

표면 장력 효과를 고려한 마이크로 채널 충전과정 연구

김동성* · 이광철* · 권태현* · 이승섭*

Study of Micro-channel Filling Flow Including Surface Tension Effects

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

Key Words : Micro-injection molding(초소형 사출성형), Microfluidics(마이크로 유체공학), Micro-channel(마이크로 채널), Flow visualization(유동 가시화), Surface tension(표면장력)

Abstract

Micro-injection molding and microfluidic devices with the help of MEMS technologies including the LIGA process are expected to play important roles in micro-system industries, in particular the bio-application industry, in the near future. Understanding fluid flows in micro-channels is important since micro-channels are typical geometry in various microfluidic devices and mold inserts for micro-injection molding. In the present study, both experimental and numerical studies have been carried out to understand the detailed flow phenomena in micro-channel filling process. Three sets of micro-channels of different thickness were fabricated and a flow visualization system was also developed to observe the filling flow into the micro-channels. Experimental flow observations were extensively made to find the effects of channel width and thickness, and effects of surface tension and volume flow rate and so on. And a numerical analysis system has been developed to simulate the filling flow into micro-channels with the surface tension effect taken into account. Discussed are the flow visualization experimental observations along with the predictability of the numerical analysis system.

기호설명

- b: 캐비티 절반 두께
- h_p : 저장 용기의 압력 높이
- N_f : 선형 내삽 함수
- p: 압력
- p_i : 절점 i에서의 압력
- P_g : 게이트 압력
- Q: 일정 유량
- \bar{Q} : 평균 유량
- \tilde{Q} : 입구에서의 지정 유량
- R, R_h : 런너의 유체역학 반지름(hydraulic radius)
- R_1, R_2 : 주곡률
- S: 캐비티의 유동성
- S_r : 런너의 유동성

- t: 현재 충전 시간
- t_f : 전체 충전 시간
- V: 마이크로 채널의 부피
- η : 작동 유체의 점도
- θ : 접촉각
- ρ : 작동 유체의 밀도
- σ : 작동 유체의 표면 장력

1. 서론

21세기 정보, 생명공학의 시대에 이들 산업의 기반으로서 플라스틱 제품의 필요성은 의심할 바 없이 중요하다. 특히 마이크로 시스템 기술에 의해 생산된 제품은 전자, 정보, 생명 공학의 여러 초소형 부품 등에 중요한 역할을 담당하여 그 시장 규모는 갈수록 늘어날 것으로 예상된다. 이러한 마이크로 시스템 기술 중에서 특히 LIGA 공정에 기초한 초소형 사출성형 (micro-injection

* 포항공과대학교 기계공학과

molding) 기술은 마이크로 제품 생산에 있어서 중요한 역할로 자리매김해 나가고 있다[1]. 하지만 사출성형 공정 변수를 연구하여 마이크로 캐비티, 마이크로 런너에 대해 충전 및 보압공정의 유동 특성 및 열전달에 대해 연구한 결과는 아직까지 보고된 바 없다.

또한 초소형 성형 기술의 발전에 기반을 둔 마이크로 유체공학(microfluidic) 시스템들이 새로이 각광을 받고 있다. 이러한 마이크로 유체공학 시스템으로 잉크젯 프린터의 헤드, 컴퓨터 칩의 냉각을 위한 열 교환기 및 실제 DNA-칩의 원형 등 많은 예들이 보고되고 있다[2,3]. 이 때 마이크로 채널 내에서 일어나는 유동현상은 마이크로 유체공학 시스템의 디자인이나 해석에 중요한 역할을 한다. 이에 마이크로 채널 내부의 유동 현상의 이해를 위한 여러 가지 실험 및 수치 해석에 대한 여러 시도가 있었다[4-6]. 하지만 이들 연구는 파이프 유동에 대한 Darcy 마찰 인자의 실험적 측정 및 이론 전개에 그 초점이 맞추어져 있고, 표면 장력 같은 표면 물리현상을 고려한 마이크로 채널 충전 과정에 대해 연구된 결과는 보고되지 않는다.

위에서 언급한 초소형 사출성형 충전 과정의 해석 뿐 아니라 바이오 칩에 대한 생화학 반응 채널의 유동현상은 파이프 유동보다는 표면 현상을 고려한 충전 유동의 이해가 더 중요하다. 이에 본 연구에서는 높은 고폍비(high-aspect ratio)의 마이크로 구조물의 특성을 표현할 수 있으며, 표면 장력의 영향을 효과적으로 관찰할 수 있는 마이크로 채널을 디자인하여 이에 대한 마이크로 채널 충전 유동 가시화를 실험적으로 수행하여 보았다. 또한 충전 과정에 대한 수치 해석에 표면 장력 효과를 도입하여 마이크로 규모(microscale)의 유동 현상을 표현하고자 하였다.

2. 이론 및 모델링

2.1 물리적 모델링

일반적으로 LIGA 구조물은 Fig. 1 과 같이 너비가 얇고 두께가 깊은 높은 고폍비의 특징을 갖는다.

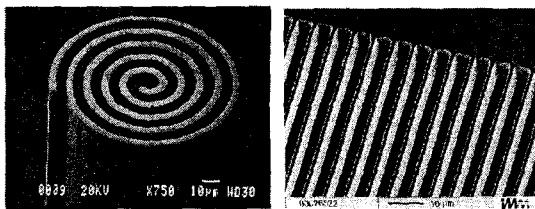


Fig. 1 Examples of LIGA structures

이에 높은 고폍비의 구조물을 Fig. 2 와 같이 모델링하면 이러한 좌표계 내에서 Hele-Shaw 유동 근사가 가능해진다.

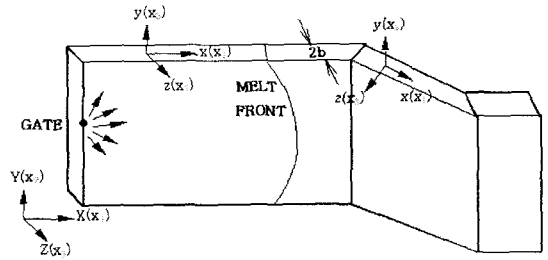


Fig. 2 Schematic of thin cavity geometry

Fig. 2 와 같은 일반적인 캐비티의 형상에 대해 Hele-Shaw 유동 근사를 적용하여 얻은 연속 방정식, 모멘텀 방정식을 이용하면 다음과 같이 캐비티에 대한 압력 방정식을 얻을 수 있다.

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

이 때 유동성, S 는 다음과 같다.

$$S \equiv \int_0^b \frac{z^2 dz}{\eta} \quad (2)$$

식 (1)의 압력 방정식에 적합한 경계 조건들은 다음과 같다.

$$\text{유동 선단에서: } p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

$$\text{금형 경계면에서: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

$$\text{금형 입구에서: } 2\phi \left(-S \frac{\partial p}{\partial n} \right) ds = \bar{Q} \quad (5)$$

이 때 식 (3)은 Young-Laplace 방정식으로 유동 선단에서 표면 물리 현상이 중요해지는 마이크로 채널을 특징을 고려하기 위해 사용한다.

한편 런너는 일반적으로 Fig. 3 과 같이 원통형으로 전환하여 모델링을 할 수 있으며, 연속 방정식 및 모멘텀 방정식을 통해 얻은 런너에 대한 압력 방정식은 다음과 같다.

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

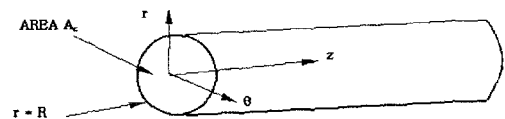


Fig. 3 Schematic of typical runner geometry

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 방정식도 캐비티의 경우와 동일하게 식 (3)-(5)의 경계 조건을 갖는다.

2.2 수치적 모델링

높은 고풍비의 마이크로 채널 및 마이크로 런너에 대한 충전과정을 해석하기 위해서는 2.1 절에서 유도한 압력 방정식을 풀어야 하며, 이를 위해 유한 요소법을 사용하였다.

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

$$\sum_e (S_r^{(e)} D_{ij}^{(e)}) p_j = \tilde{Q} \quad (8)$$

이 때 $D_{ij}^{(e)}$ 는 다음과 같다.

$$D_{ij}^{(e)} = \int_{A^e} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dA \quad (9)$$

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

$$\sum_e S_r^{(e)} \left(\int_{z_1}^{z_2} R \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dz \right) p_j = \tilde{Q} \quad (10)$$

2.3 유동 선단에서의 경계 조건 고려

마이크로 채널의 유동 선단에서의 경계 조건인 식 (3)의 Young-Laplace 방정식을 수치 해석에 적절히 도입하기 위해, 본 연구에서는 접촉각(contact angle)의 개념을 도입하여 곡률(curvature)의 영향을 고려하였다. 따라서 충전 유동을 Fig. 4 에서와 같이 접촉각, θ 에 따라 압력 구동 유동(pressure-driven flow)과 표면 장력 구동 유동(surface tension-driven flow)의 두 가지 형태로 모델링하는 것이 가능하다.

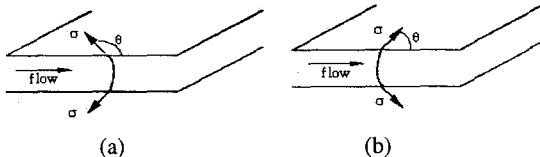


Fig. 4 Flow types: (a) pressure-driven flow (b) surface tension-driven flow

그림에서 보듯이 표면 장력은 유동 방향에 대해 압력 구동 유동에 대해서는 음성 효과(negative effect)를, 표면 장력 구동 유동에 대해서는 양성

효과(positive effect)를 나타낸다. 결과적으로 표면 장력은 유동 선단의 벽면에 ($\sigma \cos\theta$)의 힘을 작용하게 된다.

3. 유동가시화 실험

3.1 마이크로 채널 제작

마이크로 채널은 Fig. 5 와 같이 높은 고풍비 구조물의 특성을 고려하여 길이 20mm × 너비 100μm ~ 1mm 까지 100μm 씩 증가시키며 총 10 개의 미세 사각채널을 가지도록 디자인되었다. 또한 양방향 모두 입구로의 역할이 가능하도록 20mm × 10mm 로 되어있다. 이 마이크로 채널은 20, 30, 40μm 의 세가지 두께로 제작되었다. 실리콘 기판 위에 일반적인 자외선 사진 식각공정을 이용하여, 열처리 후에 비교적 안정적인 구조물 특성을 가지는 두꺼운 음성 감광제인 SU-8(MCC 사)을 사용하여 마이크로 채널을 제조하였다.

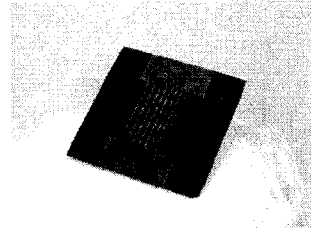
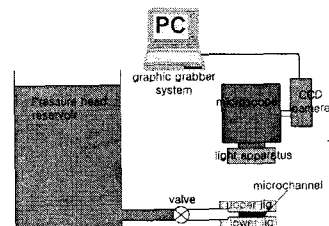


Fig. 5 Micro-channel (thickness 40μm)

3.2 유동 가시화 실험 장치 및 실험 방법

마이크로 채널로 실험 유체를 유도하면서 마이크로 채널과 외부 실험장치를 연결하는 마이크로 채널 지그 구조물을 제작하여 구성된 유동 가시화 실험 장치 구성은 Fig. 6 과 같다.

유동의 구동을 위해 압력 높이(pressure head)를 이용하였으며, 마이크로 채널 내의 유동은 현미경을 이용하여 3 배, 10 배로 확대하여 관찰하였다.



(a)

Fig. 6 Experimental setup for flow visualization: (a) schematic view (b) real system

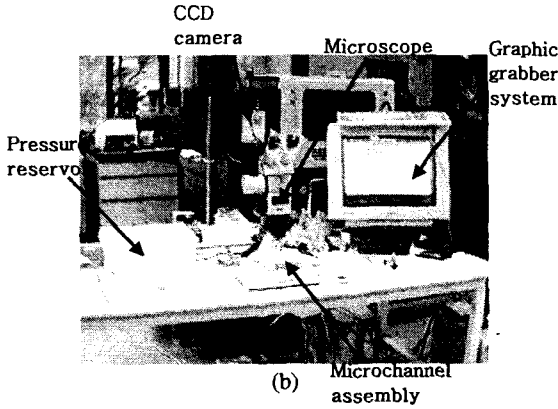


Fig. 6 - continued

또한 CCD 카메라와 화면 포착 시스템을 이용하여 채널 내의 충전 유동을 30frame/sec 로 실시간 동영상 촬영하였다.

실험 유체로는 물을 사용하여 실온에서 실험을 수행하였으며, 전체 실험과정은 Table 1 과 같다.

Table 1 Experimental procedure

Thickness of micro-channel	Pressure head	Magnification
40 μ m	45cm, 30cm, 20cm, 15cm, 10cm	3 \times , 10 \times entrance, 10 \times exit
20 μ m	45cm, 30cm, 20cm	3 \times , 10 \times entrance, 10 \times exit
30 μ m	30cm, 20cm, 10cm	3 \times , 10 \times entrance, 10 \times exit

3 배 확대 실험을 통해 마이크로 채널의 전체 충전 시간과 유동 패턴을 파악하였고, 10 배 확대 실험은 100 μ m ~ 500 μ m 너비의 미세 사각채널 입구 부분과 출구 부분을 촬영하여 표면 장력의 영향을 파악하였다.

4. 결과 및 고찰

마이크로 채널에 대해 뉴턴성 유체의 등은 유동에 대한 실험과 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 시스템에 영향을 미치는 공정 변수를 파악하였다. 또한 실험을 통해 여러 물리 현상을 파악하였으며, 수치해석에 런너 유한 요소를 도입하여 이를 확인해 보았다.

4.1 수치해석 결과의 공정 변수 연구

수치해석 시스템을 이용하여 Table 2 의 입력 값들에 대한 여러 수치 해석 결과를 얻었다. 이번 연구에서 접촉각은 전체 충전 공정동안 일정한 값으로 가정하였다.

Table 2 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 μ m	0.005, 0.01, 0.02
20 μ m	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 μ m	0.01, 0.02
20 μ m	0.01, 0.02

공정의 중요한 변수인 게이트 압력과 다른 변수 간의 관계를 파악하기 위해 차원 해석을 수행하여 다음과 같은 무차원 변수들을 얻었다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = f\left(\frac{\rho Q^2}{\sigma b^3}, \frac{\eta Q}{\sigma b^2}, \theta\right) \quad (11)$$

첫째 항 $\frac{P_g b}{\sigma}$ 는 무차원 압력을, 둘째 항 $\frac{\rho Q^2}{\sigma b^3}$

는 We(Weber) 수를, 셋째 항 $\frac{\eta Q}{\sigma b^2}$ 는 Ca(Capillary)

수에 해당함을 알 수 있다. 수치 해석 결과를 통해 무차원 압력과 Ca 수 사이의 다음과 같은 선형성을 파악할 수 있었다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 15.549 \frac{\eta Q}{\sigma b^2} - \cos\theta \quad (12)$$

4.2 실험 결과

Table 1 의 실험 과정 중 3 배 확대 촬영을 통해 전체 유동 패턴과 충전 시간을 파악할 수 있었다. 10 배 확대 촬영 실험 중 채널 두께 40 μ m 의 30cm 압력 높이($\rho gh_p = 2.93\text{kPa}$)와 20cm 압력 높이($\rho gh_p = 1.96\text{kPa}$) 실험의 입·출구에서의 10 배 촬영 실험을 Figs. 7, 8 에 나타내었다.

Figs. 7, 8 에서 보듯이 너비 100 μ m 채널의 경우 다른 채널들에 비해 너비 방향의 표면 장력의 음성 효과가 중요하게 작용하고 있기 때문에, 유동이 다른 채널들보다 눈에 띄게 늦어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 압력이 유동을 구동하면서 채널 출구에서 관성력이 강한 경우 Fig. 9(a)처럼 젖음(wetting)이 일어나지 않고 옆 채널 출구의 유동과 만나서 공기 트랩을 형성하고, 점성력이 강

한 경우 Fig. 9(b)처럼 젖음이 일어나면서 유동이
진전하다가 표면 장력이 크게 미치는 너비
100 μm 채널을 막는 경우가 생길 수 있는 것이다.
이들을 Fig. 9(c), (d)에서 직접 확인할 수 있다.

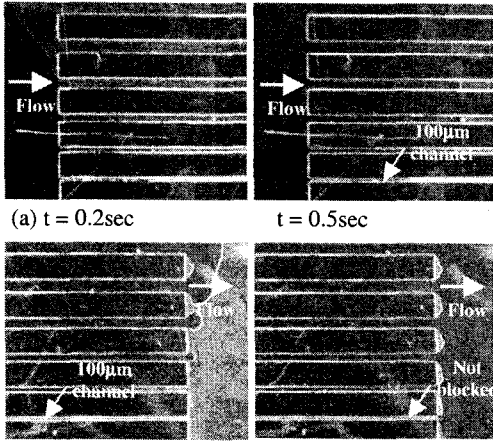


Fig. 7 Snap shots of filling flow (40 μm thickness and 30cm pressure head case):
(a) entrance zone (b) exit zone

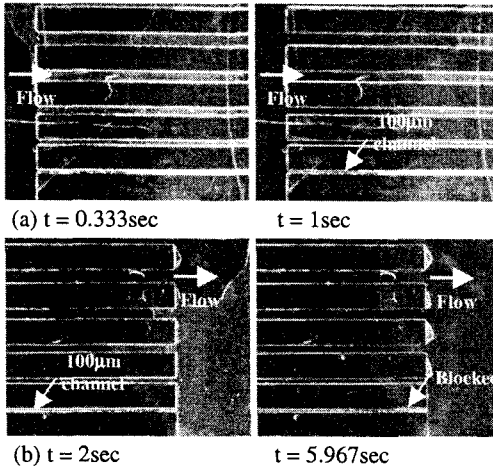


Fig. 8 Snap shots of filling flow (40 μm thickness and 20cm pressure head case):
(a) entrance zone (b) exit zone

결과적으로 4.1 절에서 고려한 압력, 점성력, 판
성력, 표면 장력의 영향을 실험을 통해 실제로 확
인할 수 있었다.

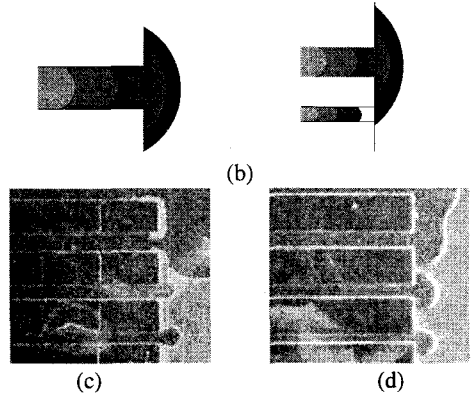
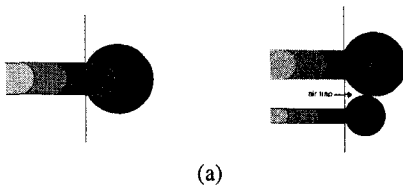


Fig. 9 Flow near the exit of channels: (a) schematic:
dominant inertia effect, (b) schematic:
dominant viscous and surface tension effect, (c)
real view of case(a), (d) real view of case(b)

또한 실험 결과들을 무차원 압력과 Ca 수 사이
의 관계로 Fig. 10 과 같이 도시하였다. 이 때 게이트
압력은 압력 높이에 의해 생성되는 압력
($P_g = \rho gh_p$)을 사용하였고, 유량은 충전 시간을 기
준으로 한 평균 유량($\bar{Q} = V/t_f$)을 사용하였다.

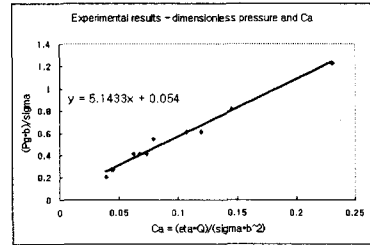


Fig. 10 Relationship between dimensionless pressure
and Capillary number from experimental results

이로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 5.1433 \frac{\eta \bar{Q}}{\sigma b^2} + 0.054 \quad (13)$$

위의 결과로부터 압력 높이와 유량 사이의 선형
성을 확인할 수 있다. 이 때 사용한 유량 값이 실
제로 실험에서 계속 줄어드는 유량을 평균한 유량
을 사용하게 되어, 이 경우 게이트 압력이 크게
형성되지 않으므로 식 (13)의 기울기가 식 (12)의
기울기보다 작아졌음을 알 수 있다. 또한 식 (12)
와 비교하여 평균 접촉각을 거꾸로 유추하면
93.10 $^\circ$ 에 해당함을 알 수 있다.

4.3 실험 결과와 수치 해석 결과의 비교

4.2 절의 실험 결과들로부터 표면 장력의 음성
효과를 확인할 수 있었다. 두께 40 μm 의 실험의
경우 100 μm 채널을 런너 유한 요소로 모델링하여

너비 방향 표면 장력 효과를 고려하였다. 또한 유량은 선형적으로 감소하는 유량 모델을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

두께 40 μm 의 20, 30cm 압력 높이의 실험에 대한 수치해석의 결과를 Figs. 11, 12에 나타내었다.

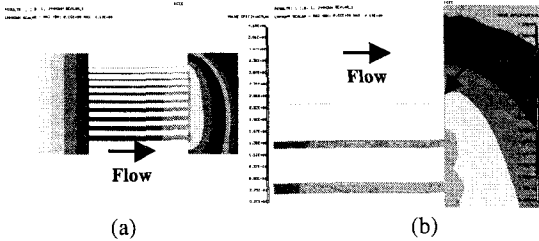


Fig. 11 Filling patterns (40 μm thickness, 30cm pressure head and $\theta = 90.7^\circ$ case): (a) overall filling pattern (b) enlarged plots near the exit of thinner channels

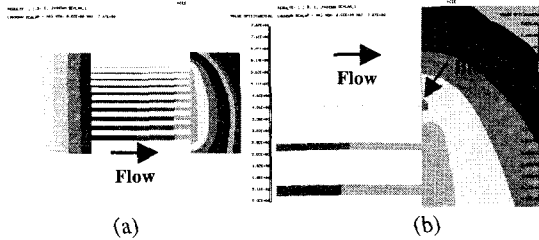


Fig. 12 Filling patterns (40 μm thickness, 20cm pressure head and $\theta = 90.7^\circ$ case): (a) overall filling pattern (b) enlarged plots near the exit of thinner channels

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. 결과적으로 런너 유한 요소와 선형적으로 줄어드는 유량 모델을 이용하여 실험과 정성적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로 유체공학 시스템 및 초소형 사출성형에서 중요한 역할을 하게 될 높은 고풍비의 마이크로 구조물에 대해, 마이크로 채널을 디자인하여 채널로의 충전 과정에 대한 충전 유동 가시화 실험 및 수치해석을 수행하였다. 높은 고풍비 구조물의 특징을 고려하여 지배방정식에는 Hele-Shaw 유동 근사를, 경계 조건에는 접촉각을 도입하여, 수치해석 결과의 공정 변수 연구

및 실험과 수치해석 결과의 비교를 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 마이크로 채널 충전 공정의 중요 변수에 대한 차원 해석을 통해 무차원 압력, Ca 수, We 수를 구해내었으며, 무차원 압력과 Ca 수 사이에 선형적 관계가 있음을 확인하였다.

(2) 채널 출구에서의 10 배 확대 실험을 통해 차원 해석에서 밝혀진 압력, 점성력, 관성력, 표면장력의 효과를 다시 확인할 수 있었다.

(3) 실험 결과에서 압력 높이와 유량 사이에 선형적 관계가 있음을 확인하였으며(식 (13)), 평균 접촉각은 93.10° 에 해당함을 알 수 있었다.

(4) 실험 결과와 수치해석 결과로부터 표면 장력의 음성 효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

(5) 구축된 수치해석 시스템이 실험을 정성적으로 표현할 수 있음을 파악하였다.

본 연구에 이어 실험에서는 게이트에서의 압력 값을 실제로 측정할 것이며, 수치해석에서는 두께 뿐 아니라 너비 방향의 표면 장력 효과도 고려할 수 있는 모델링을 도입할 것이다.

후기

이 연구는 2000년도 국가지정연구실 사업의 연구 지원 및 차세대신기술개발사업의 연구지원으로 이루어진 연구 결과로서 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) T. Hanemann, *et al.*, 1997, "Molding of polymeric microstructures", *Polymeric Mat. Sci. Eng.*, Vol. 77, pp. 404-405.
- (2) E.Y. K. Ng, *et al.*, 1999, "Investigation Study of Manifold Microchannel Heat Sinks for Electronic Cooling Design", *J. Electron. Manufac.*, Vol. 9, 155-166.
- (3) M.A. Burns, *et al.*, 1998, "An Integrated Nanoliter DNA Analysis Device", *Science*, Vol. 282, pp. 484-487.
- (4) J. Pfahler, *et al.*, 1990, "Liquid transport in micron and submicron channels", *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 431-434.
- (5) K.C. Pong, *et al.*, 1994, "Non-linear pressure distribution in uniform micro-channels", *Proc. ASME FED*, 197, pp. 51-56.
- (6) I. Papautsky, *et al.*, 1999, "Laminar fluid behavior in micro-channels using micropolar fluid theory", *Sensors and Actuators*, Vol. 73, pp. 101-108.