

마이크로 채널 충전 과정의 유동 현상(I)

- 유동 가시화 실험 -

김동성[†] · 이광철* · 권태현* · 이승섭*

(2001년 4월 19일 접수, 2002년 7월 23일 심사완료)

Flow Phenomena in Micro-Channel Filling Process (I)

- Flow Visualization Experiment -

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(표면 장력)

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, Part I, an experimental investigation has been carried out to understand the detailed flow phenomena in micro-channel filling process. Three sets of micro-channels of different thickness (40 μ m, 30 μ m and 20 μ m) were fabricated using SU-8 on silicon wafer substrate. And a flow visualization system was developed to observe the filling flow into the micro-channels. Experimental flow observations are extensively made to find the effects of pressure, inertia force, viscous force and surface tension. A dimensional analysis for experimental results was carried out and several relationships of dimensionless parameters are obtained.

기호설명

b : 캐비티의 절반 두께
h_p : 저장 용기의 압력 높이
Ca : Capillary 수
p : 압력
P_g : 게이트의 압력
Q : 일정 유량
 \bar{Q} : 평균 유량
 \tilde{Q} : 입구에서 지정된 유량
R₁, R₂ : 주곡률
S : 캐비티의 유동성
t : 현재 충전 시간

t_f : 총 충전 시간
u, v, w : x, y, z 방향 속도
V : 마이크로 채널 부피
We : Weber 수
 η : 작동 유체의 점도
 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 초소형 부품들에 중요한 역할을 담당하여 그 시장 규모는 갈수록 늘어날 것으로 예상된다. 이러한 마이크로 시스템 기술 중에서 특히 LIGA 공정에 기초한 초소형 사출성형 (micro-injection molding) 기술은 마

[†] 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : thkwon@postech.ac.kr

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

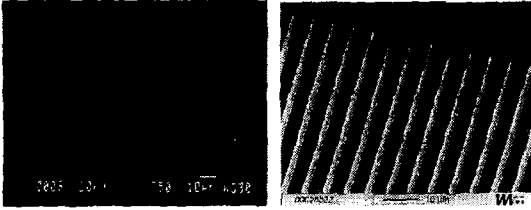


Fig. 1 Examples of LIGA structures

이크로 제품 생산에 중요하게 자리매김해 나가고 있으며, 최근 광통신용 다심 광 커넥터, 마이크로 필터로 사용하는 벌집 구조물 등 초소형 사출성형 기술로 생산된 몇몇 구조물들이 보고되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이에 정밀한 마이크로 제품 생산을 위해 유동 특성과 열전달을 고려할 수 있는 사출성형 공정 변수를 고려한 실험적 연구 결과가 최근 보고되고 있다.⁽⁵⁾

또한 초소형 성형 기술의 발전에 기반을 둔 마이크로 유체공학(microfluidic) 시스템들이 새로이 각광을 받고 있다. 예를 들어 각종 마이크로 펌프, 마이크로 믹서, 컴퓨터 칩의 냉각을 위한 열 교환기 및 실제 DNA-칩의 원형 등 많은 예들이 보고되고 있다.^(6,7) 이 때 마이크로 채널과 마이크로 챔버 내에서 일어나는 유동현상의 이해는 마이크로 유체공학 시스템의 디자인이나 해석에 중요한 역할을 담당한다. 이러한 중요성에 의해 마이크로 규모의 유동 현상에 대해서 여러 연구가 진행되어, Darcy 마찰인자가 이론적으로 예측된 값과 차이가 나는 것을 실험을 통해 밝혀 내었다.⁽⁸⁻¹¹⁾ 하지만 이들 연구는 파이프 유동에 대한 Darcy 마찰인자의 실험적 측정애 그 초점이 맞추어져 있으며, 표면 물리현상을 고려한 마이크로 채널 충전 과정에 대해 연구된 결과는 보고된 바 없다.

위에서 언급한 초소형 사출성형 충전 과정에서 유동 특성의 이해 뿐 아니라 바이오 칩 혹은 DNA-칩에 대한 생화학 반응 채널(biochemical reaction channel)의 유동 현상은 파이프 유동보다는 표면 현상을 고려한 충전 유동(filling flow)의 이해가 더 중요하다. 따라서 마이크로 채널 충전 유동 현상이 실제 어떻게 이루어지며, 이 유동 현상의 정성적, 정량적 유동 특성은 무엇인지 아는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 LIGA 구조물 같은 높은 고폭비(high-aspect ratio) 구조물의 특성을 표현할 수 있으며, 표면 장력의 영향을 효과적으로 관찰할 수 있는 마이크로 채널을 디자인하여 이에 대한 마이크로 채널 충전 유동 가시화를 실험적으로 수행하였으며, 이 과정에서 유동의 지배 변수들에 대한 공정 변수 연구를 수행하였다.

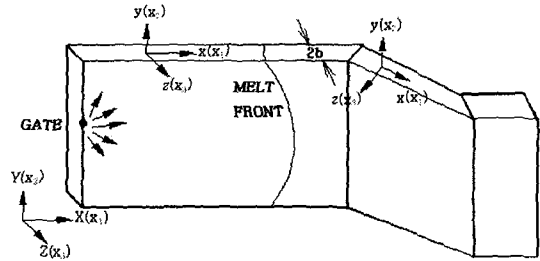


Fig. 2 Schematic of thin cavity geometry

2. 물리적 모델링

일반적으로 LIGA 구조물 같이 너비가 얇고 두께가 깊은, 높은 고폭비의 구조물은 Fig. 1 과 같다. 위와 같은 높은 고폭비의 구조물을 Fig. 2 와 같이 모델링하면, 이러한 좌표계 내에서 특성 길이가 크게 줄어들어 Hele-Shaw 유동 근사(Hele-Shaw flow approximation)가 가능해진다.

따라서 일반적인 캐비티의 형상에 대해 Hele-Shaw 유동 근사를 적용하면 다음과 같은 연속 방정식, 모멘텀 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

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

위의 식 (1)-(4)를 이용하면 다음과 같이 캐비티에 대한 압력 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

이 때 유동성(fluidity), S 는 다음과 같다.

$$S \equiv \int_0^b \frac{z^2 dz}{\eta} \quad (6)$$

식 (5)의 압력 방정식에 대해 시스템에 적합한 경계 조건들은 다음과 같다.

유동 선단에서:
$$p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

캐비티 경계면에서:
$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

캐비티 입구에서:
$$2 \oint \left(-S \frac{\partial p}{\partial n} \right) ds = \tilde{Q} \quad (9)$$

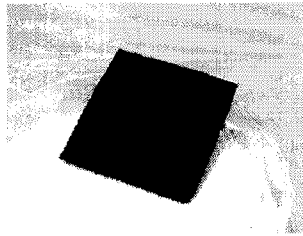


Fig. 3 Micro-channel (thickness 40µm)

이 때 식 (7)은 Young-Laplace 방정식으로, 유동선단에서 표면 장력과 같은 표면 물리 현상이 중요해지는 마이크로 채널의 특징을 고려하기 위해 사용한다.

3. 유동가시화 실험

일반적으로 많이 사용되는 마이크로 채널에서 이루어지는 마이크로 규모의 충전 유동에, 표면장력의 효과가 두드러지게 나타나는 지를 파악하기 위해 유동 가시화 실험 장치를 구성하여 3 가지 두께의 마이크로 채널에 대해 실험을 수행하여 보았다.

3.1 마이크로 채널 제작

마이크로 채널은 Fig. 3 과 같이 높은 고품비 구조물의 특성을 고려하여 길이 20mm × 너비 100µm ~ 1mm 까지 100µm 씩 증가시키며 총 10 개의 미세 사각채널을 가지도록 디자인되었다. 또한 양방향 모두 10 개 미세 사각 채널의 입구로서 역할이 가능하도록 20mm × 10mm 로 되어있다. 실리콘 기판 위에 일반적인 자외선 사진 식각공정을 이용하면 높은 구조물의 제조가 가능하며, 열처리 후에 비교적 안정적인 구조물 특성 및 강도를 가지는 두꺼운 음성 감광제인 SU-8(MCC 사)을 이용하여 마이크로 채널을 제조하였다.

마이크로 채널은 20, 30, 40µm 의 세 가지 두께로 제작되었으며, 이 중 40µm 두께의 마이크로 채널의 공정을 소개하면 다음과 같다.

먼저 4 인치 N(100) 실리콘 기판을 유동가시화 실험을 위해 제작된 지그의 치수에 맞도록 4cm×4cm 로 자른 후 표준 세척공정을 이용하여 세척을 실시하였다. 세척공정을 완료한 후 SU-8 50 을 2800rpm 으로 35 초 동안 스핀 코팅하고 열응력을 최소화하기 위하여 질소 분위기에서 열판을 이용하여 각각 50°C 에서 100 초, 90°C 에서 800 초 열처리를 실시하였다. 열처리 후 자외선 노광기를 이용하여 600mJ(365nm)의 에너지로 노광을 실시한 후 80°C 에서 700 초 동안 열처리를 실시하여 자외선에 노광된 부분이 다중화가 일어나도록

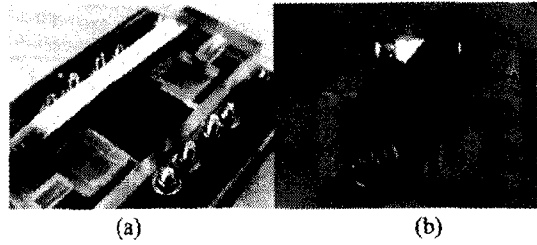
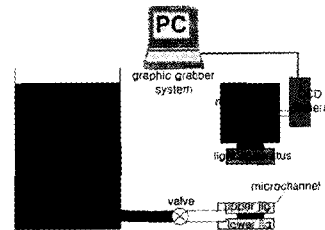
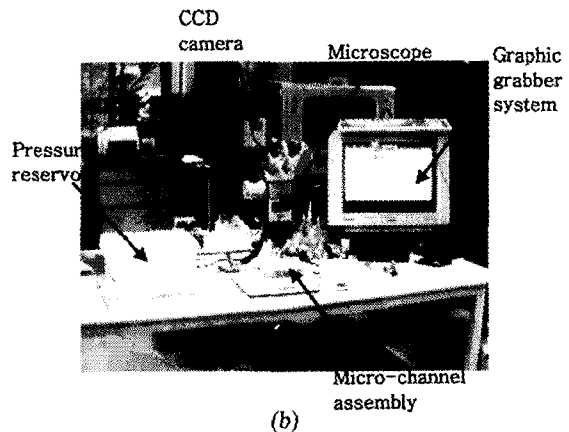


Fig. 4 Jig structures: (a) micro-channel assembly, (b) size of jig and micro-channel



(a)



(b)

Fig. 5 Experimental setup for flow visualization: (a) schematic view (b) real system

하였다. 열처리 후 현상액을 이용하여 현상을 실시한 후 스핀 코터를 이용하여 시편을 건조하였다. 건조된 시편은 오븐을 이용하여 200°C 에서 30 분간 열처리하여 경화시켰다.

3.2 유동 가시화 실험 장치 및 실험 방법

마이크로 채널로 실험 유체를 유도하면서 마이크로 채널과 외부 실험장치를 연결시키기 위해 Fig. 4 와 같은 지그를 제작하였다. 커버를 접합한 마이크로 채널을 이용할 경우 생기는 1 회성의 단점을 극복하기 위하여 지그는 위, 아래 부분으로 구성되어 지그 자체가 커버로의 역할을 하도록 디

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
30 μ m	30cm, 20cm, 10cm	3 \times , 10 \times entrance, 10 \times exit
20 μ m	45cm, 30cm, 20cm	3 \times , 10 \times entrance, 10 \times exit

자인 되어있다. 또한 지그를 통해 생성되는 실험 유체의 누출을 최소화하기 위해 고무판 및 실리콘 고무를 이용하여 마이크로 채널과 지그 사이의 패킹을 효과적으로 수행하였다.

유동 가시화 실험을 수행하기 위해 구성된 유동 가시화 실험 장치 구성은 Fig. 5 와 같다. 유동의 구동을 위해 압력 저장 용기의 압력 높이를 이용하였으며, 마이크로 채널 내의 충전 유동은 현미경(동원정밀, model : OSM-1)을 이용하여 3 배, 10 배로 확대하여 관찰하였다. 또한 CCD camera (Honeywell, model : GC-405NA)와 화면 포착 시스템 (graphic grabber system)(OnAir TV card)을 이용하여 채널 내의 충전 유동을 30frames/sec 로 실시간 동영상 촬영하였다.

실험 유체로는 물을 사용하여 실온에서 실험을 수행하였으며, 두께 40, 30, 20 μ m 의 세가지 마이크로 채널에 대해 Table 1 과 같은 실험 조건으로 실험을 수행하였다.

3 배 확대 실험을 통해 마이크로 채널의 전체 충전 시간과 유동 패턴을 관찰하였으며, 10 배 확대 실험은 너비 100 μ m ~ 500 μ m 의 미세 사각채널 입구 부분과 출구 부분을 촬영하여 마이크로 규모의 충전 유동의 특성을 관찰하였으며, 특히 표면 장력의 영향을 주시해 보았다.

4. 결과 및 고찰

등은 과정에서 뉴턴성 유체의 마이크로 채널 내 부로의 충전 유동에 대한 유동 가시화 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 표면 장력의 중요한 역할을 확인할 수 있었다. 또한 마이크로 채널 충전 과정에 중요한 영향을 미칠 수 있는 공정 변수들에 차원 해석을 수행하여 공정 변수간의 관계식을 구해보았다.

4.1 실험 결과

Table 1 의 실험 과정 중 3 배 확대 촬영을 통해 전체 유동 패턴과 충전 시간을 파악할 수 있었으며, 채널 입·출구의 10 배 확대 촬영을 통해 여러

Table 2 Filling time for several experimental procedures

Thickness of micro-channel	Pressure head (ρgh_p)	Total filling time (t_f)
40 μ m	45cm (4.40kPa)	2.64sec
	30 cm (2.93kPa)	4.2sec
	20 cm (1.96kPa)	7.7sec
	15 cm (1.47kPa)	8.3sec
	10 cm (0.98kPa)	13.5sec
30 μ m	30 cm (2.93kPa)	6.8sec
	20 cm (1.96kPa)	12sec
	10 cm (0.98kPa)	20.6sec
20 μ m	45 cm (4.40kPa)	11.4sec
	30 cm (2.93kPa)	19.5sec
	20 cm (1.96kPa)	27.6sec

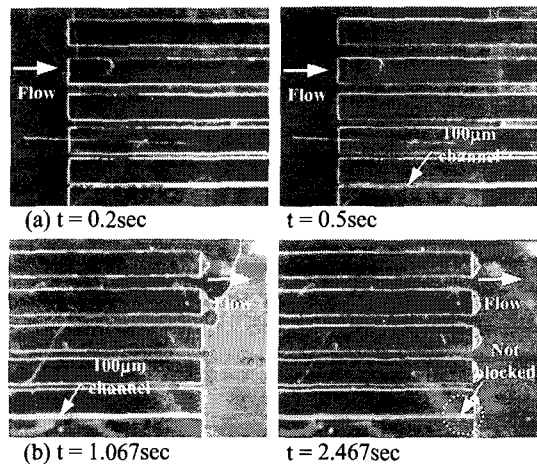


Fig. 6 Snap shots of filling flow (40 μ m thickness and 30cm pressure head case): (a) entrance zone (b) exit zone

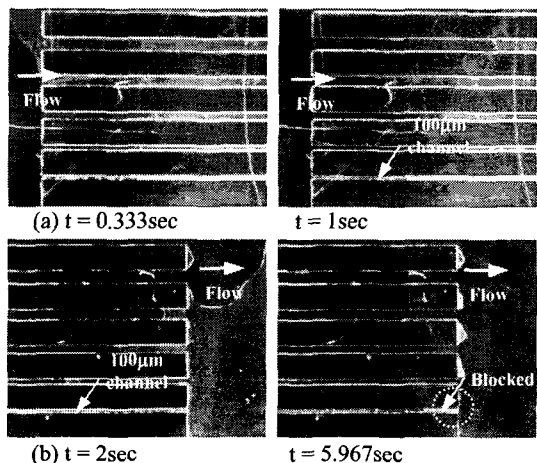


Fig. 7 Snap shots of filling flow (40 μ m thickness and 20cm pressure head case): (a) entrance zone (b) exit zone

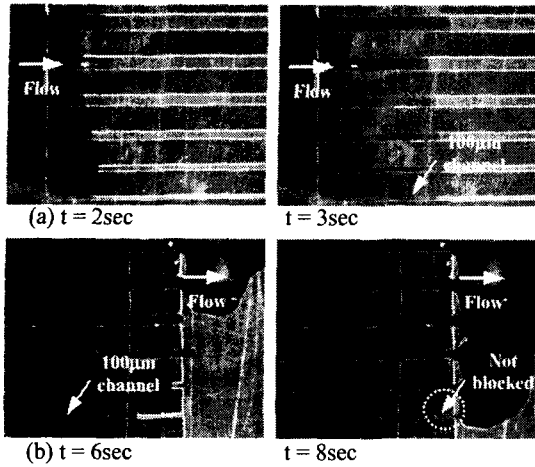


Fig. 8 Snap shots of filling flow (20µm thickness and 30cm pressure head case): (a) entrance zone (b) exit zone

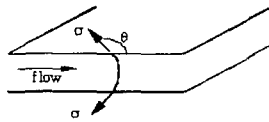


Fig. 9 Negative effect of surface tension in the pressure driven flow

가지 물리 현상을 파악할 수 있었다. 각각의 실험 조건에 따라 얻은 각 실험별 전체 충전 시간을 Table 2 에 나타내었다.

이 중에서 두께 40µm 마이크로 채널의 30cm 압력 높이와 20cm 압력 높이, 그리고 두께 20µm 마이크로 채널의 30cm 압력 높이 실험의 입·출구에서의 10 배 촬영 실험을 Figs. 6, 7, 8 에 각각 나타내었다. 이 때 표시된 시간은 유동이 화면에 나타나기 시작할 때를 기준으로 삼았다.

그림에서 보다시피 두께 40µm 마이크로 채널 실험의 경우 너비 100µm 채널에서의 유동이 다른 채널들에 비해 현저히 늦어지고 있음을 확인할 수 있다(Figs. 6,7). 특히 압력 높이가 20cm 정도로 낮아지면, 유동이 너비 100µm 채널의 출구를 빠져 나오지 못하는 것을 확인할 수 있다(Fig.7(b)). 이는 다른 채널들의 경우 너비 방향 주곡률(principal radius of curvature)이 두께 방향 주곡률에 비해 무시될 수 있지만, 너비 100µm 의 채널의 경우 너비 방향 주곡률을 두께 40µm 에 비해 상대적으로 무시할 수 없음을 의미한다. 즉 표면 장력이 100µm 채널의 너비 방향에서 Fig. 9 와 같이 유동을 방해하는 음성 효과(negative effect)로서 다른 채널에 비해 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 두께 20µm 마이크로 채널 실험 결과(Fig. 8)에서

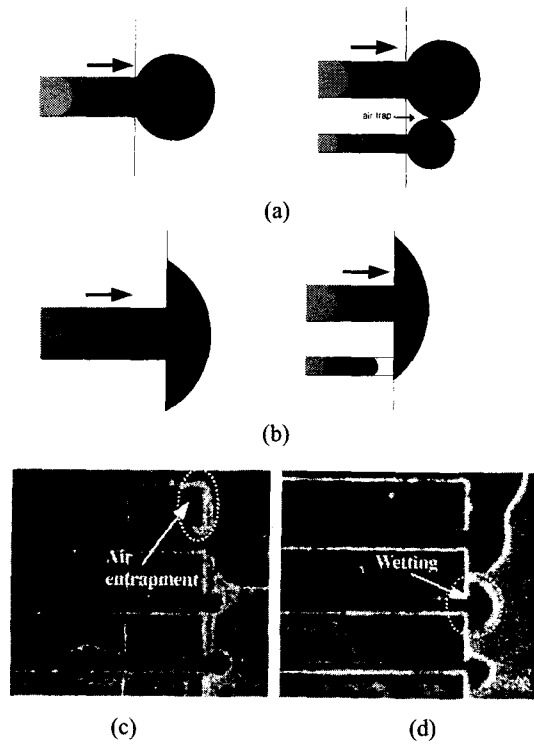


Fig. 10 Flow near the exit of channels: (a) schematic: dominant inertia effect, (b) schematic: dominant viscous and surface tension effect, (c) real view of case(a), (d) real view of case(b)

너비 100µm 채널의 출구가 막히지 않는 사실에서 다시 한번 확인할 수 있다.

또한 모든 실험에 있어 압력이 유동을 구동하면서, 채널 출구에서 관성력(inertia force)이 상대적으로 큰 영향을 미치는 경우 공기 트랩이 생성되며, 점성력(viscous force)이 상대적으로 큰 영향을 미치는 경우 공기 트랩이 사라지는 것을 확인할 수 있다. 이해를 돕기 위해 이를 Fig. 10 에 나타내었다.

관성력이 상대적으로 강한 경우 Fig. 10(a)처럼 젖음(wetting)이 일어나지 않은 상태에서 옆 채널 출구의 유동과 만나면서 공기 트랩을 형성하게 되고, 점성력이 상대적으로 강한 경우 Fig. 10(b)처럼 젖음이 일어나면서 유동이 전진하다가, 두께 40µm 마이크로 채널의 경우처럼 너비 방향의 표면 장력 음성 효과가 크게 미치는 너비 100µm 채널을 막는 경우가 생길 수 있는 것이다. 이들을 Fig. 10(c), (d)의 실험 결과에서 직접 확인할 수 있다. 결과적으로 마이크로 채널의 충전 과정에는 압력, 점성력, 관성력, 표면 장력이 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

4.2 실험 결과에 대한 공정 변수 연구

4.1 절에서 확인할 수 있었던 마이크로 채널 충전 과정에서 중요한 역할을 하는 압력, 점성력, 관성력, 표면 장력의 존재를 기반으로, 가장 중요한 공정 변수인 게이트 압력(gate pressure)과 다른 공정 변수간의 관계를 얻기 위하여, 차원 해석을 수행하였다.

게이트 압력의 관련 목록(relevance list)은 다음과 같다.

- 목표 변수: 게이트 압력(P_g)
- 재료 특성(물리량): 밀도(ρ), 점도(η), 표면장력(σ)
- 공정 관련 변수: 유량(Q)
- 형태 변수: 마이크로 채널 절반 두께(b)

위 물리량들을 이용하여 차원 해석을 수행하면 다음과 같은 무차원 변수들을 얻을 수 있다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = f\left(\frac{\rho Q^2}{\sigma b^3}, \frac{\eta Q}{\sigma b^2}\right) \quad (10)$$

첫째 항 $\frac{P_g b}{\sigma}$ 는 무차원 압력을, 둘째 항 $\frac{\rho Q^2}{\sigma b^3}$ 는 관성력에 대한 표면 장력의 비를 나타내는 We (Weber) 수를, 셋째 항 $\frac{\eta Q}{\sigma b^2}$ 는 점성력에 대한 표

면 장력의 비를 나타내는 Ca(Capillary) 수에 해당함을 알 수 있다. 결과적으로 위의 관련 목록은 4.1 절에서 확인한 네 가지 힘들을 모두 고려하고 있음을 알 수 있다.

식 (10)을 기반으로 게이트 압력 항에는 압력 높이에 의해 생성되는 압력($P_g = \rho g h_p$)을, 유량 항에는 충전 시간을 기준으로 한 평균 유량($\bar{Q} = V/t_f$)을 사용하여, 모든 실험의 결과들을 무차원 압력과 We 수, Ca 수 그리고 Re 수($Re = We/Ca$) 사이의 관계로 Fig. 11에 도시해 보았다.

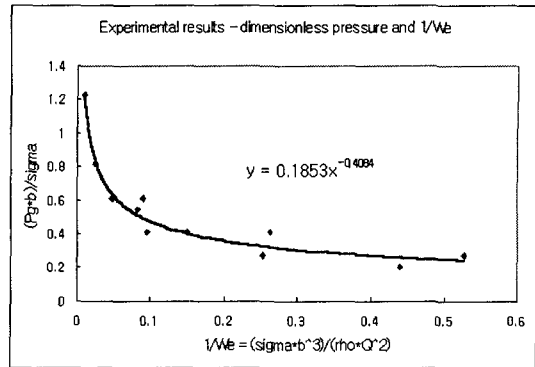
이들 결과로부터 다음과 같은 관계식들을 얻을 수 있다.

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 0.1853 \left(\frac{\sigma b^3}{\rho \bar{Q}^2} \right)^{-0.4084} \quad (11)$$

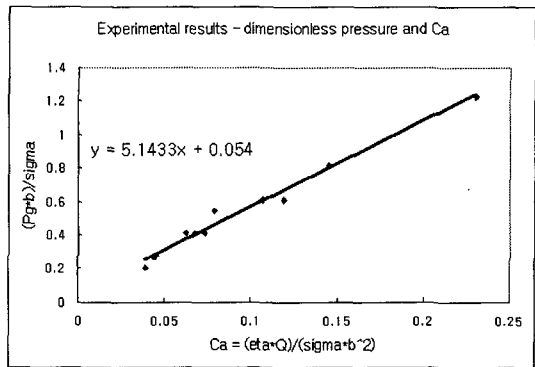
$$\frac{P_g b}{\sigma} = 5.1433 \frac{\eta \bar{Q}}{\sigma b^2} + 0.054 \quad (12)$$

$$\frac{P_g b}{\sigma} = 0.0192 \left(\frac{\rho \bar{Q}}{\eta b} \right)^{0.6661} \quad (13)$$

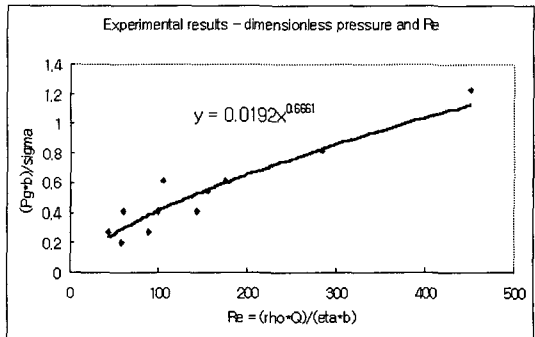
위 관계식들로부터 We 수, Ca 수, Re 수 모두 무



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Relationship between dimensionless parameters for experimental results: (a) dimensionless pressure and $1/We$, (b) dimensionless pressure and Ca , (c) dimensionless pressure and Re

차원 압력과의 패턴을 찾아낼 수 있음을 알 수 있다. 특히 다른 관계식들에 비해 무차원 압력과 Ca 수 사이에는 특정한 선형성이 있음을 확인해 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로 유체공학 시스템 및 초

소형 사출성형 공정에서 중요한 역할을 하고 있는 높은 고품비의 마이크로 구조물에 대해, 구조물의 특징을 표현할 수 있는 마이크로 채널을 디자인하여, 이 마이크로 채널로의 충전 과정에 대한 유동 가시화 실험을 수행하였다. 실험 결과를 통해 여러 가지 물리력과 표면 장력의 효과를 확인할 수 있었으며, 이를 기반으로 실험 결과에 대한 공정 변수 연구를 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 채널 출구의 10 배 확대 실험을 통해 압력, 관성력, 점성력 그리고 표면 장력의 효과를 확인할 수 있었다. 압력 높이가 높은 실험의 경우 관성 효과가 상대적으로 강해 채널 출구에 공기 트랩이 형성되며, 압력 높이가 줄어들 경우 점성 및 표면 장력의 효과가 상대적으로 강해지면서 공기 트랩이 사라지는 것이 확인되었고, 채널의 출구가 막히는 현상도 관찰되었다. 결과적으로 이들 네 가지 효과가 시스템 전체에 영향을 미치고 있음을 파악하였다.

(2) 특정 두께(40 μ m)의 마이크로 채널에서 압력 높이가 낮아질 경우, 채널 출구가 막히게 되는 현상으로부터 표면 장력의 음성 효과를 확인할 수 있었다.

(3) 실험으로부터 구해진 시스템에 중요한 영향을 미치는 네 가지 영향력들을 마이크로 채널 충전 과정의 중요 변수에 대한 차원 해석을 통해 다시 한 번 확인할 수 있었으며, 무차원 압력, Ca 수, We 수의 무차원 변수들을 구해내었다.

(4) 무차원 압력과 Ca 수, We 수 그리고 Re 수 사이의 관계식을 실험 결과로부터 구해내었으며, 이들 관계식들 중 특히 무차원 압력과 Ca 수 사이에 특정한 선형성을 확인할 수 있었다.

본 연구에 이어 'Part II. 수치 해석' 편에서는 수치해석 결과의 차원 해석을 수행하였으며, 표면 장력의 효과를 고려한 수치 해석을 수행하여 Part I의 실험 결과와 비교를 시도하였다.

후 기

이 연구는 2000년도 국가지정 연구실 사업(2000-N-NL-01-C-148)의 연구 지원으로 이루어진 연구 결과로서 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) Dunkel, K., Bauer, H.-D., Ehrfeld, W., Hoßfeld, J., Weber, L., Hörcher, G. and Mülleret, G., 1998, "Injection-Moulded Fibre Ribbon Connectors for Parallel Optical Links Fabricated by the LIGA Technique," *J. Micromech. Microeng.* Vol. 8, No. 4, pp. 301~306.
- (2) Hanemann, T., Piotter, V., Ruprecht, R. and Haussett J. H., 1997, "Molding of Polymeric Microstructures," *Polymeric Mat. Scien. Eng.*, Vol. 77, pp. 404~405.
- (3) Ruprecht, R., Bacher, W., Haussett, J.H. and Piotter, V., 1995, "Injection Molding of LIGA and LIGA-Similar Microstructures Using Filled and Unfilled Thermoplastics," *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 2639, pp. 146~157.
- (4) Hanemann, T., Piotter, V., Ruprecht, R. and Haussett J.H., 1999, "Fabrication of Polymeric Micro-components Using LIGA- and Related Techniques," *Polymeric Mat. Scien. Eng.*, Vol. 81, pp. 25~26.
- (5) Despa, M.S., Kelly, K.W. and Collier, J.R., 1999, "Injection molding of polymeric LIGA HARMs," *Microsystem Tech.*, Vol. 6, pp. 60~66.
- (6) Ng, E.Y. K. and Poh, S.T., 1999, "Investigation Study of Manifold Microchannel Heat Sinks for Electronic Cooling Design," *J. Electron. Manufac.*, Vol. 9, 155~166.
- (7) Burns, M.A., Johnson, B.N., Brahmasandra, S.N., Handique, K., Webster, J.R., Krishnan, M. and Sammarco, T.S., 1998, "An Integrated Nanoliter DNA Analysis Device," *Science*, Vol. 282, pp. 484~487.
- (8) Pfahler, J., Harley, J. and Bau, H., 1990, "Liquid Transport in Micron and Submicron Channels," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 431~434.
- (9) Pong, K.-C., Ho, C.-H., Liu, J. and Tai, Y.-C., 1994, "Non-Linear Pressure Distribution in Uniform Micro-Channels," *Proc. ASME FED*, 197, pp. 51~56.
- (10) Shih, J.C., Ho, C.-M., Liu, J. and Tai, Y.-C., 1996, "Monatomic and Polyatomic Gas through Uniform Microchannels," *MEMS ASME DSCD*, Vol. 59, pp. 197~203.
- (11) Papautsky, I., Brazzle, J., Ameal, T. and Frazier, A.B., 1999, "Laminar Fluid Behavior in Micro-Channels using Micropolar Fluid Theory," *Sensors and Actuators*, Vol. 73, pp. 101~108.