

## Silwet L-77 이 포함된 Polydimethylsiloxane(PDMS) 마이크로 채널의 유동 길이 모델링<sup>§</sup>

이 봄 이\* · 이 봉 기\*<sup>†</sup>

\* 전남대학교 기계공학부

### Modeling of Capillary Filling Length in Silwet L-77 Added Poly(Dimethylsiloxane) (PDMS) Microchannels

Bom-ye Lee\* and Bong-kee Lee\*<sup>†</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received February 21, 2014 ; Revised June 10, 2014 ; Accepted June 11, 2014)

**Key Words:** Capillary Force(모세관 힘), Poly(dimethylsiloxane)(PDMS), Surfactant(계면활성제), Rectangular Microchannel(사각 마이크로 채널)

**초록:** 본 연구에서는 계면활성제를 첨가한 사각 PDMS(polydimethylsiloxane) 마이크로 채널에서의 모세관 흐름에 의한 충전 길이를 예측하기 위한 모델들을 제안하였다. 일반적으로 PDMS의 소수성 특성 때문에 모세관 힘만을 이용한 PDMS 마이크로 채널에서의 물의 이동에는 어려움이 따르게 된다. 따라서 본 연구에서는 계면활성제를 첨가하여 친수성을 가지는 PDMS 표면을 제작하고, 이 표면에서의 물의 접촉각 변화 측정 및 단순 모델을 수립하였다. 또한 친수성 PDMS 마이크로 채널에서의 모세관 힘에 따른 충전 길이를 예측하기 위해서 Washburn 방정식을 바탕으로 한 단순 모델을 수립하였다. 그 결과 유체의 충전 길이는 접촉각의 초기변화속도의 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 대표적인 세 가지 경우에 대한 모델을 제안하였으며, 이들은 MIMIC(MicroMolding In Capillaries)과 같은 마이크로 유체 기반의 생산공정의 설계와 개발에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

**Abstract:** In the present study, simple models were proposed to predict the capillary-driven flow length in a surfactant-added poly(dimethylsiloxane) (PDMS) rectangular microchannel. Owing to the hydrophobic nature of PDMS, it is difficult to transport water in a conventional PDMS microchannel by means of the capillary force alone. To overcome this problem, microchannels with a hydrophilic surface were fabricated using surfactant-added PDMS. By measuring the contact angle change on the surfactant-added PDMS surface, the behavior was investigated to establish a simple model. In order to predict the filling length induced by the capillary force, the Washburn equation was modified in the present study. From the investigation, it was found that the initial rate-of-change of the contact angle affected the filling length. Simple models were developed for three representative cases, and these can be useful tools in designing microfluidic manufacturing techniques including MicroMolding In Capillaries (MIMIC).

- 기호설명 -

$P_{cap}$  : 모세관 압력(Pa)  
 $\gamma$  : 표면 장력(N/m)  
 $\eta$  : 점도(Pa·s)

$Q$  : 체적 유량(m<sup>3</sup>/s)  
 $L(t)$  : 유체의 충전 길이(m)  
 $w$  : 채널의 너비(m)  
 $h$  : 채널의 높이(m)

#### 1. 서론

최근 마이크로유체역학(microfluidics)의 연구는 매우 활발하게 진행되고 있으며, 기초 연구들의 결과는  $\mu$ TAS(micro total analysis system), 랩온어칩(lab-on-

<sup>§</sup> 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임

<sup>†</sup> Corresponding Author, b.lee@chonnam.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

a-chip), 마이크로 반응기(microreactor) 등과 같은 응용 시스템의 개발에 다양하게 적용되고 있다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 응용 시스템들은 기본적으로 시스템을 구성하는 핵심 요소인 마이크로 채널(microchannel) 내부에서 극소량의 액체 시료에 대한 빠르고 정확한 처리에 의존하고 있다.<sup>(2)</sup> 마이크로 채널 내부에서 액체의 유동을 발생시키는 대표적인 방법으로는 외부의 펌프나 마이크로 펌프를 이용하여 압력구동 유동(pressure-driven flow)을 발생시키거나 또는 다양한 전기수력학적 방법(electrohydrodynamics)을 통한 유동 발생 등이 있다.<sup>(3-6)</sup> 그러나 이 방법들은 유체 펌프, 전기제어 장치, 전원장치 등의 외부의 추가적인 요소를 요구하므로 간단하게 사용하기 힘든 단점이 있다.<sup>(1)</sup>

또 다른 방법으로는 모세관 힘(capillary force)에 의해 유체의 충전율 유도를 하는 방법이 있다. 이 경우 마이크로 채널 내부의 액체와 채널 벽 사이에 존재하는 계면 장력(interfacial tension)에 의해서 유동이 발생하게 된다.<sup>(2)</sup> 일반적으로 모세관 힘에 의하여 마이크로 채널 내부에서 유체를 충전하기 위해서는 친수성(hydrophilic) 표면을 가지는 마이크로 채널이 유리하다. 하지만, poly(dimethylsiloxane) (PDMS)는 소수성(hydrophobic) 표면을 가지기 때문에 이를 효과적으로 적용하기는 어렵다.<sup>(7)</sup>

이와 같은 PDMS의 표면 성질을 친수성으로 변화시키는 대표적인 방법으로는 산소 플라즈마(oxygen plasma)를 통한 표면처리와 계면활성제(surfactant)를 첨가하는 방법 등이 있다. 이 중 플라즈마 표면 처리법은 표면의 개질이 영구적이지 못하지만,<sup>(8,9)</sup> 계면활성제의 첨가법은 상대적으로 안정적이며 표면의 개질이 반영구적이라는 장점을 가지고 있다.<sup>(10)</sup>

본 연구에서는 소수성 특성을 가지는 PDMS에 계면활성제의 하나인 Silwet L-77을 첨가하여 친수성 표면을 제작하고 이 표면에서의 접촉각(contact angle) 변화의 실험적 측정 및 모델링을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 친수성 PDMS가 적용된 사각 마이크로 채널(rectangular microchannel)에서의 모세관 힘에 의한 유체의 충전 길이 모델링을 수행하였다.

## 2. 이론 및 실험

### 2.1 이론

일반적으로 폐쇄 원통(closed cylindrical) 모양의 모세관 채널 내부에서의 모세관 힘에 의한 유동은 Washburn 방정식을 이용하여 표현이 된다.<sup>(11)</sup>

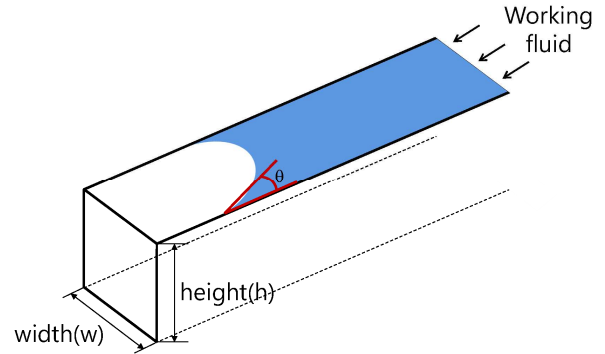


Fig. 1 Schematic of capillary filling in open rectangular microchannel

Washburn 방정식 바탕으로 Fig. 1과 같은 너비(w)와 높이(h)가 일정한 사각 채널의 윗면이 개방된 경우를 가정할 경우, 다음과 같은 압력 식을 얻을 수 있다.<sup>(2,12)</sup>

$$P_{cap} = \frac{\gamma}{hw} [(w+2h)\cos\theta - w] \quad (1)$$

식 (1)에서와 같이 모세관 힘에 의한 유동의 압력은 각 채널 벽에서의 접촉각( $\theta$ )의 코사인(cosine) 값에 따라 달라지며, 이 압력 식을 체적 유량(volumetric flow rate) 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 충전 길이에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{h^3 w}{12\eta L} \Delta P F_p \quad (2)$$

$$\frac{dL(t)}{dt} = V_0 = \frac{Q}{hw} = \frac{h^2}{12\eta L(t)} \Delta P F_p \quad (3)$$

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{\gamma h [(w+2h)\cos\theta - w]}{12w\eta L(t)} F_p \quad (4)$$

$$\int_{L_0}^{L(t)} dL(t) = \int \frac{\gamma h [(w+2h)\cos\theta - w]}{12w\eta} F_p dt \quad (5)$$

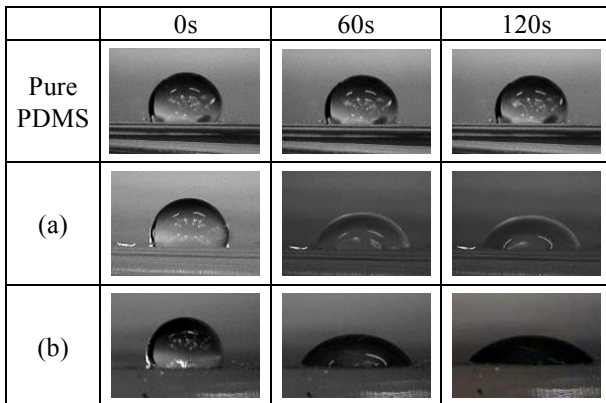
$$L^2 - L_0^2 = \frac{\gamma h [(w+2h)\cos\theta - w]}{6w\eta} F_p t \quad (6)$$

식 (6)의  $L_0^2$ 는  $t=0$  일 때의 초기 충전 길이를 의미한다. 또한, 위의 식들에서  $F_p$ 는 원형 단면에서 유도된 Washburn 방정식을 사각 단면의 채널로 적용하기 위하여 필요한 형상 인자(shape factor)이며, 아래의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$F_p = 1 - \frac{192h}{\pi^5} \sum_{p=1,3,\dots} \frac{1}{p^5} \tanh \frac{p\pi w}{2h} \quad (7)$$

### 2.2 접촉각 측정 실험

친수성을 가지는 PDMS(Sylgard 184, Dow) 표면을



**Fig. 2** Captured images showing time-dependent contact angles: (a) 0.50wt% Silwet L-77 added PDMS and (b) 1.00wt% Silwet L-77 added PDMS

제작하기 위하여, 먼저 PDMS 예비중합체(prepolymer)와 경화제(curing agent)를 10:1의 비율로 혼합하였다. 이 혼합 과정에서 표면 개질을 위한 계면활성제인 Silwet L-77(Momentive)을 일정량 첨가하였다.

본 연구에서는 계면활성제 첨가량의 영향을 확인하기 위하여 0.00wt%, 0.25wt%, 0.50wt%, 0.75wt%, 그리고 1.00wt%의 Silwet L-77이 첨가된 PDMS 표면을 제작하였다. 충분히 혼합된 PDMS 예비중합체는 80°C의 오븐에서 4시간동안 경화시켜 주었다.

첨가된 계면활성제에 의한 PDMS 표면의 특성 변화를 확인하기 위하여 DI-water 액적의 접촉각 변화를 측정하였다. 측정에 이용된 액적의 부피는 5μL 였으며, 10초 간격으로 액적의 접촉각 변화를 디지털 현미경(DinoCapture)으로 기록하였다. 또한 측정된 접촉각은 이미지 프로세싱 소프트웨어(ImageJ)를 사용하여 시간에 따른 접촉각의 변화를 확인하였다.

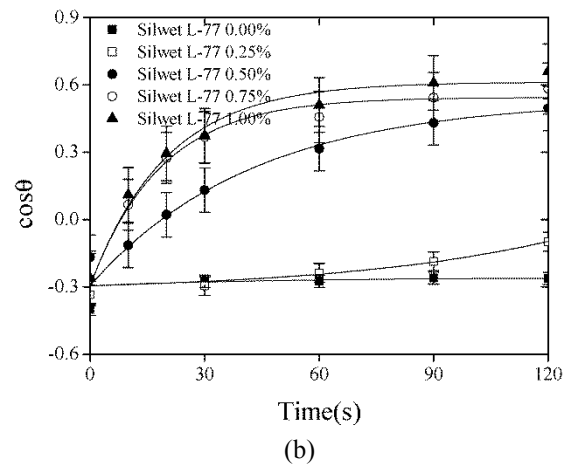
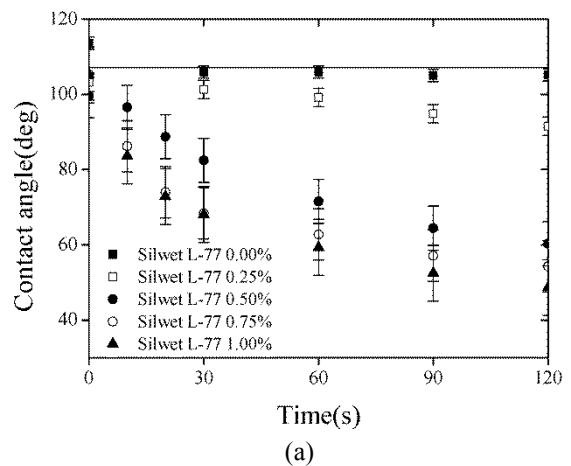
### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 친수성 PDMS의 접촉각 변화 모델

Fig. 2는 순수한 PDMS와 계면활성제의 첨가량(0.50wt% 및 1.00wt%)에 따른 접촉각의 변화를 보여준다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 순수한 PDMS는 105°의 접촉각을 가져 소수성 특성을 보인다. 하지만, Silwet L-77이 첨가된 PDMS의 경우에는 시간이 경과됨에 따라 초기의 접촉각이 감소하여 친수성 특성을 보이게 된다. 예를 들어, 0.50wt%의 Silwet L-77이 첨가된 PDMS는 120초가 지난 후 접촉각이 60°로 감소하며, 1.00wt%의 Silwet L-77이 첨가된 PDMS는 접촉각이 48°까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 계면활성제인 Silwet L-77을 첨가하여 제작된 PDMS 표면에서의

**Table 1** Parameters obtained by curve fitting

Silwet L-77 (wt%)	A	B	$\tau$
0.00	-0.295	-0.258	50.059
0.25	-0.295	-0.321	-56.238
0.50	-0.295	0.536	42.672
0.75	-0.295	0.545	18.581
1.00	-0.295	0.613	19.988



**Fig. 3** (a) Contact angle change of PDMS surfaces modified by adding Silwet L-77 and (b) calculated  $\cos\theta$  of the measured contact angle

의 접촉각은 계면활성제의 첨가량이 증가할수록 더 낮은 값을 가지게 된다. 또한 이와 같은 접촉각의 변화는 순간적으로 일어나는 것이 아니라 시간에 따라 진행되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)는 Silwet L-77이 첨가된 PDMS 표면에서의 시간에 따른 접촉각의 측정 결과를 보여준다. 즉, Silwet L-77이 첨가됨에 따라 접촉각이 시간에 따라 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한 Silwet L-77의 첨가량이 증가할수록

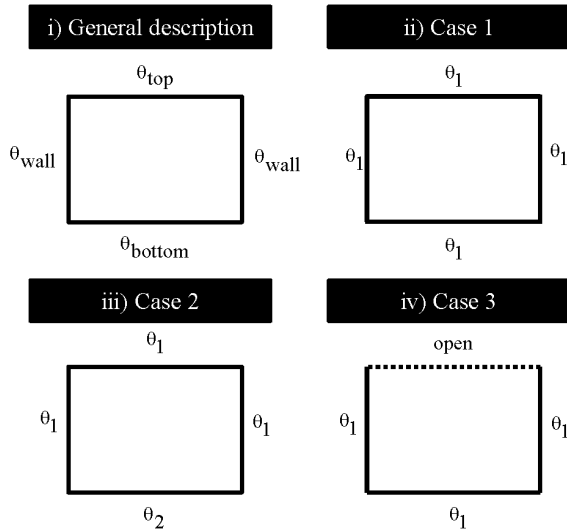


Fig. 4 Representative simple models for rectangular microchannels investigated in the present study

초기의 접촉각 변화 속도가 커지며, 수렴된 최종 접촉각 역시 감소하는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 시간에 따른 접촉각의 변화를 이용하여 마이크로 채널에서의 유동 길이 모델을 수립하기 위하여, 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 접촉각의 코사인 값을 계산하고 이 결과를 다음 식 (8)과 같은 지수함수의 형태 단순 모델로 표현하였다. 이 단순 모델을 적용함으로써, 초기값(A)과 최종 수렴된 값(B), 그리고 초기의 변화 속도( $\tau$ )를 포함하여 접촉각의 변화 거동을 나타낼 수 있다(Table 1).

$$\cos \theta = (A - B)e^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (8)$$

### 3.2 사각 마이크로 채널의 모델링

Silwet L-77의 첨가에 의한 PDMS 접촉각 변화를 나타내는 단순 모델을 이용하여 마이크로 채널에서의 모세관 현상이 적용되는 대표적인 경우에 대한 충전 길이 모델링을 수행하였다. Fig. 4는 본 연구에서 수행한 세 종류의 대표적인 경우를 보여 주고 있으며, 구체적인 접촉각의 크기는 Table 1과 같다. Fig. 4의 i)에 일반적인 폐쇄 사각 마이크로 채널의 단면 형상과 각 면에서의 접촉각의 정의를 나타내었다.

Case 1은 폐쇄 사각 마이크로 채널 중에서도 네 면이 동일한 접촉각( $\theta_1$ )을 가지는 경우를 나타내고 있다. 즉 마이크로 채널의 모든 표면이 동일한 특성을 가지고 있을 때 하나의 재료로 제작된 일반적인 마이크로 채널이 해당된다.

Case 2는 사각 마이크로 채널의 세 표면은 동일한 표면 특성을 가지지만 나머지 한 면이 다른 특성을

Table 2 Values for contact angles used in each model

	$\theta_1$	$\theta_2$
Case 1	40°~100°	
Case 2	100°	40°~100°
Case 2'	$\cos \theta = (A - B) \times e^{-t/\tau} + B$	100°
Case 3	$\cos \theta = (A - B) \times e^{-t/\tau} + B$	

Table 3 Surface tension and viscosity of water at 25°C.

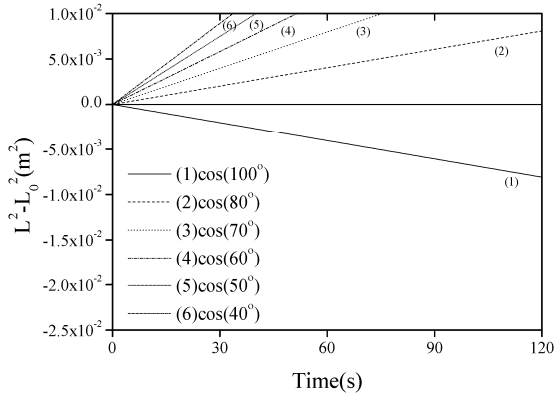
Material	Surface tension, $\gamma$ (N/m)	Viscosity, $\eta$ (Pa·s)
water	0.07197	0.00089

가지는 경우에 해당한다. 즉 세 면은 동일한 접촉각( $\theta_1$ )을 가지지만 나머지 한 면은 다른 접촉각( $\theta_2$ )을 가지는 경우이다. 모세관 힘을 이용한 고분자 패터닝 기술의 하나인 MIMIC(MicroMolding In Capillaries)이 이와 같은 경우의 대표적인 예이다.<sup>(13)</sup> 본 연구에서는 세 면은 순수한 PDMS를 적용하고 나머지 한 면은 다른 재료의 기판인 경우를 가정하였다.

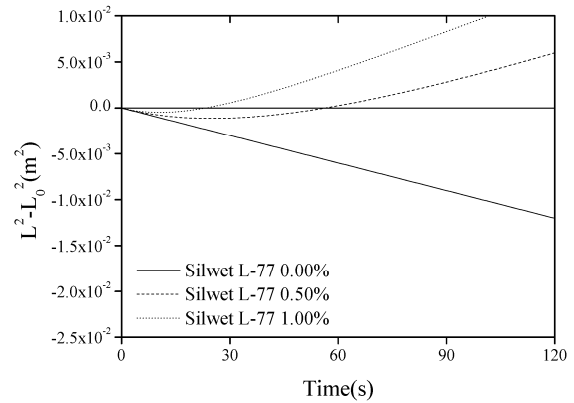
Case 2'는 Case 2와 유사한 폐쇄 사각 마이크로 채널을 나타내지만 세 면의 접촉각( $\theta_1$ )이 시간에 따라 변화하는 경우이다. Case 2와 같은 일반적인 MIMIC 공정에서는 소수성 PDMS 스탬프(stamp)를 친수성 기판에 접촉시켜 사각 마이크로 채널을 구성하고 모세관 힘에 의하여 그 채널로의 고분자 용액의 충전을 유도하게 된다. 하지만 소수성 PDMS가 아닌 Silwet L-77이 첨가된 PDMS를 이용하여 제작된 스탬프를 적용하는 경우, 시간에 따른 접촉각의 변화를 고려해 주어야 하며, 따라서 Table 2의 Case 2'와 같은 접촉각 조건을 적용하였다.

Case 3은 개방(open) 사각 마이크로 채널에서의 모세관 힘에 의한 유체의 충전을 나타낸다.<sup>(13)</sup> 세 표면이 동일한 재료로 구성이 되며, 본 연구에서는 Silwet L-77이 첨가된 PDMS를 적용한 경우를 가정하였다. 따라서 Table 2와 같이 시간에 따른 접촉각의 변화가 도입되었다.

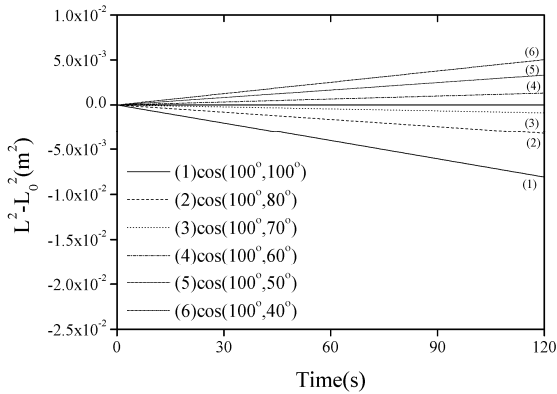
이와 같은 여러 경우에 대한 유체의 충전 길이에 대한 모델링 연구를 수행하여 각 경우에 대한 유동 특성을 확인하였다. 시간에 따른 접촉각의 변화는 지수함수의 형태를 가지는 접촉각의 코사인 모델(식 (8))을 모세관 압력식에 도입함으로써 고려할 수 있었다. 마이크로 채널은 너비(w) 45 $\mu$ m 및 높이(h) 30 $\mu$ m를 가지며 유체는 상온의 물을 가정하였다. 본 연구에 적용된 물의 주요 물성치는 Table 3과 같다.



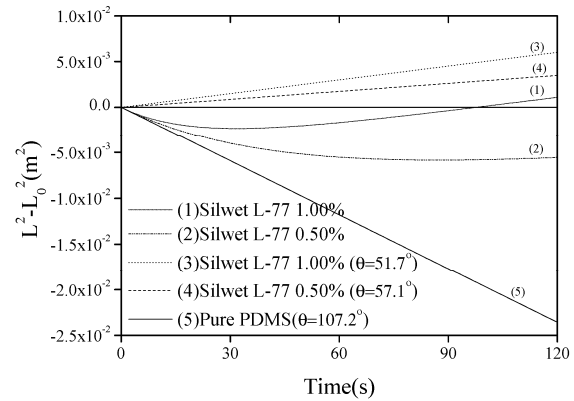
**Fig. 5** Plot of the capillary filling length predicted from Case 1 model: Effect of the identical contact angle of all surfaces



**Fig. 7** Plot of the capillary filling length predicted from Case 2' model: Effect of transient contact angle change



**Fig. 6** Plot of the capillary filling length predicted from Case 2 model: Effect of contact angle of one substrate



**Fig. 8** Plot of the capillary filling length predicted from Case 3 model

3.3 폐쇄 사각 채널의 충전 길이 모델링

Case 1의 경우에 대한 모세관 압력은 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 이를 식 (3)에 대입하여 기존의 연구들과 유사한 방법으로 유체의 충전 길이를 유도할 수 있으며,<sup>(2,11,12)</sup> 그 결과는 식 (10)과 같다.

$$\Delta P = \frac{\gamma}{hw} [2(w+h)\cos\theta] \tag{9}$$

$$L^2 - L_0^2 = \frac{\gamma h(w+2h)\cos\theta}{3w\eta} F_p t \tag{10}$$

이와 같은 충전 길이의 식을 통하여 사각 마이크로 채널의 네 면에서의 일정한 접촉각(θ)의 영향을 확인하였다. Fig. 5의 (1)과 같이 접촉각이 90° 이상인 경우에는 소수성 특성에 의하여 유동이 전진하지 못하는 결과를 보이고 있다. 하지만 접촉각이 90° 보다 작은 경우에는 시간에 따른 유동 길이의 증가를 확인할 수 있으며, 이는 모세관 힘에 의하여 유체가 마이크로 채널을 충전시킬 수 있음을 나타낸다. 또한 Fig. 5의 (6)과 같이 접촉각

의 크기가 작을수록 유체의 충전은 더 빠르게 일어나는 것을 알 수 있다.

세 면이 동일한 접촉각을 가지고 나머지 한 면이 다른 접촉각을 가지는 Case 2의 경우, 모세관 압력 및 충전 길이는 다음 식 (11) 및 (12)와 같이 유도할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{\gamma}{hw} [(w+2h)\cos\theta_1 + w\cos\theta_2] \tag{11}$$

$$L^2 - L_0^2 = \frac{\gamma h}{6w\eta} [(w+2h)\cos\theta_1 + w\cos\theta_2] F_p t \tag{12}$$

본 연구에서는 Table 1과 같이 세 면의 접촉각(θ<sub>1</sub>)은 100°로 가정하고 나머지 한 면의 접촉각(θ<sub>2</sub>)의 영향을 확인해 보았다. Fig. 6과 같이 θ<sub>2</sub>의 값이 60° 이상일 경우에는 유체의 충전이 일어나지 않지만, 그 이하의 접촉각의 경우에는 충전이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 PDMS 스탬프를 이용하여 기관 위에 패터닝을 하는 MIMIC과 같은 공정의 설계에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

Case 2와 유사하지만 세 면의 접촉각이 시간에 따라 변하는 Case 2'의 경우는 다음과 같은 관련 식들을 유도할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{\gamma}{hw} \left[ (w+2h) \left\{ (A-B)e^{-\frac{t}{\tau}} + B \right\} + w \cos \theta_2 \right] \quad (13)$$

$$L^2 - L_0^2 = \frac{\gamma h}{6w\eta} (w+2h) \tau \left[ \left\{ (A-B) - (A-B)e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} + Bt \right] F_p \quad (14)$$

$$+ \frac{\gamma h}{6\eta} t \cos \theta_2 F_p$$

이에 따른 충전 길이의 변화는 Fig. 7 과 같으며, 초기에는 충전이 일어나지 않으나 시간이 지나 접촉각이 특정한 값보다 작아지는 시점을 지나면서 충전이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Silwet L-77 과 같은 계면활성제의 첨가량이 증가할 수록 그 영향은 더 크고 빠르게 나타남을 알 수 있다.

### 3.4 개방 사각 채널의 충전 길이 모델

윗면이 개방되어 있는 Silwet L-77이 첨가된 마이크로 채널인 Case 3의 경우, 모세관 힘에 의한 유체의 충전 길이는 접촉각 변화 모델인 식 (8)을 식 (6)에 대입하여 적분함으로써 얻을 수 있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$L^2 - L_0^2 = \frac{\gamma h}{6w\eta} (w+2h) \tau \left[ \left\{ (A-B) - (A-B)e^{-\frac{t}{\tau}} \right\} + Bt \right] F_p \quad (15)$$

$$+ \frac{\gamma h}{6\eta} t F_p$$

Fig. 8의 (1)은 Silwet L-77이 1.00wt% 첨가된 개방 마이크로 채널에서의 유동 길이를 나타내고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 초기에는 유체의 충전이 일어나지 않지만 시간이 지나가면서 채널로의 유체 충전이 일어나게 된다. 하지만 (2)와 같이 0.50wt%로 Silwet L-77의 첨가량이 적을 경우에는 120초까지 충전이 일어나지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 (3)과 (4)는 Silwet L-77이 첨가되었을 때 각각의 접촉각 수렴값을 식 (6)에 적용하여 예측한 결과이다. 따라서 (1)과 (3)을 비교할 경우, 초기에는 유체의 거동이 차이가 나지만 시간이 지나서 접촉각이 일정한 값으로 수렴함에 따라 동일한 기울기를 가지는 결과를 보여주고 있다. 즉, Silwet L-77을 첨가한 PDMS 마이크로 채널에서의 유체의 충전 길이는 시간에 따라 일정한 증가를 보이는 것이 아니라 접촉각의

초기 변화 속도에 의해 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 계면활성제인 Silwet L-77을 첨가하여 친수성 표면을 가지도록 제작된 PDMS 마이크로 채널에서의 모세관 힘에 의한 유체 충전에 대한 단순 모델을 제안하고 그 특성을 확인해 보았다. 이를 위하여 먼저 Silwet L-77의 첨가량에 따른 PDMS 표면에서의 시간에 따른 접촉각 변화를 측정하고 이를 표현하기 위한 모델을 제안하였다. 이와 같은 모델을 이용하여 친수성으로 개질된 표면을 가지는 PDMS 마이크로 채널에서의 모세관 충전에 대한 충전 길이 모델들을 개발하고, 이를 통하여 관련 유동 현상에 대한 기초연구를 수행하였다. 그 결과 일반적인 PDMS에 비하여 Silwet L-77이 첨가된 PDMS 마이크로 채널은 모세관 힘에 의한 유체의 충전에 더욱 유리한 것을 확인할 수 있었다. 또한 접촉각의 초기 변화 속도에 의하여 충전 길이가 영향을 받는 것을 확인하였다.

이와 같은 모델링 연구는 향후 마이크로 채널에서의 모세관 충전뿐만 아니라 MIMIC과 같은 다양한 마이크로 유체 기반 생산공정의 설계와 개발에 이용될 수 있을 것이다.

## 후 기

이 논문은 2011 년도 전남대학교 학술연구비 지원 및 2013 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No. NRF-2011-0014439).

## 참고문헌 (References)

- (1) Ichikawa, N., Hosokawa, K. and Maeda, R., 2004, "Interface Motion of Capillary-Driven Flow in Rectangular Microchannel," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 280, No.1, pp. 155~164.
- (2) Yang, D., Krasowska, M., Priest, C., Popescu, M. N. and Ralston, J., 2011, "Dynamics of Capillary-Driven Flow in Open Microchannels," *J. Phys. Chem. C.*, Vol. 115, No. 38, pp. 18761~18769.
- (3) Stemme, E. and Stemme, G., 1993, "A Valveless Diffuser/Nozzle-based Fluid Pump," *Sens. Actuat. A.*, Vol. 39, No. 2, pp. 159~167.
- (4) Olsson, A., Larsson O., Holm J., Lundbladh, L., Ohman O. and Stemme G., 1998, "Valve-less Diffuser

- Micropumps Fabricated using Thermoplastic Replication,” *Sens. Actuat. A*, Vol. 64, No. 1, pp. 63~68.
- (5) Berg, J. M., Anderson, R., Anaya, M., Lahlouh, B., Holtz, M. and Dallas, T., 2003, “A Two-stage Discrete Peristaltic Micropump,” *Sens. Actuat. A*, Vol. 104, No. 1, pp. 6~10.
- (6) Kirby, B. J., 2010, *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices*, Cambridge University Press, New York, pp. 131~152.
- (7) Makamba, H., Kim, J. H., Lim, K., Park, N. and Hahn, J. H., 2003, “Surface Modification of Poly (dimethylsiloxane) Microchannels,” *Electrophoresis*, Vol. 24, No. 21, pp. 3607~3619.
- (8) Anderson, J. R., Chiu, D. T., Jackman, R. J., Cherniavskaya, O., McDonald, J. C., Wu, H., Whitesides, S. H. and Whitesides, G. M., 2000, “Fabrication of Topologically Complex Three-Dimensional Microfluidic System in PDMS by Rapid Prototyping,” *Anal. Chem.*, Vol. 72, No. 14, pp. 3158~3164.
- (9) Lee, C.-j., Lee, S.-k., Park, G.-h. and Kim, B.-m., 2008, “The Evaluation of Surface and Adhesive Bonding Properties for Cold Rolled Steel Sheet for Automotive Treated by Ar/O<sub>2</sub> Atmospheric Pressure Plasma,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 4, pp. 354~361.
- (10) Kim, Y.C., Kim, S.-H., Kim, D., Park, S.-J. and Park, J.-K., 2010, “Plasma Extraction in a Capillary-Driven Microfluidic Device Using Surfactant-Added Poly(dimethylsiloxane),” *Sens. Actuators B-Chem.*, Vol. 145, No. 2, pp. 861~868.
- (11) Washburn, E.W., 1921, “The Dynamics of Capillary Flow,” *Phys. Rev.*, Vol. 17, No. 3, pp. 273~283.
- (12) Kim, H. W., Park, S. J., Lee, B.-K. and Kim, D. S., 2013, “Versatile Graphene Nanocomposite Microheater Patterning for Various Thermoplastic Substrates Based on Capillary Filling and Transfer Molding,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 102, No. 10, pp. 101~907.
- (13) Kim, E., Xia, Y. and Whitesides, G. M., “Polymer Microstructures Formed by Moulding in Capillary,” *Nature*, Vol. 376, No. 6541, pp. 581~584.