

마이크로 원형 모세관에서 계면 이동 현상의 측정

이석종*, 성재용⁺, 이명호⁺⁺

(Manuscript received: Sep, 11, 2012 / Revised: Jan, 18, 2013 / Accepted: Jan, 30, 2013)

Measurements of Flow Meniscus Movement in a Micro Capillary Tube

Sukjong Lee*, Jaeyong Sung⁺, Myeong Ho Lee⁺⁺

Abstract

In this paper, a high-speed imaging and an image processing technique have been applied to detect the position of a meniscus as a function of time in the micro capillary flows. Two fluids with low and high viscosities, ethylene glycol and glycerin, were dropped into the entrance well of a circular capillary tube. The filling times of the meniscus in both cases of ethylene glycol and glycerin were compared with the theoretical models - Washburn model and its modified model based on Newman's dynamic contact angle equation. To evaluate the model coefficients of Newman's dynamic contact angle, time-varying contact angles under the capillary flows were measured using an image processing technique. By considering the dynamic contact angle, the estimated filling time from the modified Washburn model agrees well with the experimental data. Especially, for the lower-viscosity fluid, the consideration of dynamic contact angle is more significant than for the higher-viscosity fluid.

Key Words : Capillary meniscus (모세관 계면), Dynamic contact angle (동적 접촉각), Filling time (침투 시간), Surface tension (표면장력), Underfill process (언더필 공정)

1. 서론

19세기 초반부터 시작된 모세관 유동 현상에 관한 연구는 1921년에 Washburn⁽¹⁾의 의해 계면 이동에 대한 방정식이 정립되었고, Newman⁽²⁾의 의해 시간에 따른 접촉각 변화의 공식이 제안되었다. 최근 IT기기들이 얇고 소형화 되면서 적층(stacking) 기술을 기반으로 한 플립칩 패키지(flip-chip package)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고, 플립칩 패키지

공정에서 모세관 유동에 기반한 언더필(underfill) 공정이 중요한 이슈가 되고 있다. 언더필 공정은 기판에 집적회로가 구성되어 있는 칩(chip)의 면이 기판(substrate)을 마주보도록 부착한 후 그 사이의 좁은 갭(gap)에 고점도의 수지를 모세관력에 의해 침투(filling) 시키는 공정을 말한다. 이러한 언더필 공정은 기판과 솔더 범프(solder bump) 사이의 열팽창 계수의 불일치로 인한 열피로 파괴 현상을 줄이고 외부의 물리적 충격에 대해서도 완충역할을 함으로써 전자기기의 신뢰성을 높여준다⁽³⁾.

* 서울과학기술대학교 에너지환경대학원

+ 교신저자, 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

++ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

✉ Corresponding Author E-mail: jysung@seoultech.ac.kr

지금까지 모세관 언더필 공정에 대한 많은 연구들이 진행되었으며⁽⁴⁻¹¹⁾, 그 중 대부분이 마이크로 캡에서의 언더필 수지에 따라 침투되는 시간을 예측하고자 하는 연구들이다. 대표적인 사례로 Schwiebert와 Leong⁽⁴⁾은 두 평행한 평판사이의 모세관 유동의 침투 시간에 대해 연구하였고, Han과 Wang⁽⁵⁾은 마이크로 모세관에서 접촉각의 변화에 따른 침투 시간을 예측하였다. 이러한 모세관 유동에서 침투 시간을 정확히 예측하기 위해서는 점도, 표면장력, 접촉각과 같은 재료의 특성을 정확히 측정하는 것이 중요하다. 그러나 아직까지 동적 접촉각을 기초로 한 모세관 계면 유동에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 모세관 언더필 유동의 기초 연구로서 마이크로 원형관 내 모세관 현상에 의한 계면 접촉각의 동적 변화 및 유동 침투 시간을 측정하고 분석함으로써 이론 모델의 타당성에 대해 고찰하는 것이다. 이를 위해 마이크로 모세관 (micro capillary tube)에서 점도 차이가 큰 에틸렌 글리콜 (ethylene glycol)과 글리세린(glycerine)의 유체 물성을 측정하고, 시간에 따른 마이크로 모세관 내의 계면의 위치를 찾아내어 유동시간을 측정하고 비교한다. 시간에 따라 변하는 동적 접촉각을 측정하고 이를 반영한 수정된 이론 모델을 통하여 동적 접촉각이 모세관 계면의 침투시간에 미치는 영향을 논의한다.

2. 이론 모델

마이크로 원형 모세관에서 계면의 이동을 Fig. 1에 형상화하였다. 유체의 주입을 위한 높이 H 만큼의 중력과 접촉각 θ 에 따른 모세관력이 이동하는 유체에 작용하는 힘이며, 유동 상태는 완전 발달된 층류로 가정하였다.

식 (1)은 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 정상상태로 가정하여 유도된 모세관 계면의 지배방정식이다.

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

여기서, P 는 압력, μ 는 유체의 점성을 의미한다. 벽에서의 점착(no-slip) 조건을 고려하면 반경방향에 대한 유체의 속도

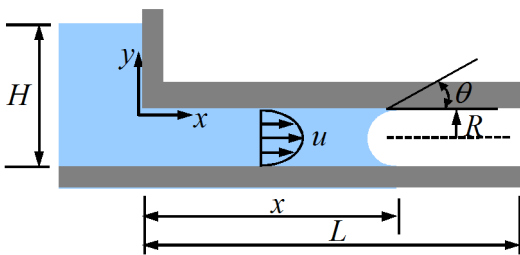


Fig. 1 Geometry of a capillary tube with a inlet well

분포 $u(r)$ 과 평균속도 V_{avg} 를 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2)$$

$$V_{avg} = -\frac{R^2}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right)$$

여기서, R 은 모세관의 반경이다.

유체에 작용하는 힘은 중력과 모세관력의 합이다. 유체 주입을 위한 수직관에서의 유체 높이를 H 라고 할 때, 중력은 $\rho g H$ 로 나타내며, 모세관력은 Young-Laplace 방정식에 의해 $2\sigma \cos \theta_c / R$ 로 나타낼 수 있다. 이때 ρ 는 유체 밀도, σ 는 표면장력계수, θ_c 는 계면에서의 접촉각이다. 유체 내부의 압력 변화가 선형적이라고 가정한다면 계면이 x 위치 있을 때 유체에 작용하는 힘은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{1}{x} \left(\rho g H + \frac{2\sigma \cos \theta_c}{R} \right) \quad (3)$$

식 (2)에서 평균 속도는 $V_{avg} = dx/dt$ 로 나타낼 수 있다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 유동 방향인 x 축에 대해 $[0, L]$ 구간으로 적분하면 식 (4)와 같이 표현되며, 이 식을 Washburn 모델(model)이라고 한다⁽¹⁾.

$$L^2 = \frac{\rho g H R^2 + 2R\sigma \cos \theta_c}{4\mu} t \quad (4)$$

Washburn 모델에서 유체가 흐르는 시간은 점도와 모세관 길이의 자승에 비례하고, 모세관력과 중력의 합에 반비례함을 나타낸다. 그러나 모세관력을 결정하는 중요한 인자인 접촉각을 고정 상수로 두었으므로 실제 유동과는 상당한 오차가 발생하게 된다.

한편, Newman⁽²⁾은 접촉각이 상수가 아니라 시간에 따라 변한다고 가정하고 다음 식을 제안하였다.

$$\cos \theta_c = \cos \theta_e (1 - ae^{-at}) \quad (5)$$

$$a = 1 - \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_e}, \quad c = \frac{\sigma}{\mu M}$$

여기서, θ_c 는 시간의 함수로 변하는 동적 접촉각(dynamic contact angle)이고, θ_0 는 초기 접촉각(initial contact angle), θ_e 는 평형상태에서의 접촉각(equilibrium contact angle)이다. 이때 유체와 접촉한 표면의 상태에 따라 상수 M 이 정해진다.

그러나 동적 접촉각에 대한 Newman 모델식을 이용한 체계적인 검증 연구는 아직 이루어지지 않았으며, 본 연구에서는 유체 유동에 의해 변하는 동적 접촉각을 실시간으로 측정함으로써 계면의 침투시간에 어떠한 영향을 미치는지 고찰한다. 식 (5)의 동적 접촉각을 사용하여 Washburn 모델에 적용하면 침투시간과 계면 이동 거리에 대한 수정된 방정식을 얻을 수 있으며, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$L^2 = \frac{\rho g H R^2 + 2 R \sigma \cos \theta_e [(t - a/c) + a e^{-t/c}]}{4 \mu} \quad (6)$$

이 수정된 Washburn 모델(modified Washburn model)은 시간에 따라 계면이 이동한 거리가 비선형이므로 반복적인 계산으로 풀어야 한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 마이크로 모세관 내의 계면이 이동한 시간을 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 모세관 끝

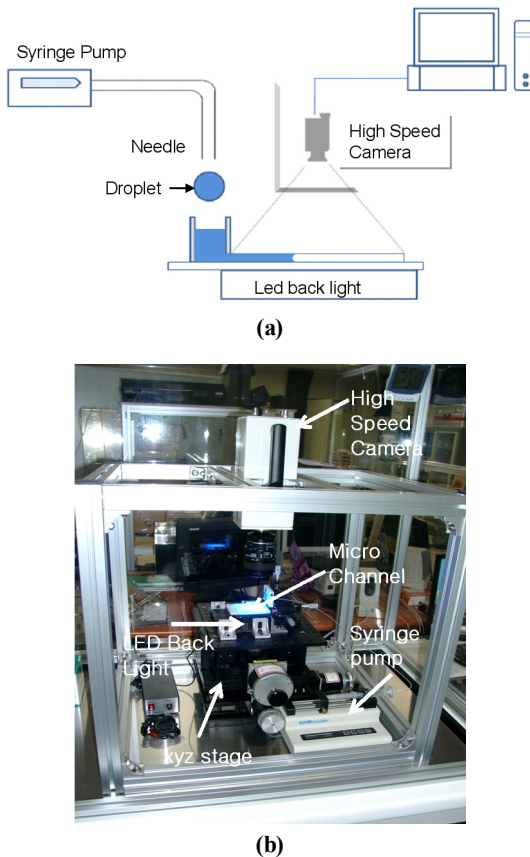


Fig. 2 Measurement of flow time and contact angle in the micro channel; (a) schematic diagram, (b) experimental equipment

에 형성된 수직관에 유체를 떨어뜨려 모세관 힘에 의해 계면이 이동하는 현상을 카메라로 연속 촬영하였다. 실험에 사용된 마이크로 모세관의 재질은 내부 유동을 볼 수 있는 투명한 borosilicate glass이고, 내경은 300 μ m이다. 모세관을 3차원 정밀 이송 스테이지에 올려 놓고 위치 및 초점을 정밀하게 조절하였다. 점도가 작을수록 유체의 이동속도가 빠르므로 고속 카메라 (Memview, 500fps @ 1,280 × 1,024)를 사용하였으며, 광원으로는 고배율 LED를 뒤쪽에서 조명하였다. 실험환경의 온도는 25 $^{\circ}$ C를 유지하였다.

모세관 계면 이동의 측정 범위는 관 입구에서 2mm 떨어진 지점부터 10mm 까지 측정하였다. 유체 주입을 위한 수직관의 직경은 3.75mm이고 높이는 5mm이다. 모세관 내부 유체에 작용하는 모세관력과 중력을 제외한 나머지 힘을 최소화 하기 위해 실린지 펌프(KDS-100)와 니들(needle)을 이용하여 수직관에 액적을 떨어뜨리는 방식으로 실험을 하였다.

3.2 계면 추적을 위한 영상처리 기법

마이크로 모세관 내의 시간의 따른 계면의 위치를 찾기 위해 계면에서 빛이 산란하여 그 부분의 밝기(intensity)가 달라지는

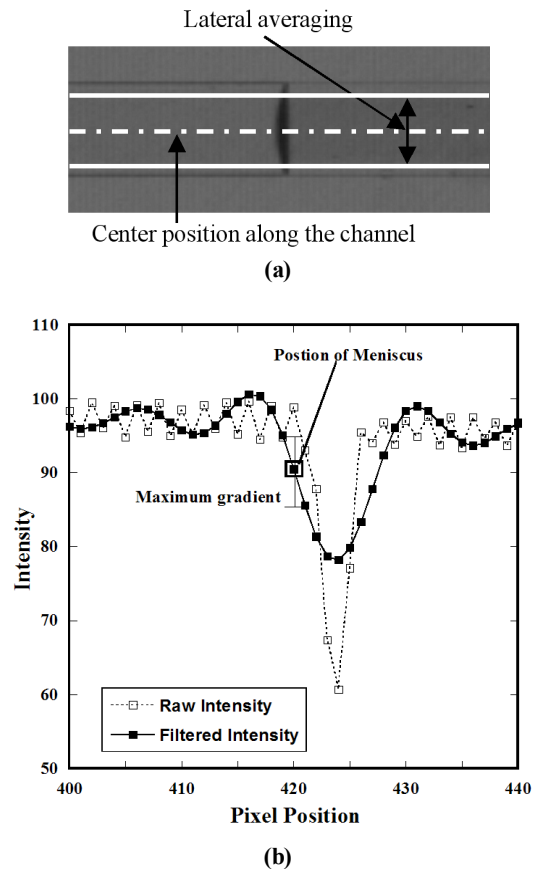


Fig. 3 Image processing technique to find the position of meniscus; (a) real image of capillary tube (b) gray level intensity along the capillary tube

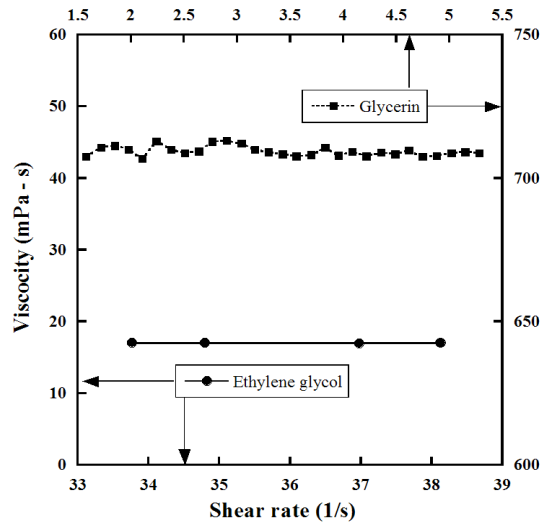
현상을 이용하였다. 배경 조명을 사용하였으므로 Fig. 3(a)와 같은 카메라 영상에서 계면이 있는 부분은 빛의 굴절에 의해 다른 부분보다 훨씬 어둡게 나타난다. 따라서 디지털 영상 처리 기법을 통해 관 중심을 따라 가면서 밝기가 가장 작은 위치를 찾아서 계면의 위치를 결정한다. 실제 영상에서는 노이즈가 많이 포함되어 있으므로 그 오차를 줄이기 위해 관의 중앙 위치를 기준으로 좌우로 관의 안쪽 가장자리가 차지하는 만큼의 픽셀에 대해 평균하고(lateral averaging), 관 중심을 따른 밝기값을 저역필터(low pass filter)를 이용하여 필터링하였다.

Fig. 3(b)는 관 중심을 따라 측정된 영상의 밝기 변화를 나타내고 있다. x 축 방향의 픽셀(pixel) 위치에 대해 원시 밝기(raw intensity)와 필터링 한 밝기(filtered intensity)를 비교하였다. 원시 영상은 계면 근처에서 영상 노이즈로 인해 밝기 변화가 심한 반면 필터링된 영상은 노이즈가 많이 감소되었음을 볼 수 있다. 본 연구에서는 필터링된 밝기 분포로부터 밝기의 변화율이 최대가 되는 지점을 유체 계면의 위치라고 정의하였다. 이와 같은 방법을 샘플링된 모든 이미지에 적용하면 시간의 따른 계면의 위치를 픽셀로 나타낼 수 있다. 작동 유체로 사용된 에틸렌 글리콜과 글리세린의 샘플링 주기는 각각 1,000Hz와 60Hz 이고, 영상과 실제 대상물간의 확대비(scale factor)는 12 μ m/pixel이다.

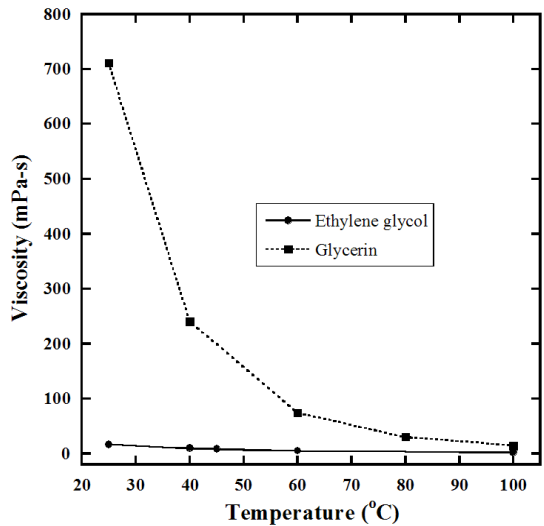
4. 유체 물성 측정

모세관 유동에 지배적인 영향을 주는 유체 물성은 점도, 표면장력, 접촉각이다. 따라서 유체 물성을 정밀하게 측정하는 것이 중요하며, 본 연구에서 사용된 저점도인 에틸렌 글리콜과 고점도인 글리세린에 대하여 이들 물성들을 측정하였다. 점도는 점도계(Brookfield, DV-III + ULTRA Rheometer)를 이용하여 전단율(shear rate)과 온도 변화에 따라 측정하였다. Fig. 4(a)에서는 전단율에 따른 두 유체의 점도변화를 보여주고 있으며, 두 유체 모두 전단율이 증가함에 따라 점도의 변화가 거의 없는 Newtonian 유체임을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서는 온도에 따른 점도 변화를 측정하였다. 그 결과, 에틸렌 글리콜은 온도가 증가함에 따라 미약하게 감소하였고, 글리세린은 온도가 증가하면서 점도가 크게 감소하는 모습을 볼 수 있다.

유체의 표면장력은 접촉각 측정기(KSV, CAM 200)를 이용하여 측정하였다. 측정방법은 Fig. 5처럼 니들 끝단에 펜던트 액적(pendent drop)을 형성하는 방식을 이용하였다. 액적이 점점 커져서 니들 끝단에 부착되어 있는 액적이 끊어져 떨어지지 직전에 액적의 부피 V_{drop} 를 측정하고, 니들 직경 D 를 이용하여 식 (7)과 같이 표면장력을 계산할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Viscosities of ethylene glycol and glycerin according to the variations of (a) shear rate and (b) temperature

$$\sigma = \frac{V_{drop} \rho g}{\pi D} \quad (7)$$

유체 계면의 고체 표면에 대한 접촉각은 유체 종류 뿐만 아니라 고체 표면의 재질 및 상태에 따라 달라지는 매우 민감한 물리량이다. 접촉각을 앞서 설명한 접촉각 측정기로도 측정가능하지만 동일한 표면 상태를 보장하기 위하여 원형관 내에 형성된 계면 접촉각을 직접 측정하였다. Fig. 6은 평형상태 접촉각(equilibrium contact angle)을 측정하기 위하여 관 내 유체가 정지 상태에 있을 때, 평형상태에 도달한 유체 계면의 형상을 보여주고 있다. 이 계면 영상으로부터 3-point arc를 추출하여 접촉각을 계산하였다. 이 방법에서는 계면의 형상이 원호의 일부라는 가정이 들어 있으며, 계면이 채널 벽면과 만나는 2 점과

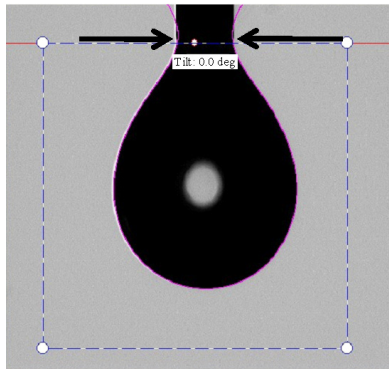


Fig. 5 Image of a pendent drop to measure the surface tension coefficient

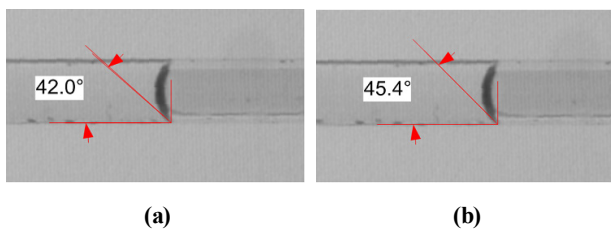


Fig. 6 Equilibrium contact angle for a stationary fluid in the capillary tube; (a) ethylene glycol, (b) glycerine

Table 1 Material properties measured at the room temperature (25°C)

Fluid material	Ethylene glycol	Glycerine
Density, g/cc	1.102	1.232
Surface tension, mN/m	49.39	64.90
Viscosity, mPa·s	16.99	717.1
Contact angle in a capillary tube, degree	42	45.4

채널 중심에서의 최대 아크(arc) 점을 이용하였다. 따라서 3 점을 지나는 원호는 유일한 값으로 결정되며, 이로부터 접촉각이 계산된다. 다만, 영상의 해상도에 의해 3 점의 위치 결정 오차가 수반되며, 본 연구에서는 약 2 pixel (17 μm)의 오차가 존재한다. 이상의 기법으로 측정된 에틸렌 글리콜과 글리세린의 유체 물성값을 Table 1에 정리하였다.

5. 모세관 계면의 이동

모세관 계면 이동에 대한 기존 연구는 대부분 평형상태 접촉각을 기반으로 계면 침투시간을 예측하였다. 그러나 많은 연구에 있어 이론 모델에 의한 예측치와 실제 실험 데이터와의 차이가 보고되었으며⁽⁵⁾, 본 연구에서는 기존의 이론 모델의 한계점을 극복하기 위하여 Newman의 동적 접촉각 모델을 채택한 수

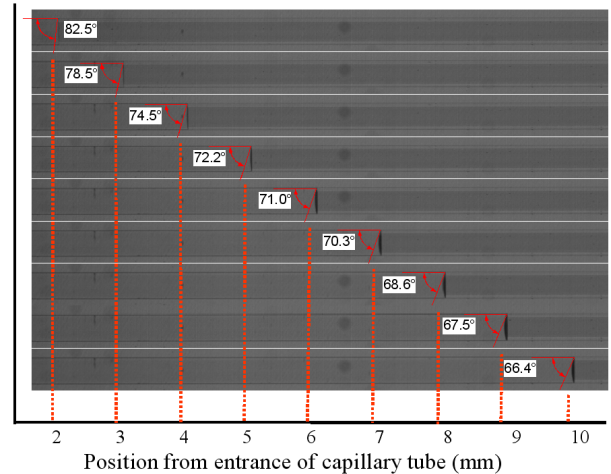


Fig. 7 Dynamic contact angle for a moving fluid (glycerine) in the capillary tube

정된 방정식을 기반으로 계면 침투 시간을 고찰하였다. 이를 위해서는 모세관 계면이 이동하면서 변화하는 접촉각을 실시간으로 측정하는 것이 필요하며, Fig. 7에 그 예를 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 원형 모세관 내에 계면이 왼쪽에서 오른쪽으로 침투해 들어가면서 접촉각이 점점 작아지는 현상이 나타났다. 이렇게 유체가 모세관 내부로 침투하면서 접촉각이 변하는 이유는 계면에 작용하는 힘의 평형이 달라지기 때문이다. 정지한 유체의 경우 액체-고체-기체가 만나는 계면에서 각 물질 간의 계면 에너지 크기에 접촉각이 결정되지만, 움직이는 유체의 경우 계면 주위 유체 속도장 변화에 의한 수직 응력(normal stress)이 추가적인 힘으로 작용하여 계면의 형상을 변화시킨다. 모세관으로 주입되는 액체의 계면은 입구에서 거의 90°의 접촉각으로 진입하지만 액체-고체-기체의 계면 에너지에 의해 평형상태 접촉각으로 변화하려는 힘과 유체 유동에 의한 수직응력이 상호작용하여 계면 침투 깊이에 따라 접촉각이 달라진다. 이를 동적 접촉각이라 하며, 본 연구에서는 각 시간에 따른 영상을 기반으로 동적 접촉각의 변화를 측정하였다.

Fig. 8에서는 에틸렌 글리콜과 글리세린에 대해 측정된 침투 시간과 이론 모델에서 예측한 침투 시간을 비교하였다. 이론 모델 중에서 Washburn 모델은 식 (4)를 기반으로 유체 물성치와 평형상태 접촉각을 이용하여 계산하였으며, 수정된 Washburn 모델은 식 (6)을 기반으로 Fig. 7에서 측정된 동적 접촉각을 이용하여 계산하였다. 그 결과, 기존의 Washburn 모델은 주어진 위치까지 침투하는데 걸리는 시간이 실제 실험데이터 보다 작게 예측되었으나, Newman의 동적 접촉각을 이용해 수정된 Washburn 모델은 실험데이터와 잘 일치함을 볼 수 있다. Newman의 동적 접촉각 모델에서 식 (5)의 상수 M 과 초기 접촉각 θ_0 는 측정된 접촉각 변화 데이터를 곡선점합(fitting)하여 얻었으며, 에틸렌 글리콜의 경우 $M = 10.2$, $\theta_0 = 79^\circ$ 이고

글리세린의 경우 $M=1$, $\theta_0 = 89.5^\circ$ 이다. 여기서, 상수 M 은 표면거칠기, 건조도 등 표면 상태에 따라 접촉각이 달라지는 것을 보정하는 값이다. Han과 Wang⁽⁵⁾은 상수 M 을 결정함에 있어서 동적 접촉각을 측정하지 않고 단순히 측정된 침투시간에 Washburn의 이론 모델식을 곡선접합하여 얻었으나, 본 연구에서는 동적 접촉각을 직접 측정하고 이를 Newman의 동적 접촉각 모델식으로 근사하여 얻었다는 점에서 동적 접촉각을 보다 더 실질적으로 모사하였다고 볼 수 있다. 점도에 따른 영향을 살펴보면, 저점도인 에틸렌 글리콜의 경우(Fig. 8(a))가 고점도인 글리세린의 경우(Fig. 8(b))보다 계면의 침투 시간은 훨씬 작게 걸리면서도 동적 접촉각에 의한 영향은 매우 크게 나타났다. 즉, 점도가 낮을수록 계면 침투 속도가 빠르고, 이를 정확히 예측하기 위해서는 동적 접촉각에 대한 고려가 더욱 더 중요해짐을 알 수 있다.

6. 결론

점도가 다른 두 유체에 대해 원형 마이크로 모세관 내의 모세관력에 의해 이동되는 계면의 위치를 측정하였다. 이론적 모델과 비교하기 위해 모세관 현상에 영향을 주는 점도, 표면장력, 접촉각을 측정하였다. 특히, 접촉각은 유체가 정지된 평형상태 접촉각 뿐만 아니라 유체가 흐르고 있는 상태에서의 동적 접촉각을 시간에 따라 측정함으로써 Newman의 동적 접촉각 모델을 계산하였다. Newman 모델을 기반으로 수정된 Washburn 모델을 이용하여 계면 침투 시간을 예측한 결과, 기존의 평형상태 접촉각 기반의 Washburn 모델에 비해 훨씬 더 계면 침투 시간을 잘 예측하였다. 이러한 동적 접촉각에 대한 고려는 점도가 낮은 유체일수록 더 중요해지며, 모세관 언더필 유동 예측에 있어 매우 중요한 요소이다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Washburn, E. W., 1921, "The Dynamic of Capillary Flow," *Phys. Rev.*, Vol. 17, pp. 273~283.
- (2) Newman, S., 1968, "Kinetics of Wetting of Surfaces by Polymers; Capillary Flow," *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 26, No. 2, pp. 209~213.
- (3) Suryanarayana, D., Hsiao, R., Gall, T. P., and McCreary, J. M., 1991, "Enhancement of Flip-chip Fatigue Life by Encapsulation," *IEEE Comp., Hybrids Manufacturing Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 218~223.
- (4) Schwiebert, M. K., and Leong, W. H., 1996, "Underfill Flow as Viscous Flow Between Parallel Plates Driven by Capillary Action," *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Vol. 19, No. 12, pp. 133~137.
- (5) Han, S., and Wang, K. K., 1997, "Analysis of the Flow of Encapsulant During Underfill Encapsulation of Flip-chips," *IEEE Tran. Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 424~433.
- (6) Young, W. B., and Yang, W. L., 2002, "The Effect of Solder Bump Pitch on the Underfill Flow," *IEEE Trans. Advanced Packaging*, Vol. 25, No. 4, pp. 537~542.
- (7) Wang, J., 2002, "Underfill of Flip Chip on Organic Substrate: Viscosity, Surface Tension, and Contact

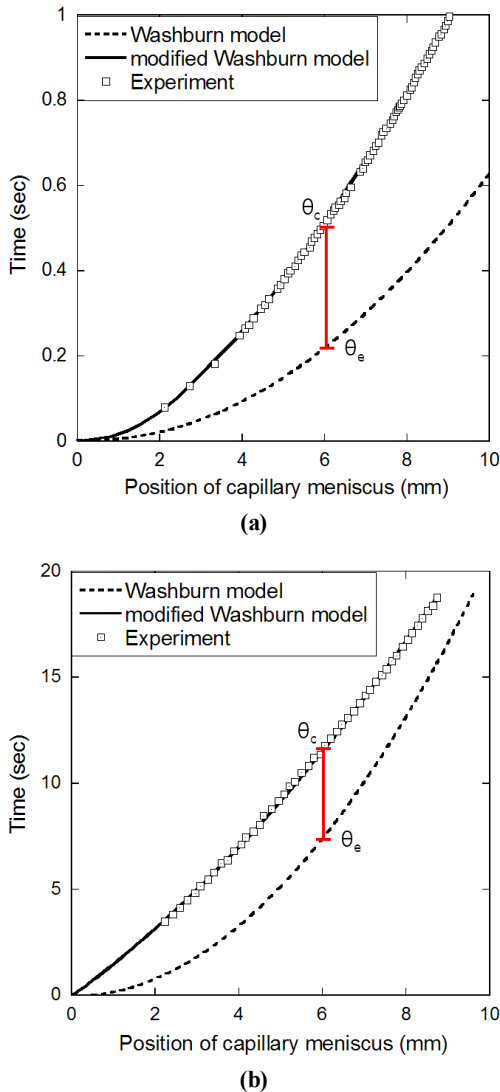


Fig. 8 Filling time compared with theoretical models; (a) ethylene glycol, (b) glycerin

- Angle,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, No. 2, pp. 293~299.
- (8) Wan, J. W., Zhang, W. J., and Bergstrom, D. J., 2005, “An Analytical Model for Predicting the Underfill Flow Characteristics in Flip-chip Encapsulation,” *IEEE Trans. Advanced Packaging*, Vol. 28, No. 3, pp. 481~487.
- (9) Yin, B. Y. W., 2007, “Designing Underfill Material in Resolving Package High Coplanarity Issues,” *9th Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 636~639.
- (10) Ho, P. S., Xiong, Z. P., and Chua, K. H., 2007, “Study on Factors Affecting Underfill Flow and Underfill Voids in a Large-die Flip Chip Ball Grid Array (FCBGA) Package,” *9th Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 640~645.
- (11) Wan, J. W., Zhang, W. J., and Bergstrom, D. J., 2008, “Experimental Verification of Models for Underfill Flow Driven by Capillary Forces in Flip-chip Packaging”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, No. 3, pp. 425~430.