

방사광 X-선 영상법을 이용한 소수성 마이크로 관 내 물-글리세롤 혼합물 슬러그 계면 가시화를 통한 동적접촉각 상관식 검증

장진규* · 김영현* · 김경준* · 이정훈** · 이연원* · 유동인*[†]

*부경대학교 기계설계공학과
 48547 부산광역시 남구 용소로 45
 **부경대학교 금속공학과
 48547 부산광역시 남구 용소로 45

(2021년 10월 1일 접수, 2021년 10월 12일 수정본 접수, 2021년 10월 13일 채택)

Verification of the Experimental Correlation for Dynamic Contact Angle by Visualizing Interfaces of Water-Glycerol Mixture Slug in a Hydrophobic Microtube via Synchrotron X-ray Imaging

Jin Gyu Jang*, Young Hyun Kim*, Kyoung Joon Kim*, Junghoon Lee**, Yeon Won Lee* and Dong In Yu*[†]

*Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea

**Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea

(Received 1 October 2021; Received in revised from 12 October 2021; Accepted 13 October 2021)

요 약

움직이는 접촉선에서의 계면 거동을 이해하기 위해 많은 연구자들은 동적접촉각에 대한 연구를 지속적으로 연구해 왔다. 하지만 가시화 기술의 한계로 선행연구에서의 동적접촉각에 대한 실험은 일반적으로 친수성 미세관에서 가시광 선 기반으로 실험이 수행되었다. 하지만, 최근 다양한 연구 및 산업 분야에서 소수성 미세관에서의 동적접촉각에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 높은 공간 및 시간 분해능을 갖는 방사광 X-선 영상법을 이용하여 소수성 마이크로 튜브 내 물-글리세롤 혼합물 슬러그의 동적접촉각을 측정하였으며, 이를 바탕으로 기존의 동적 접촉각 실험 상관식을 검증하였다.

Abstract – Dynamic contact angles have investigated by numerous researchers for understanding interfacial behavior at moving contact lines. However, due to limitation of visualization techniques, previous experiments for dynamic contact angles have conducted limitedly in hydrophilic capillary tubes based on visible ray. Recently, there is continuous need for research on dynamic contact angles in hydrophobic capillary tubes on various research and industrial fields. Therefore, in this study, we measure the dynamic contact angles of water-glycerol mixture slug in hydrophobic microtubes using synchrotron X-ray imaging. Based on the visualized data, we verified the previous experimental correlations for dynamic contact angles.

Key words: Dynamic contact angle, Synchrotron X-ray imaging, Hydrophobic, Contact line, Interface

1. 서 론

여러 개의 상(phase)이 공존하는 다상시스템(multiphase system)에서 계면(interface) 및 접촉선(contact line)의 거동 및 형태는 고체

표면의 젖음성(wetting)에 영향을 받으며, 특히 미니(~mm), 마이크로미터(~μm) 크기의 다상시스템의 경우, 계면현상(interfacial phenomena)은 젖음성에 크게 지배를 받게 된다. 또한 다상시스템의 성능과 직결되는 물질 및 열전달은 주로 계면이나 접촉선 주변에서 발생하기 때문에 젖음성은 다상시스템의 중요한 설계 인자 중 하나이다. 고체 표면의 젖음성은 고체-액체-기체가 만나는 접촉선에서의 접촉각(contact angle)으로 정량화된다. 특히, 다상시스템 내 정상 또는 비정상적인 작동 조건에서 계면 및 접촉선은 움직이게 되며 이는 모세관력(capillary force), 점도(viscosity) 및 접촉선 마찰(friction)로 인한 유체 저항력 간의 복잡한 상호 작용을 동반하게

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: diyu@pknu.ac.kr

§이 논문은 포항공과대학교 강인석 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

된다. 이러한 힘의 상호작용은 동적접촉각(dynamic contact angle)이라는 변수로 정량화하는 것이 일반적이다.

따라서, 많은 연구자들은 움직이는 계면 현상을 이해하기 위해 동적접촉각에 대한 연구를 지속적으로 수행하였다. 현재까지도 젖음성 현상을 포함한 계면 유동 현상을 신뢰할 수 있는 수치 해석 방법은 부재하기 때문에 대부분의 연구자들은 실험적으로 동적접촉각을 측정하는 연구를 수행하였다. 주로 가시화 기법의 한계로 가시광선(visible ray)기반으로 투과성이 좋은 유리와 같은 친수성(hydrophilic) 특성의 미세관에서 동적접촉각을 측정하였으며, 이를 바탕으로 실험상관식을 개발하였다[1-10]. 하지만, 가시광선 기반의 가시화 기법의 경우 상대적으로 낮은 공간분해능, 계면 산란, 빛의 굴절 현상으로 인한 원형관 벽면 근처에서의 영상 왜곡 등 내재적인 문제점을 가지고 있어 이는 많은 연구자들의 노력에도 불구하고 실험오차를 줄이지 못하는 한계를 지니고 있었다.

최근, 다양한 연구 및 산업 분야에서 소수성 표면에서의 계면 현상에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다[11-15]. 본 현상을 이해하기 위해서는 무엇보다도 소수성(hydrophobic) 미세관에서의 동적접촉각에 대한 실험적 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 소수성 미세관에서의 동적접촉각에 대한 연구를 수행하였다. 특히, 기존의 가시화 기법의 한계를 극복하기 위하여 높은 시간(~1,000 fps) 및 공간 분해능(~1.1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)을 갖는 방사광 X-선 영상법을 도입하여 동적접촉각을 정밀하게 측정하였으며, 다양한 중량 비(50, 80, 90 w.t.%)로 혼합된 물-글리세롤 혼합물 슬러그를 이용하여 액체 점성계수(viscosity)에 따른 동적접촉각의 영향을 분석하였다. 또한, 방사광 X-선 영상법으로 측정된 동적접촉각 데이터를 기반으로 선행연구자들에 의해 제시된 동적접촉각 실험 상관식을 검증하였다.

2. 실험

실험장치 개념도는 Fig. 1과 같다. 본 실험의 실험부로는 소수성 특성을 갖는 PFA (Perfluoroalkoxy)재질의 마이크로미터 크기 내경 (Upchurch, 1514L, D=796 μm)을 갖는 미세관을 사용하였으며, 개방 루프(open loop) 실험장치에서의 충분한 정상상태 유동길이를 확보하기 위해 관 길이는 10 m로 하였다. 미세관에서의 계면 현상은

Table 1. Water-glycerol mixture properties

Glycerol weight percent [%]	Density ρ [kg/m ³]	Surface tension σ [mN/s]	Viscosity μ [mPa.s]
50	1125	68	5.96
80	1190	65	85
90	1240	64	251

표면 젖음성에 크게 영향을 받기 때문에 실험 전 시험부는 세정 과정 1) 미세관 내 아세톤 주입, 2) 미세관 내 메탄올 주입, 3) 미세관 내 증류수 주입, 4) 질소 건을 이용한 미세관 내 수분 제거, 5) 진공 챔버 내에서 24시간 건조를 진행하였다.

본 실험에 사용된 작동 유체는 물-글리세롤 혼합물이다. Table 1에서와 같이 물-글리세롤 혼합물은 혼합비에 따라 밀도, 표면장력에 비해 점성계수의 변화가 큰 특성이 있다. 또한, 선행연구결과에 따르면 글리세롤의 경우 다른 유체와는 달리 동적접촉각이 표면의 젖음성에 영향을 받지 않는 특성이 보고되고 있다[16]. 따라서, 본 연구에서는 다양한 중량비(50, 80, 90 w.t.%)의 물-글리세롤 혼합물의 동적접촉각 실험을 통해 점성계수의 영향을 분석하고, 동시에 친수성 특성의 미세관 실험 데이터 기반으로 개발된 동적접촉각 상관식을 소수성 미세관 실험 데이터 기반으로 효율적으로 검증하고자 하였다.

본 실험에서는 높은 시간(~1,000 fps) 및 공간 분해능(~1.1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)을 갖는 방사광 X-선 영상법을 도입하기 위하여 모든 실험 과정은 포항가속기연구소(Pohang Accelerator Laboratory) 9D(XNMM) 빔라인에서 진행되었다. 방사광 X-선 영상법은 상대적으로 높은 공간분해능을 가지며, 특히 계면 산란, 빛의 굴절 등의 문제점을 해결할 수 있어 Fig. 2와 같이 가시광선 기반의 가시화 기법에 비해 명확한 계면 영상 이미지를 획득할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 방사광 X-선 피폭은 인체에 치명적이기 때문에 가시화 실험 과정은 실험장치가 있는 차폐실(shielding room) 외부에서 원격으로 제어하여 수행되었다.

먼저, 마이크로 주사기(Hamilton, 1701)를 이용하여 5 mm 길이의 물-글리세롤 액체 슬러그(slug)를 시험부에 주입한 후 실험 장치에 테프론 피팅을 이용하여 연결한다. 압축된 공기를 전공 레귤레이터

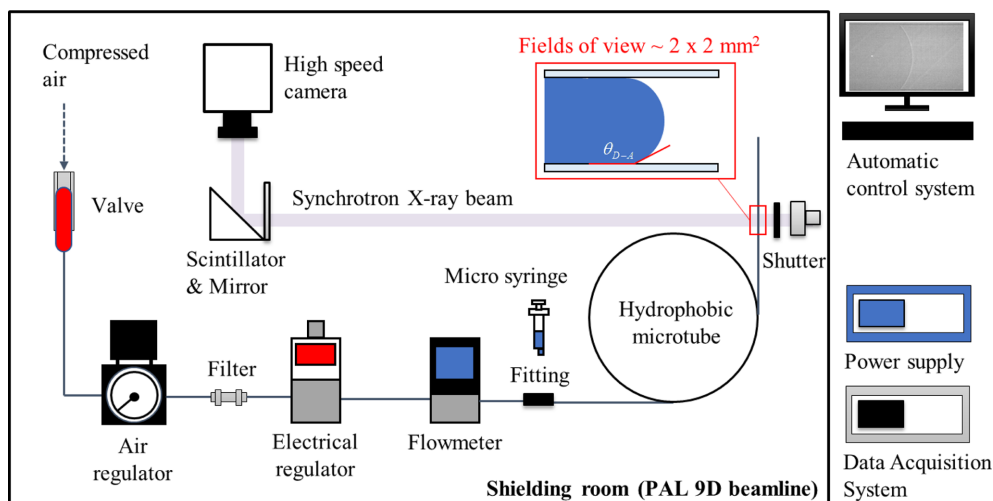


Fig. 1. Schematics of the experimental apparatus.

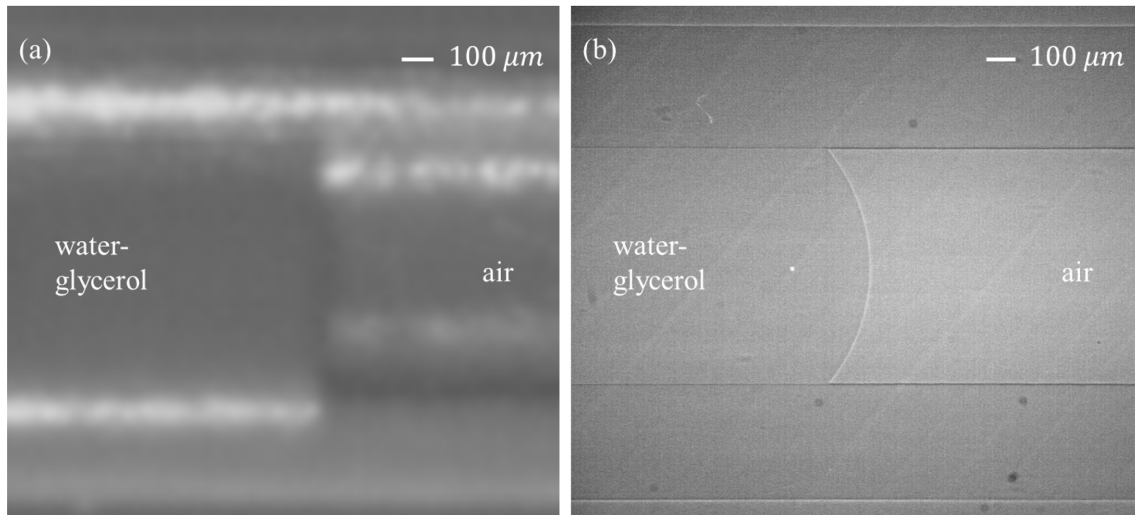


Fig. 2. Comparison between images via (a) light ray and (b) synchrotron X-ray.

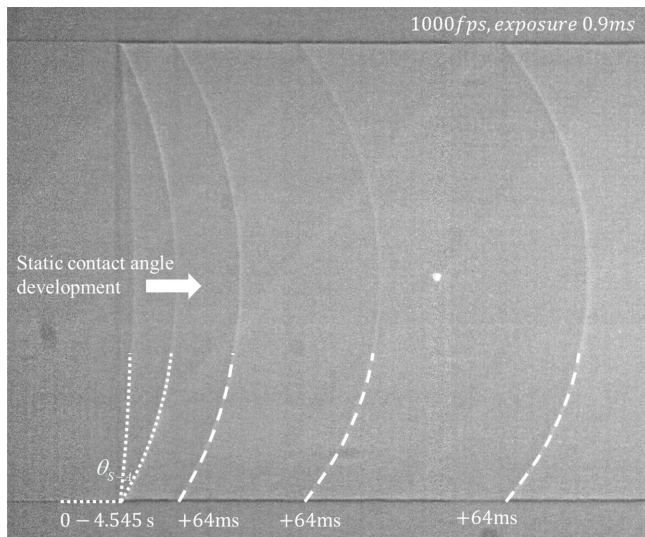


Fig. 3. Visualization of static advancing contact angle via synchrotron X-ray imaging (WG90 w.t.% cases).

(SMC, ITV1030-211CS5)의 전압을 전원공급장치(VuPower, K3003D)로 제어하여 시험부 내 유동을 구현하였다. 전공 레귤레이터에 의해 시험부 입구단이 가압 되면 액체 슬러그 앞·뒤의 압력차에 의해 액체 슬러그 계면은 변형이 발생하고 Fig. 3와 같이 결국 액체 슬러그는 시험부 입구에서 출구 방향으로 이동하게 된다. 액체 슬러그가 움직이기 직전 앞 단 접촉선에서의 접촉각인 정적 전진 접촉각(Static advancing contact angle, $\theta_{s,A}$)을 가시화한다. 이후, 물-글리세롤 액체 슬러그는 시험부 대부분의 영역에서 정상상태 유동을 유지하면서 이동하다가 최종 출구 밖으로 나가게 된다. 이때 출구 근처에서 등속 운동하는 액체 슬러그의 앞 단 접촉선에서의 접촉각인 동적 전진 접촉각(Dynamic advancing contact angle, $\theta_{d,A}$)을 Fig. 4와 같이 가시화한다. Fig. 5(a)와 같이 차압식 가스 유량계(OMEGA, FMA-2615A)를 이용하여 정상상태 유동을 확인하였으며, 계면속도는 Fig. 5(b)와 같이 가시화 이미지를 바탕으로 측정하였다. 유량 데이터는 데이터 수집기(Agilent, 34970A)를 이용하여 실시간(0.5초당)으로 수집하였다. 측정된 속도 범위는 $0.01 < u[m/s] < 0.027$ 이

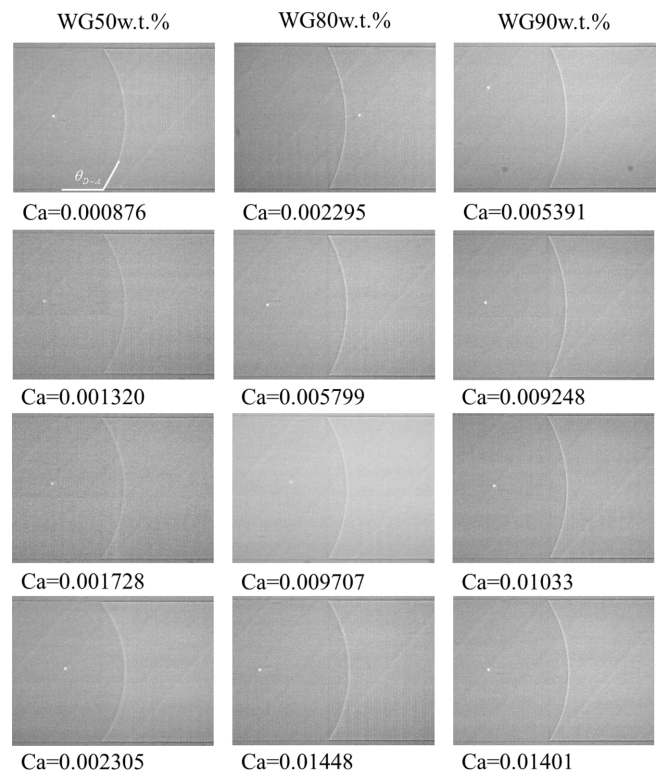


Fig. 4. Visualization of dynamic advancing contact angle via synchrotron X-ray imaging.

다. 또한, 방사광 X-선 영상법으로 획득한 가시화 이미지를 기반으로 후처리(post processing)를 통해 기하학적으로 정적 전진 접촉각 및 정상상태 유동조건에서의 동적 전진 접촉각을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 글리세롤 중량비에 따른 정적/동적 전진 접촉각

소수성 마이크로 관 내 물-글리세롤 혼합물 슬러그 정적 전진 접촉각은 Fig. 6과 같다. 그림에서와 같이 글리세롤 중량비가 증가함

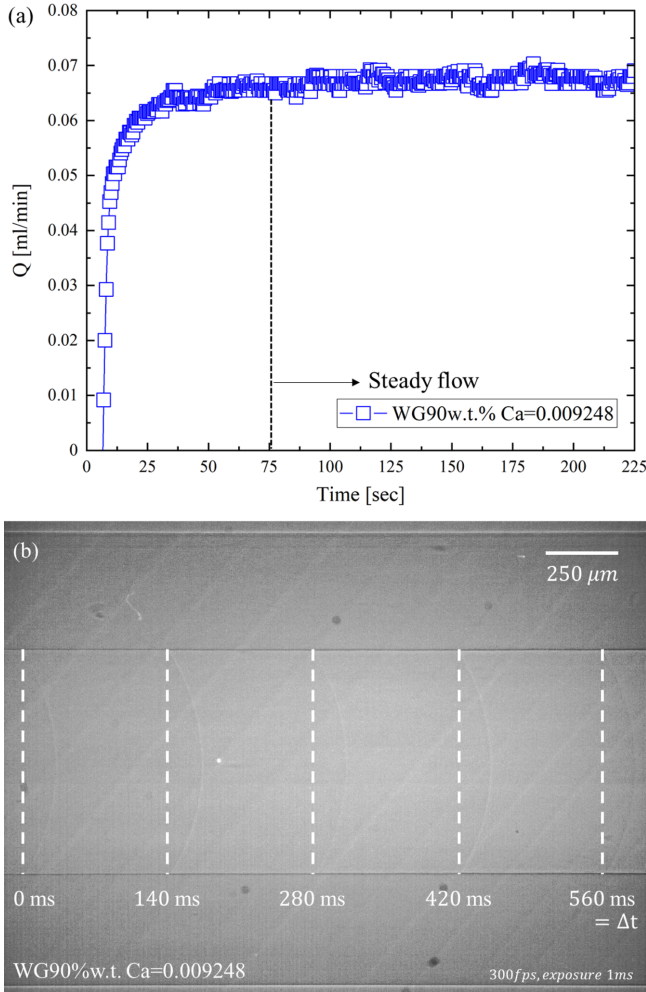


Fig. 5. Steady flow condition (a) flowmeter data (b) X-ray image data.

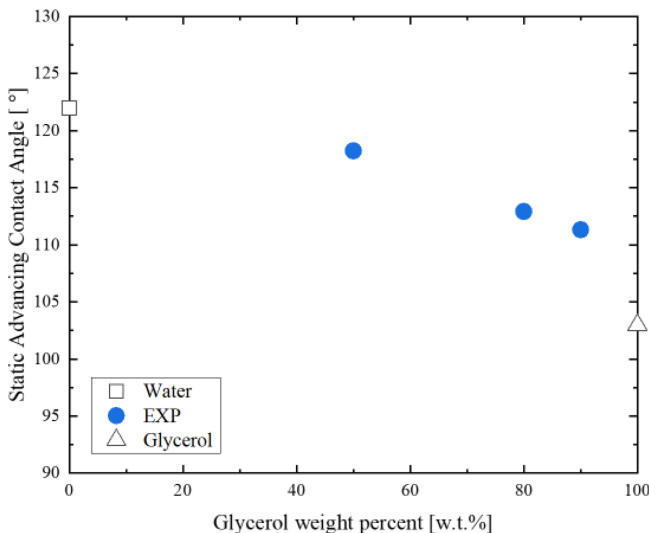


Fig. 6. Static advancing contact angles according to glycerol weight ratios. *Static advancing contact angles of distilled water and glycerol in the figure were referred in previous research [17,18].

에 따라 정적 전진 접촉각이 단조 감소하는 것을 확인할 수 있다. PFA 미세관($D=1.018$ mm)에서 순수 물 슬러그의 정적 전진 접촉각

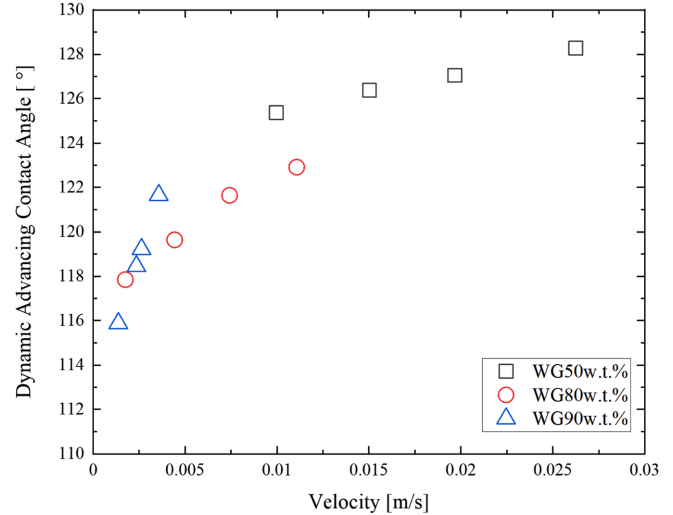


Fig. 7. Dynamic advancing contact angles according to velocities.

이 $\theta_{S-A}=122^\circ$ [17], PFA 평판에서 글리세롤 액적 정적 전진 접촉각이 $\theta_{S-A}=103^\circ$ [18] 임을 고려했을 때, 위와 같은 실험 결과는 타당한 것으로 판단된다. 소수성 마이크로 관 내 물-글리세롤 혼합물 슬러그 동적 전진 접촉각은 Fig. 7와 같다. 그림에서와 같이 속도가 증가할수록 모든 중량비에서 동적 전진 접촉각이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 동적 접촉각에 대한 선행연구 중 식 (1)와 같은 유체역학 모델(Hydrodynamic model)을 고려했을 때, 속도의 증가는 접촉선 주변 벽면 근처에서의 마찰 소산(viscous dissipation) 증가를 야기하며, 이는 동적접촉각의 증가로 이어진다[19].

$$\theta_{D-A}^3 - \theta_{S-A}^3 = 9 \frac{\mu u}{\sigma} \ln \left(\frac{L}{L_m} \right) \quad (1)$$

여기서, μ , σ , u , L , L_m 은 각각 점성계수, 표면장력, 속도, 거시적(macroscopic) 특성길이, 미시적(microscopic) 특성 길이를 의미한다.

특히, 본 연구에서는 글리세롤 중량비가 증가함에 따라 속도 증가에 따른 동적 전진 접촉각 증가량, 즉 Fig. 7에서의 기울기가 증가하는 것으로 나타났다. Table 1에서와 같이 물-글리세롤 혼합물의 경우 글리세롤 중량비가 증가함에 따라 밀도, 표면장력의 변화는 미비하나 점성계수는 크게 변화한다. 이러한 특성으로 인해 속도의 증가에 따른 접촉선 근처 마찰 소산 증가는 글리세롤 중량비에 따른 점성계수 변화에 영향을 받으며 이로 인해 동적 접촉각 기울기 변화로 나타난 것으로 판단된다.

3-2. 동적 전진 접촉각 실험 상관식 검증

수십년간 동적접촉각에 대한 실험적 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었으며, 최근 식 (1)과 같은 동적접촉각에 대한 이론식을 개발하기 위한 연구가 활발히 수행되었다[19]. 하지만 여전히 동적 접촉각 이론식에서 많은 부분 실험계수를 필요로 하는 한계를 가지고 있으며, 이로 인해 이론적으로 우수함에도 불구하고 제한적으로 활용되는 한계를 가지고 있다. 이와 함께 선행 연구자들에 의해 동적 전진 접촉각을 예측하기 위한 실험 상관식이 지속적으로 개발되었다. Hoffman은 유리 모세관($D=1.955$ mm)에서 다양한 점성 유체를 이용하여 $0 \sim 180^\circ$ 까지 넓은 영역의 동적 전진 접촉각을 측정하였으며 이를 바탕으로 모세관 수(Capillary number, $Ca=\mu u/\sigma$)와 정적

전진 접촉각으로 결정되는 변환인자(shift factor)로 동적 전진 접촉각을 예측할 수 있는 곡선(Hoffman's curve)를 제안하였다[3]. 이후 Jiang et al.은 Hoffman과 Rose and Heins의 실험데이터[1]를 바탕으로 Hoffman 곡선보다 추론적인 변환인자 없이 모세관 수와 정적 전진 접촉각만으로 동적 전진 접촉각을 예측할 수 있는 식 (2)와 같은 상관식을 개발하였다[8]. 이후에도 Bracke et al. Seebergh et al. 등이 가시광선 기반의 가시화 기법을 이용한 동적 실험 데이터를 바탕으로 Jiang et al. 상관식의 실험 계수를 일부 수정하기도 하였다[9,10].

$$H = \frac{\cos \theta_{S-A} - \cos \theta_{D-A}}{\cos \theta_{S-A} + 1} = \tanh(4.96Ca^{0.702}) \quad (2)$$

본 연구에서는 많은 연구자들에 의해 참조되고 있는 동적 전진 접촉각 실험 상관식인 Jiang et al. 상관식을 Fig. 8와 같이 높은 시간(~1,000 fps) 및 공간 분해능(~1.1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)을 갖는 방사광 X-선 영상법 기반으로 소수성 마이크로 관 내에서 측정된 동적 전진 접촉각 실험 결과를 바탕으로 검증하였다. 그림에서와 같이 글리세롤 중량비가 증가함에 따라 선행 연구자가 개발한 실험 상관식이 본 연구의 실험 데이터를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다. 선행 연구 결과에 따르면 글리세롤의 경우 유리와 같은 친수성 표면과 왁스가 도포된 소수성 표면에서 유사한 동적접촉각을 나타내는 것으로 보고되고 있다[16]. 비록 본 연구에서는 소수성 특성을 갖는 PFA 모세관에서 동적접촉각을 측정하였지만 글리세롤 함량이 많은 80, 90% 중량비의 물-글리세롤 혼합물의 경우 친수성 표면과 동일 동적접촉각 특성이 나타나 기존의 실험 상관식이 본 연구의 실험데이터를 잘 예측한 것으로 판단된다. 하지만 상대적으로 물 함량이 많은 50% 중량비의 물-글리세롤 혼합물의 경우 친수성 표면과는 상이한 동적접촉각 특성이 나타나 Fig. 8와 같이 기존의 실험 상관식이 본 연구의 실험데이터를 잘 예측하지 못한 것으로 판단된다. 위와 같은 결과를 바탕으로 선행 연구자가 개발한 동적 전진 접촉각 실험 상관식은 친수성 표면에 제한적으로 사용가능한 것으로 판단되며 소수성 표면에서의 동적 전진 접촉각 실험 상관식 개발을 위해 지속적인 가시화 실험 연구가 필요할 것으로 판단된다.

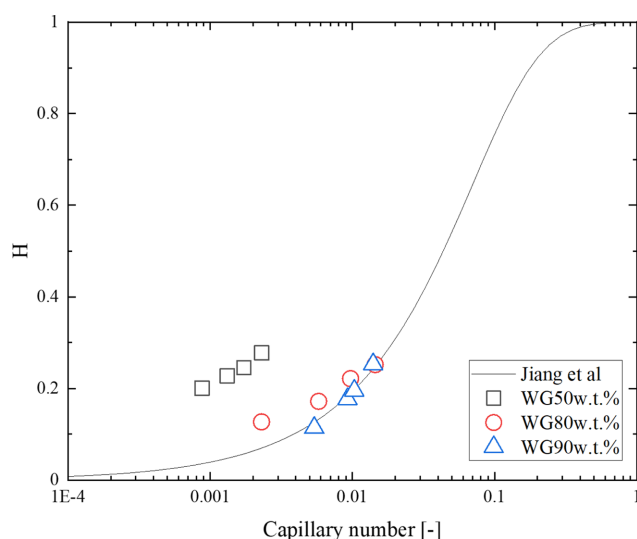


Fig. 8. Verification of the experimental correlation (Jiang et al. [8]) for dynamic contact angles.

4. 결 론

본 연구에서는 높은 시간(~1,000 fps) 및 공간 분해능(~1.1 $\mu\text{m}/\text{pixel}$)을 갖는 방사광 X-선 영상법을 이용하여 소수성 마이크로 관 ($D=796 \mu\text{m}$) 내 물-글리세롤 혼합물 액체 슬러그의 정적/동적 전진 접촉각을 측정하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

물-글리세롤 혼합물의 글리세롤 중량비가 증가함에 따라 정적 전진 접촉각은 단조 감소한다. 물-글리세롤 혼합물 슬러그의 동적 전진 접촉각은 속도가 증가함에 따라 증가하며, 글리세롤 중량비가 증가함에 따라 동적 접촉각 변화가 커진다. 이는 속도 증가에 따른 접촉선 근처 마찰 소산 증가에 기인된 것으로 판단된다.

기존의 동적 전진 접촉각 실험 상관식은 상대적으로 글리세롤 함량이 많은 80, 90% 중량비의 물-글리세롤 혼합물의 경우 실험값을 잘 예측하지만, 물 함량이 많은 50% 중량비의 물-글리세롤 혼합물의 경우 실험값을 잘 예측하지 못한다. 이는 글리세롤의 동적 접촉각이 표면 젖음성에 영향을 거의 받지 않기 때문인 것으로 판단된다.

기존의 동적 전진 접촉각 실험 상관식은 주로 친수성 표면에서의 실험 결과를 바탕으로 개발되었으며 이로 인해 소수성 표면에서의 동적 전진 접촉각 예측에는 제한적인 것으로 판단된다. 이후 연구에서는 소수성 표면에서의 동적 접촉각 실험 상관식 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 2021학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었습니다. 이 논문은 2021년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2019R1F1A1062140). 포항방사광가속기(PLS-II 9D beamline)에서의 실험은 과학기술정보통신부와 포항공과대학교의 지원을 받았습니다.

References

- Rose, W. and Heins, R. W., "Moving Interfaces and Contact Angle Rate-dependency," *J. Colloid Sci.*, **17**(1), 39-48(1962).
- Hansen, R. J. and Toong, T. Y., "Dynamic Contact Angle and Its Relationship to Forces of Hydrodynamic Origin," *J. Colloid Interface Sci.*, **37**(1), 196-207(1971).
- Hoffman, R. L., "A Study of the Advancing Interface. I. Interface Shape in Liquid-gas Systems," *J. Colloid Interface Sci.*, **50**(2), 228-241(1975).
- Hoffman, R. L., "A Study of the Advancing Interface: II. Theoretical Prediction of the Dynamic Contact Angle in Liquid-gas Systems," *J. Colloid Interface Sci.*, **94**(2), 470-486(1983).
- Kenji, K., Wakimoto, T., Yamamoto, Y. and Ito, T., "Dynamic Wetting Behavior of a Triple-phase Contact Line in Several Experimental Systems," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **60**, 354-360(2015).
- Kim, S. H., Wang, T., Zhang, L. and Jiang, Y., "Hydrodynamic Analysis of the Advancing Dynamic Contact Angle in Microtube," *J. Mech. Sci. Technol.*, **32**(11), 5305-5314(2018).
- Heshmati, M. and Piri, M., "Experimental Investigation of Dynamic Contact Angle and Capillary Rise in Tubes with Circular and Noncircular Cross Sections," *Langmuir*, **30**(47), 14151-14162(2014).
- Jiang, T. S., Soo-Gun, O. H. and Slattery, J. C., "Correlation for

- Dynamic Contact Angle," *J. Colloid Interface Sci.*, **69**(1), 74-77 (1979).
9. Bracke, M., De Voeght, F. and Joos, P., "The Kinetics of Wetting: the Dynamic Contact Angle," *Trends in Colloid Interface Sci.* III, **79**, 142-149(1989).
 10. Seebergh, J. E. and Berg, J. C., "Dynamic Wetting in the Low Capillary Number Regime," *Chem. Eng. Sci.*, **47**(17-18), 4455-4464(1992).
 11. Meuler, A. J. McKinley, G. H. and Cohen, R. E., "Exploiting Topographical Texture to Impart Icephobicity," *ACS nano*, **4**(12), 7048-7052(2010).
 12. Sarti, G. C., Gostoli, C. and Matulli, S., "Low Energy Cost Desalination Processes Using Hydrophobic Membranes," *Desalination*, **56**, 277-286(1985).
 13. Figeys, D. and Pinto, D., "Lab-on-a-chip: a Revolution in Biological and Medical Sciences," *Anal. Chem.*, **72**(9), 330A-335A(2000).
 14. Kuiper, S. and Hendriks, B. H. W., "Variable-focus Liquid Lens for Miniature Cameras," *Appl. Phys. Lett.*, **85**(7), 1128-1130(2004).
 15. Lim, C. and Wang, C. Y., "Effects of Hydrophobic Polymer Content in GDL on Power Performance of a PEM Fuel Cell," *Electrochim. Acta*, **49**(24), 4149-4156(2004).
 16. Šikalo, Š., Tropea, C. and Ganić, E. N., "Dynamic Wetting Angle of a Spreading Droplet," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **29**(7), 795-802(2005).
 17. Park, S. C., Kwak, H. J., Kim, M. H., Fezzaa, K., Lee, Y. W. and Yu, D. I., "Pressure Drop with Moving Contact Lines and Dynamic Contact Angles in a Hydrophobic Round Minichannel: Visualization via Synchrotron X-ray Imaging and Verification of Experimental Correlations," *Langmuir*, **36**(38), 11207-11214(2020).
 18. Lee, S., Park, J.-S. and Lee, T. R., "The Wettability of Fluoropolymer Surfaces: Influence of Surface Dipoles," *Langmuir*, **24**(9), 4817-4826(2008).
 19. Blake, T. D. and Shikhmurzaev, Y. D., "Dynamic Wetting by Liquids of Different Viscosity," *J. Colloid Interface Sci.*, **253**(1), 196-202(2002).

Authors

Jin Gyu Jang: M. S. Candidate, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea; dhkdndb123@pukyong.ac.kr

Young Hyun Kim: M. S. Candidate, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea; yh_kim@pukyong.ac.kr

Kyoung Joon Kim: Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea; kjkim@pknu.ac.kr

Junghoon Lee: Associate Professor, Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea; jlee1@pknu.ac.kr

Yeon Won Lee: Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea; ywlee@pknu.ac.kr

Dong In Yu: Associate Professor, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, 48517, Korea; diyu@pknu.ac.kr