라고 가정하고, 압차에 의한 변형에 따른 펌핑 챔버 내의 유체 유입에 의한 압력 변화와 박막 변형과의 관계는 다음과 같다.<sup>(19)</sup>

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

여기서 박막의 연성강도는  $D \approx 1.05 \times 10^{-9} N \cdot m$  이고, nano fountain-pen에 적용한 박막 재료는  $Si_xN_y$ 이며, 물성치는 Table 1과 같다. 앞서 계산한 채널 내부압에 대한 박막의 변형량을 Matlab를 통해 이론적으로 해석한 결과는 Fig. 7과 같다.

### 3.2.2 팁에 가해지는 압력에 의한 박막의 변형

Fig. 6에서 집중하중  $F$ 에 의한 변형으로써 펌핑을 위해 팁에 가해지는 압력과 박막 변형과의 관계는 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 해석에서 집중하중에 의한 변형만을 고려하였다.

### 3.2.3 박막 펌핑을 통한 유체의 분사

분사압은 챔버 내부의 체적 변화로 인한 압차를 이용하여 모델링 하였다. 여기서 채널을 통한 유체 유입에 의한 압차는 앞서 계산한 바와 같이 미소하기 때문에 박막 변형에 따른 체적변화는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.<sup>(19)</sup>

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

작동 유체가 물 (water liquid)일 경우, 위 식을

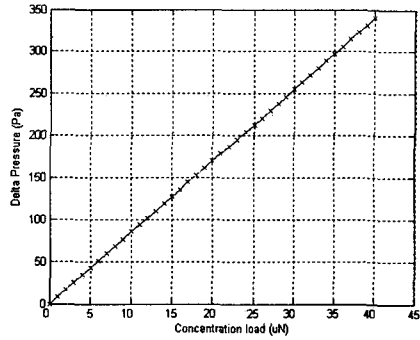


Fig. 9 Injection pressure distribution with concentration load at the tip

이용하면 물의 압축률은  $E_c = 218 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 이므로 다음 식을 이용하여 팁에 가해진 압력에 따른 차압을 구할 수 있다.

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

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

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

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

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 채널부

정상 상태, 층류 유동일 경우 물과 내부 표면은 no-slip 상태로 접촉각은  $83^\circ$ 로 가정하였으며, 유입구 압력은 대기압 상태로 설정하였다. Fig. 10은 상용코드인 FLUENT를 이용하여 대용량 저장조로부터 채널까지의 유동을 2차원으로 계산하여 속도벡터로 표현한 것이다.

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

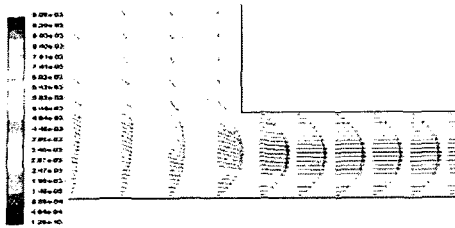


Fig. 10 Two-dimensional velocity vector distributions from the reservoir to channel

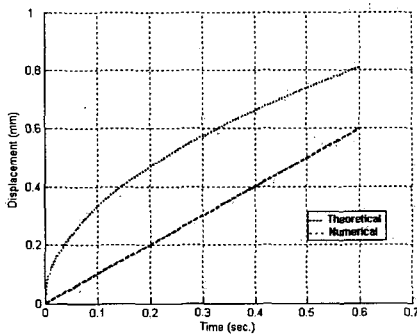


Fig. 11 Comparison of the theoretical and numerical results of the transient flowing displacement

그림에서 채널 내부에서 시간에 따른 유체의 이동 변위는 이론적 해석을 통한 결과와 수치해석 결과가 1mm/s 유속으로 유사함을 알 수 있다.

#### 4.2 박막 펌핑부

Nano fountain-pen은 Fig. 6과 같이 박막 모서리가 고정되어 있기 때문에 팁에 압력이 가해지면 박막이 곡면 형태로 변형된다. 그러나 본 연구에서는 박막의 넓이 (100 $\mu$ m $\times$ 100 $\mu$ m)에 비해 수직 이동거리 (1~2 $\mu$ m)가 매우 작은 값이기 때문에 Fig. 12와 같이 박막이 수직으로 일정한 속도 (1 $\mu$ m/s)로 이동하여 펌핑 챔버 내부에 균일한 분포하중이 가해지는 것으로 가정하였다. 해석에 적용한 펌핑 챔버의 전체 체적은 L $\times$ W $\times$ H(100 $\mu$ m $\times$ 100 $\mu$ m $\times$ 3 $\mu$ m)이다.

상용코드인 FLUENT를 이용하여 3차원 유동장을 해석하였으며, 박막의 움직임에 따른 내부 유동의 변화를 보기 위해 DMM(Dynamic Mesh update Method)를 이용하였다. 해석결과를 Fig. 13에 속도 벡터장으로 도시하였는데, 이를 유량에

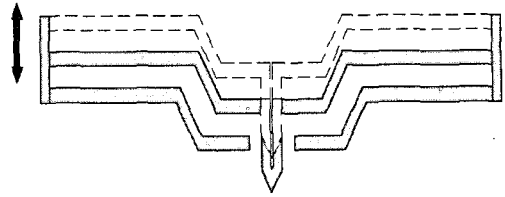


Fig. 12 Schematic of the membrane movement

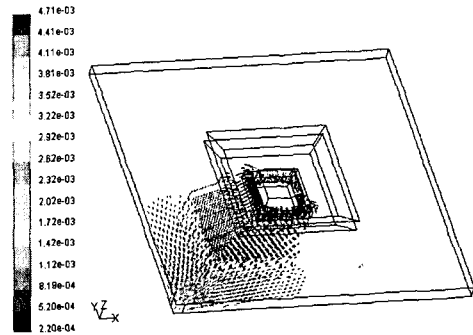


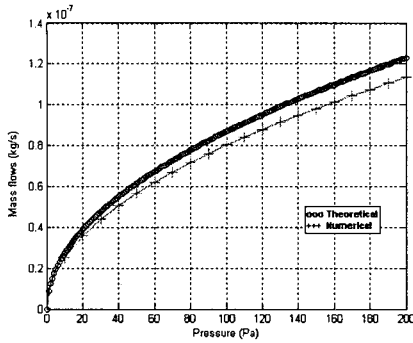
Fig. 13 Distributions of the velocity vector fields

관한 data로 변환하여 앞서 분석한 이론적 해석 결과와 비교하면 Fig. 14와 같다. 결과를 볼 때 압력 변화에 따른 질량유량이 이론적인 결과와 수치해석 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 앞서 계산한 박막 변형을 위해 가해지는 압력과 유량에 관한 관계를 예상할 수 있다.

#### 5. 결론

기존의 모세관력만을 이용하여 분사하는 방식은 팁의 접촉시간에 의존하여 패터닝이 이루어지므로, 유체 및 반응 표면의 상태에 따른 분사량을 예측하기 어렵다. 그러나, 강제적인 분사를 이용하면 분사량의 예측과 제어가 가능하다.

본 연구는 향후 진행될 nano fountainpen의 패터닝 실험 이전에 박막 펌핑에 의한 분사의 가능성에 대한 연구를 통해 공정의 손실을 줄이기 위하여 이루어졌으며, 수치해석을 통해 이를 검증하고자 하였다. 박막이 선형적으로 이동한다고



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

가정하였으며, 박막의 이동에 따라 격자를 재구성하는 DMM 기법을 이용하여 nano fountain-pen 내부 유동특성을 분석하였다. 수치해석을 수행한 결과를 이론적인 값과 비교하여 검증하였으며, 이를 통해 이후 nano fountain-pen의 제작과정과 함께 수치해석을 수행함으로써 최적의 형상을 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

박막의 이동이 선형적이라는 가정으로 이루어졌으나, 이는 실험 또는 구조해석을 통한 결과에 따라 수정되어야 할 변수이다. 그러므로 박막의 이동에 대한 실험 및 구조해석 결과를 적용한다면 더 신뢰성 높은 유동해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

### 후 기

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

### 참고문헌

(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., Staufer, 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., Khatchatryan, 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. and 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. and 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. and 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.  
 (11) Zhang, M., Bullen, D., Chung, S.-W., Hong, S., Ryu, K. S., Fan, Z., Mirkin, C. A. and 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, p. 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 Micro-actuation," *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. and Woinowsky-Krieger, S., 1959, "Theory of Plates and Shells The Second Edition," McGRAW-HILL Book Company.