

마이크로 채널 충전 과정의 유동 현상 (II) - 수치 해석 -

김동성[†] · 이광철* · 권태현* · 이승섭*

(2001년 4월 19일 접수, 2003년 3월 3일 심사완료)

Flow Phenomena in Micro-channel Filling Process (II) - Numerical Analysis -

Dong Sung Kim, Kwang-Cheol Lee, Tai Hun Kwon and Seung S. Lee

Key Words : Micro-Channel(마이크로 채널), Transient Filling(순간 유동), Hele-Shaw Approximation (Hele-Shaw 근사), Surface Tension(표면 장력), Contact Angle(접촉각)

Abstract

Several interesting results were obtained from the flow visualization experiment in the accompanying paper, Part I. In the present study, Part II, a numerical study has been carried out to explain the detailed flow phenomena in micro-channel filling process. Hele-Shaw flow approximation was applied to the micro-channel geometry based on the small characteristic length. And surface tension effect has been introduced on the flow front as the boundary condition with the help of a dynamic contact angle concept between the melt front and the wall. A dimensional analysis for numerical results was carried out and a strong relationship between dimensionless pressure and Capillary number is obtained. The numerical analysis results are compared with the flow visualization experimental observations. And the numerical system developed in the present study seems to be able to predict the interesting micro-channel filling flow characteristics observed from experiments.

기호설명

A^c : 캐비티의 계산 영역
 b : 캐비티의 절반 두께
 Ca : Capillary 수
 N_i : 선형 형상 함수(linear shape function)
 p : 압력
 p_i : 절점 I에서의 압력
 P_g : 게이트 압력
 Q : 일정 유량
 \bar{Q} : 평균 유량
 \tilde{Q} : 입구에서 지정된 유량
 R, R_h : 런너의 유체역학 반지름

R_1, R_2 : 주곡률
 S : 캐비티의 유동성
 S_r : 런너의 유동성
 u, v, w : x, y, z 방향 속도
 v_r, v_θ, v_z : r, θ, z 방향 속도
 We : Weber 수
 η : 작동 유체의 점도
 θ : 접촉각
 ρ : 작동 유체의 밀도
 σ : 작동 유체의 표면 장력

1. 서론

본 논문의 Part I에서는 초소형 사출성형 및 마이크로 유체공학 시스템에서 중요한 역할을 담당하고 있는 마이크로 채널 내부로의 충전 유동에 대한 유동 가시화 실험에 대해 기술하였다. 그런데 초소형 사출성형 공정을 이용하여 정밀한 마이

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : thkwon@postech.ac.kr

TEL : (054) 279-2175 FAX : (054) 279-5899

크로 제품을 생산하기 위해서는 이러한 마이크로 채널 내부의 유동 현상에 기초한 마이크로 캐비티, 마이크로 런너, 그리고 마이크로 냉각채널 디자인이 필요하다. 이에 초소형 사출성형 공정에 기존의 모사(simulation) 기술을 적용한 사례가 보고되고 있다.⁽¹⁾

또한 마이크로 유체공학 시스템의 중요성에 기초하여 마이크로 채널 및 마이크로 챔버 내에서 일어나는 유동 현상에 대해, Darcy 마찰인자가 이론적으로 예측된 값과 차이가 나는 실험 결과를 해석하기 위한 시도가 Papautsky 등에 의해 이루어진 바 있다.⁽²⁾ 하지만 마이크로 채널 충전 과정에 표면 장력과 같은 표면 물리현상을 고려하여 이론적으로 접근한 결과는 보고된 바 없다.

이에 Part II에서는 Part I에서 얻은 마이크로 채널 충전 유동의 특징들을 수치 해석을 통해 표현하기 위해, 표면 장력의 효과를 도입하여 마이크로 규모의 충전 유동 현상을 표현하고자 하였다. Part I과 마찬가지로 수치 해석 결과들을 기초로 한 공정 변수 연구를 수행하였으며, 실험과 근접한 조건 하에서 얻은 수치 해석 결과를 Part I의 실험 결과와 비교하였다.

2. 물리적 모델링

일반적인 높은 고품비 구조물에 대한 모델링이 수행되어 Part I으로부터 다음과 같이 캐비티에 대한 압력 방정식을 얻을 수 있었다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

한편 단면이 사다리꼴 형상이거나 원형 형상의 런너는 일반적으로 유체역학 반지름(hydraulic radius)을 이용하여 Fig. 1과 같이 원통형으로 전환하여 해석을 수행할 수 있다.

이 때 런너에 대한 연속 방정식과 모멘텀 방정식은 다음과 같다.

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \quad (5)$$

위의 식 (2)~(5)를 이용하면 다음과 같이 런너에 대한 압력 방정식을 얻을 수 있다.

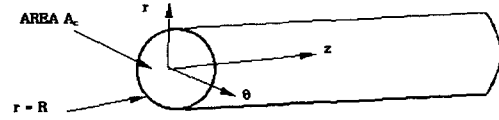


Fig. 1 Schematic of typical runner geometry

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(RS_r \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (6)$$

이 때 런너의 유동성, S_r 의 정의는 다음과 같다.

$$S_r = \frac{1}{2R} \int_0^R \frac{r^3}{\eta} dr \quad (7)$$

식 (6)의 압력 방정식에 적합한 경계 조건들은 캐비티의 경우와 마찬가지로 생각할 수 있으며, 다음과 같다.

$$\text{유동선단에서: } p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (8)$$

$$\text{금형 경계면에서: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

$$\text{금형 입구에서: } 2\oint \left(-S_r \frac{\partial p}{\partial n} \right) ds = \tilde{Q} \quad (10)$$

식 (8)은 마이크로 런너의 유동 선단에서 표면 장력의 영향을 고려하기 위해 사용한다.

3. 유한요소 수식화

높은 고품비의 마이크로 채널 및 마이크로 런너에 대한 충전과정을 해석하기 위해서는 2장에서 유도한 압력 방정식을 풀어야 한다. 이에 대한 유한 요소 수식화는 Hieber 등 및 Kim 등에 의해 유도되었으며,^(3,4) 이는 다음과 같다.

식 (1)에 선형 내삽 함수(linear interpolation function)를 이용하여 Galerkin 방법을 적용하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{\epsilon} \left(S_r^{(\epsilon)} D_{ij}^{(\epsilon)} \right) p_j = \tilde{Q} \quad (11)$$

이 때 $D_{ij}^{(\epsilon)}$ 는 다음과 같다.

$$D_{ij}^{(\epsilon)} = \int_{A^{\epsilon}} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dA \quad (12)$$

한편 식 (6)에 선형 내삽 함수를 이용하여 Galerkin 방법을 적용하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{\epsilon} S_r^{(\epsilon)} \left(\int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dz \right) p_j = \tilde{Q} \quad (13)$$

위의 식 (11), (13)을 반복 계산법을 이용하여

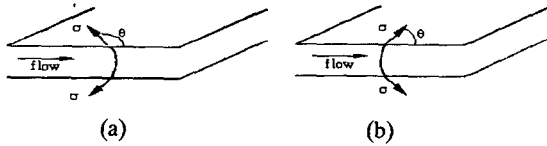


Fig. 2 Flow types: (a) pressure-driven flow (b) surface tension-driven flow

풀어주었으며, 이 때의 추정값은 전 시간단계의 값들을 이용하였다.

3.1 유동 선단에서의 경계 조건 고려

Part I의 유동 가시화 실험으로부터 유동 선단에서 실제로 표면 장력의 효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 마이크로 채널의 유동 선단에서 표면 장력의 효과를 고려하기 위해서는 식 (8)의 Young-Laplace 방정식을 수치 해석에 적절히 도입해야 할 필요성이 생긴다. 하지만 식 (8)에서의 곡률, R_1, R_2 를 알기 어려우므로, 본 연구에서는 접촉각의 개념을 도입하여 곡률의 영향을 고려하였다. 이러한 개념 하에서 Fig. 2에서 보듯이 접촉각, θ 에 따라 충전 유동을 압력 구동 유동(pressure-driven flow)과 표면 장력 구동 유동(surface tension-driven flow)의 두 가지 형태로 모델링하는 것이 가능하다.

그림과 같이 표면 장력은 유동 방향에 대해 압력 구동 유동에 대해서 음성 효과(negative effect)를(Part I의 Fig. 9에서 설명한 바 있다.), 표면 장력 구동 유동에 대해서 양성 효과(positive effect)를 나타내게 된다. 즉 음성 효과를 나타내는 경우에 θ 는 $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 에 해당하는 둔각을 가지며, 양성 효과를 나타내는 경우에 θ 는 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$ 에 해당하는 예각을 갖게 된다. 또한 $\theta=90^\circ$ 인 경우는 표면 장력이 유동에 전혀 영향을 미치지 않는 경우에 해당되게 된다. 결과적으로 표면 장력은 유동 선단의 벽면에 ($\sigma \cos\theta$)의 힘을 작용하게 된다.

3.1.1 캐비티 형상

본 연구에서 높은 고풍비의 구조물을 모델링한 형상은 주유동 방향이 x 방향일 때, 충전 유동의 두께 방향인 z방향(Part I의 Fig. 2)의 곡률 영향이 너비 방향인 y방향에 비해 상대적으로 크다. 따라서 너비 방향의 표면 장력 효과를 두께 방향의 표면 장력 효과에 비해 무시할 수 있다고 가정할 수 있다. 이에 유동 선단의 미세 체적 요소(Fig. 3)에 작용하는 힘들의 평형 방정식을 통해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P_{melt\ front} = -\frac{\sigma \cos\theta}{b} \tag{14}$$

식 (14)를 이용하여 유동 선단에서 표면 장력의

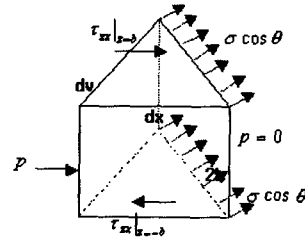


Fig. 3 Melt front element of cavity

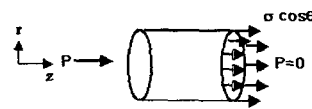


Fig. 4 Melt front element of runner

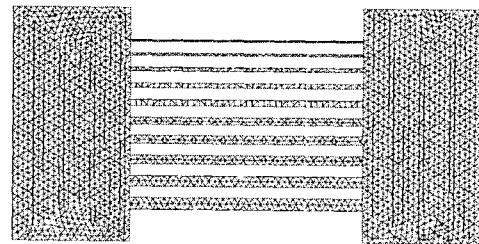


Fig. 5 FEM mesh of the micro-channel

영향을 압력의 변화로 적절히 고려할 수 있음을 알 수 있다.

3.1.2 런너 형상

캐비티의 경우에 비해 런너 형상은 r방향의 곡률 영향을 모두 고려할 수 있다. 이에 유동 선단의 미세 체적 요소(Fig. 4)에 작용하는 힘들의 평형 방정식을 세우면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P_{melt\ front} = -\frac{2\sigma \cos\theta}{R_h} \tag{15}$$

캐비티의 경우와 마찬가지로 압력의 변화로 표면 장력의 영향을 적절히 고려할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

마이크로 채널에 대해 뉴턴성 유체의 등은 충전 유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 얻은 결과를 이용하여 시스템을 파악할 수 있는 공정 변수들 간의 관계식을 얻어 보았다. 또한 수치해석에 런너 유한 요소를 도입하여 Part I의 유동 가시화 실험 결과를 설명할 수 있는지의 여부를 확인하였다.

Table 1 Several input data list for numerical analysis

Water: $\rho = 9.97 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$,	
$\eta = 8.55 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{sec}$, $\sigma = 7.17 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	
$\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$	
Channel thickness (2b)	Flow rate (cm^3/sec)
40 μm	0.005, 0.01, 0.02
20 μm	0.01, 0.08
Silicon oil: $\rho = 9.6746 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$,	
$\eta = 0.9746 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$, $\sigma = 2.21 \times 10^{-2} \text{ N/m}$	
$\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$	
Channel thickness (2b)	Flow rate (cm^3/sec)
40 μm	0.01, 0.02
20 μm	0.01, 0.02

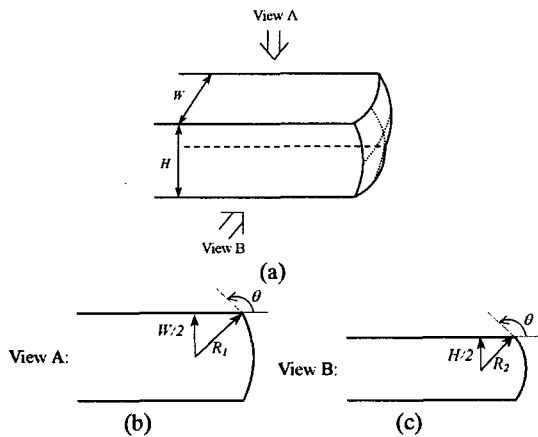
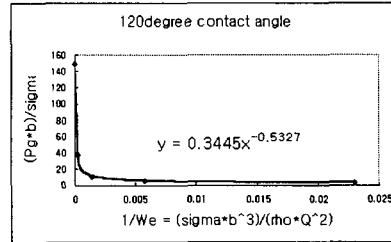


Fig. 6 Schematics of flow front shape in pressure driven filling flow: (a) overall shape near the flow front, (b) shape in width direction in view A and (c) shape in thickness direction in view B

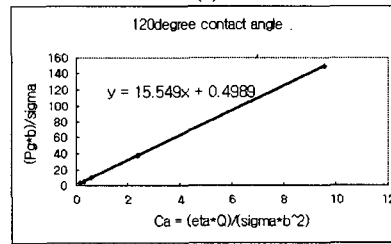
4.1 수치해석 결과의 공정 변수 연구

제작된 마이크로 채널(Part I의 Fig. 3)을 3개의 절점을 가지는 삼각형 유한 요소로 분할하여 절점수를 늘려가며 해석한 결과, 수치해석 결과가 수렴하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 수렴성이 확인된 유한 요소 4868개, 절점 2936개로 분할하여 해석된 결과를 나타내었다.

이제 구축된 수치해석 시스템을 이용하여 Fig. 5의 마이크로 채널에 대해 공정 조건, 마이크로 채널 두께, 유체(물, 실리콘 오일) 등을 변화시키면서 여러 가지 수치해석 결과를 얻었다. 이 때 사용한 입력 값들을 Table 1에 나타내었다.

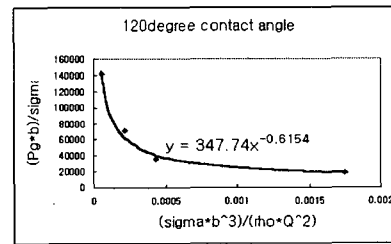


(a)

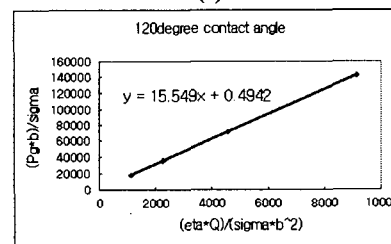


(b)

Fig. 7 Relationships of dimensionless parameters for water case when $\theta=120^\circ$: (a) dimensionless pressure and $1/We$ (b) dimensionless pressure and Ca



(a)



(b)

Fig. 8 Relationships of dimensionless parameters for silicon oil case when $\theta=120^\circ$: (a) dimensionless pressure and $1/We$ (b) dimensionless pressure and Ca

Fig. 6는 압력 구동 유동의 유동 선단의 모습을 도식한 것이다. 본 연구에서는 채널 윗면과 유체 사이의 접촉각, θ 가 채널 측면과 유체 사이의 접촉각이 동일하다고 가정하였다. 또한 앞선 연구자들^(5,6)과 같이 유체의 충전 공정동안 접촉각이 일정

Table 2 Coefficients in the relationship between dimensionless pressure and $1/We$

$$\frac{P_g b}{\sigma} = A \left(\frac{\sigma b^3}{\rho Q^2} \right)^B$$

θ (deg)	Water case		Silicon oil case	
	A	B	A	B
0	0.1412	-0.6212	347.66	-0.6154
30	0.1573	-0.6103	347.67	-0.6154
60	0.2033	-0.5846	347.69	-0.6154
90	0.2873	-0.5375	347.71	-0.6154
120	0.3445	-0.5327	347.74	-0.6154
150	0.4016	-0.5179	347.76	-0.6154
180	0.4232	-0.5128	347.76	-0.6154

Table 3 Coefficients in the relationship between dimensionless pressure and Ca

$$\frac{P_g b}{\sigma} = A \frac{\eta Q}{\sigma b^2} + B$$

θ (deg)	$-\cos \theta$	Water case		Silicon oil case	
		A	B	A	B
0	-1.000	15.549	-0.998	15.549	-1.003
30	-0.866	15.549	-0.864	15.549	-0.866
60	-0.500	15.549	-0.499	15.549	-0.498
90	0.	15.549	0.	15.549	0.
120	0.500	15.549	0.499	15.549	0.494
150	0.866	15.549	0.864	15.549	0.877
180	1.000	15.549	0.998	15.549	0.997

하다고 가정하였다. 하지만 본 연구의 수치해석 프로그램은 변하는 접촉각을 임의로 도입할 수 있도록 개발되어졌다.

Part I의 차원 해석을 통해 다음과 같은 무차원 변수들의 관계를 얻을 수 있었다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = f \left(\frac{\rho Q^2}{\sigma b^3}, \frac{\eta Q}{\sigma b^2}, \theta \right) \quad (16)$$

Table 1의 여러 입력 값들에 대한 수치 해석 결과들을 식 (16)에 기초하여 무차원 압력과 $1/We$ 의 관계, 그리고 무차원 압력과 Ca 와의 관계로, $\theta=120^\circ$ 인 한 가지 경우에 대해 Figs. 7, 8에 도시해 보았다. 또한 도시한 결과들에 기초하여 사용된 여러 접촉각들에 대해 얻은 모든 경우에 대해서는 Table 2와 3에 각각 나타내었다.

Table 2에 나타난 결과들을 살펴보면, 무차원 압력과 We 수 사이의 관계에 있어 물의 경우 특별한 관계를 얻기 어려웠으나, 실리콘 오일의 경우 점성의 영향이 강해지면서 무차원 압력과 $1/We$ 사이의 다음과 같이 특정한 관계식을 구할 수 있었다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 347.7 \left(\frac{\sigma b^3}{\rho Q^2} \right)^{-0.6154} \quad (17)$$

즉 우변 항의 계수 속에 포함되어 있는 점성의 영향이 우변 항 속에 포함되어 있는 표면 장력의 영향보다 중요해지면서 특징적인 숫자들이 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 Table 3에 나타낸 무차원 압력과 Ca 사이의 관계를 살펴보면 물과 실리콘 오일의 경우 모두 15.549의 동일한 기울기를 가지며, y -절편은 $(-\cos \theta)$ 와 동일한 값을 가짐을 알 수 있다(최고 오차는 1.3%에 해당). 즉 두 가지 해석 결과들로부터 다음과 같이 동일한 선형적 관계식을 유도할 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 15.549 \frac{\eta Q}{\sigma b^2} - \cos \theta \quad (18)$$

즉 본 연구의 마이크로 채널의 충전 유동에 대해서 유체의 조건과 상관없이 무차원 압력과 Ca 수 사이에 위 식과 같은 특별한 선형적 관계식을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 결과적으로 게이트 압력, P_g 는 마이크로 채널의 뉴턴성, 등은 충전 유동의 일정 유량에 대해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_g = 15.549 \frac{\eta Q}{b^3} - \frac{\sigma}{b} \cos \theta \quad (19)$$

식 (19)의 우변을 살펴보면, 첫째 항은 지배방정식으로부터 유도되는 점성력을 나타내며, 이 항의 기울기는 유체와 관성력에 무관한 마이크로 채널 형상의 함수에 해당함을 알 수 있다. 또한 둘째 항은 경계 조건으로부터 유도된 표면 장력을 나타내게 되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 식 (19)는 실험으로 측정할 수 있는 게이트 압력과 유량으로부터 접촉각을 거꾸로 추적할 수 있는 열쇠를 제공해 주고 있으며(현재 접촉각을 공정동안 상수로 가정하였지만), Part I에서 고려한 차원 해석, 그리고 구축된 수치해석 시스템에 신빙성을 마련해 주고 있다.

Part I의 Fig. 11(b)에서 전체 실험에서의 무차원 압력과 Ca 수 사이의 다음과 같은 관계를 유도한 바 있다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 5.1433 \frac{\eta Q}{\sigma b^2} + 0.054 \quad (20)$$

위 식 (20)은 역시 압력과 유량 사이의 선형성을 실험으로 확인할 수 있게 해준다. 이 때 식 (18)과 (20)을 비교해 보면, 우선 기울기가 차가 나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 식 (18)의 경우 유량을 충전 과정동안 일정하게 두었지만, 실제 실험에서는 유량이 시간에 따라 계속 줄어들기 때

문에 압력이 크게 증가하지 않아, 식 (20)의 기울기가 더 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 두 식의 우변을 비교함으로써 실험 전체의 평균 접촉각을 유추할 수 있으며, 그 값은 93.10°의 둔각으로 표면 장력의 음성 효과에 해당함을 알 수 있다.

또한 이러한 방법으로 두께가 다른 세가지 마이크로 채널에 대해 각각 무차원 압력과 Ca수 사이의 관계식을 유도하여, 각 마이크로 채널의 평균 접촉각을 구해볼 수 있다. 각 마이크로 채널의 무차원 압력과 Ca수 사이의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 이 때 게이트 압력과 유량은 Part I과 마찬가지로 압력 높이에 의해 생성되는 압력과 전체 충전 시간을 기준으로 한 평균 유량을 사용하였다.

Fig. 9로부터 각 마이크로 채널에 대해 다음과 같은 관계식들을 유도할 수 있다.

$$40\mu\text{m case: } \frac{P_g b}{\sigma} = 5.0556 \frac{\eta \bar{Q}}{\sigma b^2} + 0.0706 \quad (21)$$

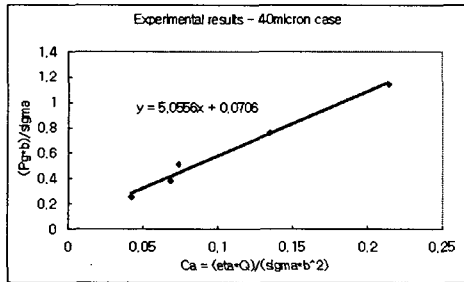
$$30\mu\text{m case: } \frac{P_g b}{\sigma} = 4.9796 \frac{\eta \bar{Q}}{\sigma b^2} + 0.0314 \quad (22)$$

$$20\mu\text{m case: } \frac{P_g b}{\sigma} = 5.2919 \frac{\eta \bar{Q}}{\sigma b^2} + 0.0521 \quad (23)$$

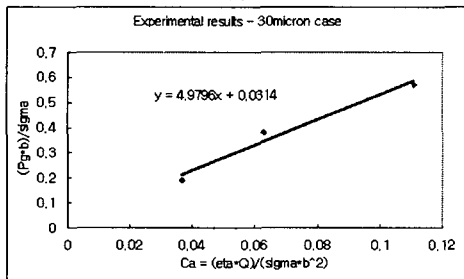
식 (21)-(23)을 식 (18)과 비교하여 각 마이크로 채널의 평균 접촉각을 거꾸로 유추하면, 두께 40, 30, 20 μm 마이크로 채널에 대해 각각 94.05°, 91.80°, 92.99°의 둔각들로 모두 표면 장력의 음성 효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2 실험 결과와 수치 해석 결과의 비교

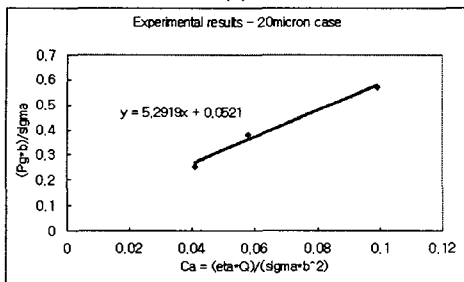
Part I의 여러 유동 가시화 실험 결과들로부터 압력 구동 유동에서의 표면 장력의 음성 효과를 확인할 수 있었다. 특히 두께 40 μm 의 실험의 경우 100 μm 채널의 너비 방향 표면 장력 효과가 고려되어야 함을 보여 주고 있으므로(Part I의 Figs. 6, 7), 이 채널을 런너 유한 요소로 모델링하여 너비 방향의 표면 장력 효과까지 고려하였다.



(a)

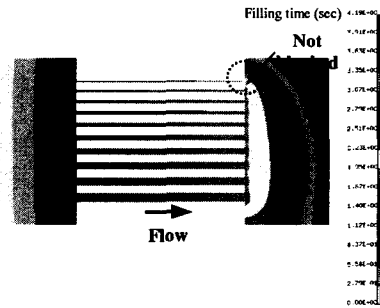


(b)

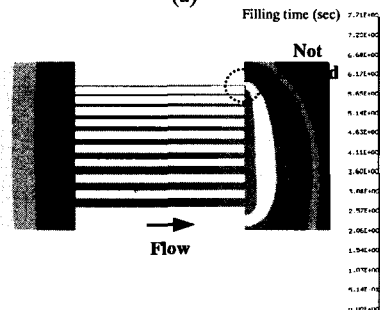


(c)

Fig. 9 Relationship between dimensionless pressure and Ca from the experimental results: (a) 40 μm thickness case (b) 30 μm thickness case (c) 20 μm thickness case



(a)



(b)

Fig. 10 Filling patterns (40 μm thickness and $\theta = 90^\circ$ using linearly decreasing flow rate): (a) 30cm pressure head (b) 20cm pressure head

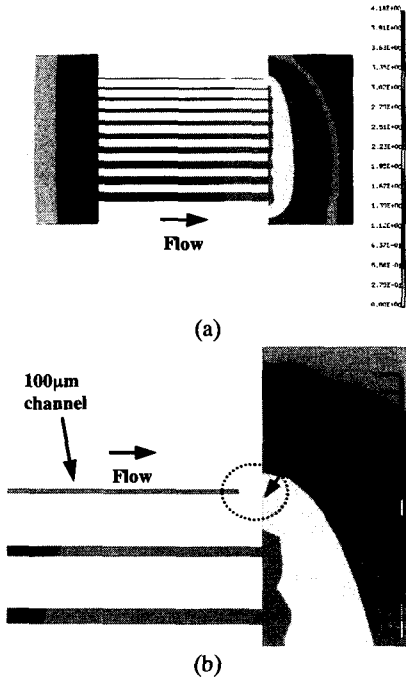


Fig. 11 Filling patterns (40µm thickness, 30cm pressure head case and $\theta = 90.7^\circ$ using linearly decreasing flow rate): (a) overall filling pattern (b) enlarged plots near the exit of narrower channels

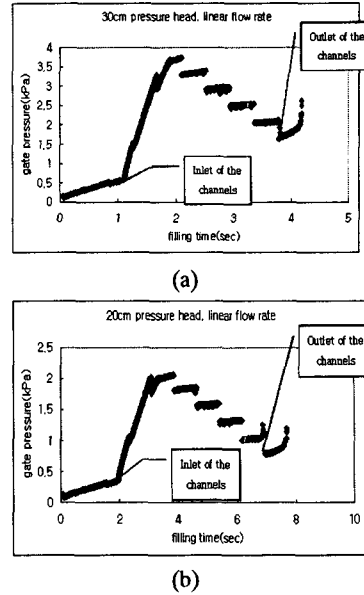


Fig. 13 Gate pressure variations (40µm thickness and $\theta = 90.7^\circ$ using linearly decreasing flow rate): (a) 30cm pressure head (b) 20cm pressure head

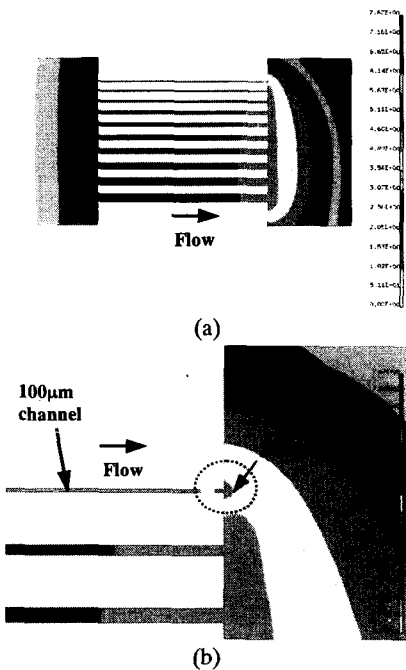


Fig. 12 Filling patterns (40µm thickness, 20cm pressure head case and $\theta = 90.7^\circ$ using linearly decreasing flow rate): (a) overall filling pattern (b) enlarged plots near the exit of narrower channels

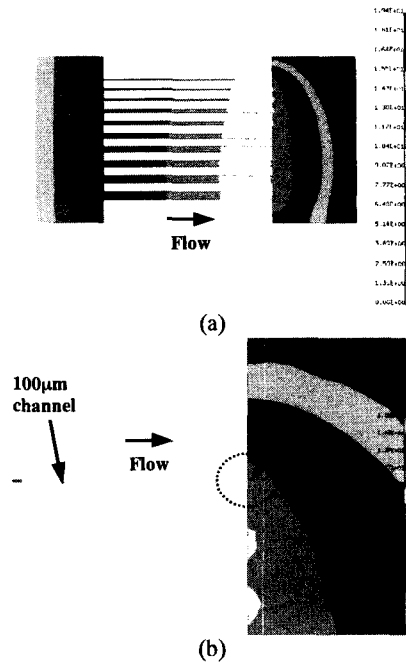


Fig. 14 Filling patterns (20µm thickness, 30cm pressure head case and $\theta = 90.7^\circ$ using linearly decreasing flow rate): (a) overall filling pattern (b) enlarged plots near the exit of narrower channels

이 때 수치해석을 수행함에 있어 시간에 따른 유량을 사용해야 하지만 유량을 정확히 측정할 수 없어, 마이크로 채널의 충전 시간을 10등분하여 마지막 10번째 평균 유량을 이용하여 선형적으로 감소하는 유량 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

Part I에서 보인 두께 40 μm 의 20, 30cm 압력 높이 실험(Part I의 Figs. 6, 7) 및 두께 20 μm 의 30cm 압력 높이 실험(Part I의 Fig. 8)의 조건에 대한 수치해석의 결과를 Fig. 10~14에 나타내었다.

두께 40 μm 마이크로 채널의 충전 패턴을 Fig. 10~12에서 확인할 수 있다. Fig. 10의 결과에서 보다시피 표면 장력이 고려되지 않을 경우 100 μm 채널의 막힘 현상은 찾아볼 수 없다. 하지만 Figs. 11, 12에서 보다시피 90.7°의 접촉각을 사용하여 표면 장력의 음성 효과를 고려한 경우 30cm 압력 높이의 경우 100 μm 채널에서 겨우 빠져 나오는 유동(Fig. 11 (b))을, 20cm 압력 높이의 경우 100 μm 채널을 막는 유동(Fig. 12 (b))을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Part I의 Figs. 6, 7에서의 실험 결과와 일치하는 것임에 주목할 필요가 있다. 또한 이 결과는 런너 유한요소를 이용하여 벽면의 점성 효과를 모두 고려하였지만 100 μm 채널이 막히는 현상은 점성 효과 때문(Fig. 10)이 아니라 표면 장력의 음성 효과에 의한 것(Fig. 11, 12)임을 단적으로 보여주고 있는 것이다.

특이한 점은 본 논문에서 보이진 않았지만, 접촉각을 90.5°로 사용할 때는 두 가지 경우 모두 100 μm 채널을 빠져 나오는 결과를 확인하였으며, 접촉각을 90.8°로 사용할 때는 두 가지 경우 모두 100 μm 채널이 막히는 결과를 보였다는 것이다. 결과적으로 런너 유한 요소로 100 μm 채널을 모델링한 경우 90.7°의 접촉각이 결정적인 값에 해당함을 알 수 있었다. 또한 두께 20 μm 마이크로 채널의 충전 패턴을 Fig. 14에 나타내었는데, 실험 결과(Part I의 Fig. 8)와는 비슷한 충전 패턴을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

두께 40 μm 마이크로 채널의 게이트에서의 압력 값은 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 압력이 변하는 패턴은 충전시간과 비교해 볼 때, 유동이 미세 사각 채널의 입구와 출구를 지날 때 급격한 변화가 생기는 것을 확인할 수 있다. 10개로 분할한 줄어드는 유량 모델로 인하여 압력 값이 불규칙적으로 증가와 감소를 반복하지만, 압력 값이 Part I 실험의 압력 높이에 의해 형성되는 압력 값의 한계에 들어있으므로, 압력의 변화도 신빙성을 갖는다.

결과적으로 폭이 좁은 채널에 런너 유한 요소를 사용하고, 선형적으로 줄어드는 유량 모델을 이용

하여 실험과 정성적으로 일치하는 수치 해석 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 Part I의 유동 가시화 실험에 대해 이에 적합한 모사 기술을 구축하여 마이크로 채널로의 충전 공정에 대한 수치해석을 수행하였다. 높은 고품비 구조물의 특징을 고려하여 지배 방정식에는 Hele-Shaw 유동 근사를, 경계 조건인 Young-Laplace 방정식에 접촉각을 도입하여, 수치 해석 결과의 공정 변수 연구 및 Part I의 실험과 수치해석 결과의 비교를 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) Part I에서 수행한 차원 해석을 통해 얻은 무차원 압력, Ca수, We수에 대해 수치 해석 결과의 공정 변수 연구를 수행하였으며, 이를 통해 무차원 압력과 Ca수가 밀접하게 관련되어 있음을 확인할 수 있었다.

(2) Part I의 실험에서 확인한 압력 높이와 유량 사이의 선형성을 수치 해석에서도 확인할 수 있었으며(식 (19)), 이를 통해 유추한 평균 접촉각은 전체 실험에 대해서는 93.10°, 그리고 두께 40, 30, 20 μm 의 마이크로 채널에 대해 각각 94.05°, 91.80°, 92.99°의 둔각들에 해당함을 알 수 있었다.

(3) Part I의 실험 결과 중 압력 높이가 낮아지면 서 얇은 채널의 출구가 막히는 현상(Part I의 Fig. 7)을 수치 해석을 통해서도 확인할 수 있었으며(Fig. 12), 이들 수치 해석 결과로부터 표면 장력의 음성 효과를 정확하게 확인할 수 있었다.

(4) 두께 40 μm 의 너비 100 μm 채널을 런너 유한 요소로 모델링하고, 선형적으로 감소하는 유량 모델을 사용하여 수치해석을 수행함으로써, 실험과 정성적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 2000년도 밀리스트럭처 생산기술 개발 사업 및 국가지정 연구실 사업(2000-N-NL-01-C-148)의 연구지원으로 이루어진 연구 결과로서 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Kemmann, O., Weber, L., Jeggy, C., Magotte, O. and Dupret, F., 2000, "Simulation of the micro injection molding process," *Tech. Paper Ann. Tech. Meet. Conf. - SPEI*, Vol. 1, pp. 576-580.

- (2) Papautsky, I., Brazzle, J., Ameel, T. and Frazier, A.B., 1999, "Laminar fluid behavior in micro-channels using micropolar fluid theory," *Sensors and Actuators*, Vol. 73, pp. 101~108.
- (3) Hieber, C.A. and Shen, S.F., 1980, "A Finite-Element /Finite-Difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 1~32.
- (4) Kim, I.H., Park, S.J., Chung, S.T. and Kwon, T.H., 1999, "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk: Part I, Injection Molding with Viscoelastic Compression Fluid Model," *Poly. Eng. Sci.*, Vol. 39, No. 10, pp. 1930~1942.
- (5) Kim, E. and Whitesides, G.M., 1997, "Imbibition and Flow of Wetting Liquids in Noncircular Capillaries," *J. Phys. Chem.*, Vol. 101, pp. 855~863
- (6) Tseng, F.G, Yang, I.D., Lin, K.H., Ma, K.T., Lu, M.C. and Chieng, C.C., 2001, "Fluid Filling into Microfabricated Reservoirs," *Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers'01*, pp. 1518~1521.