

미세유체연구실 Microfluids Laboratory

김정현[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

1. 서론

서울과학기술대학교 미세유체연구실은 2020년에 개설되어 2023년 현재 학석사연계과정 5명, 학부연구생 2명으로 구성되어 있다. 본 연구실에서는 유체와 고체 표면 간의 상호작용을 실험적 기법을 통해 관측하고 물리적 현상을 분석하고 있으며, 유체 물성을 측정할 수 있는 장비를 경제적으로 제작하여 활용할 수 있는 방안에 대해 연구하고 있다. 본 연구실 소개글을 통해 최근 3년간의 연구 중 대표적인 결과를 공유하고자 한다.

2. 연구 내용 소개

2.1 유체 방울 및 (초)발수 표면 상호작용

발수 표면은 물과 친화력이 떨어지는 화학적 조성을 가진 표면으로 정적 접촉각이 90도 이상일 때 발수성을 보인다고 정의한다. 이러한 발수 표면에 마이크론 혹은 나노미터 크기의 미세 구조를 형성할 경우 표면의 발수성은 더욱 증가하며, 정적 전진 접촉각이 150도 이상이며, 접촉각 이력 (정적 전진 및 후진 접촉각의 차이)가 10도 이하에 도달할 경우 초발수 성질을 보인다고 평가한다.⁽¹⁾ 초발수 표면은 유체 마찰 저항 저감, 자가세정, 방오성능 등의 공학적 효용성을 나타

낸다고 알려져 있으며, 이러한 현상은 유체와 고체 표면 간의 상호작용이 줄어든 것에 기인한다. 특히, 홈(groove or ridge) 구조가 형성된 발수 표면에서는 구조의 이방성 성질로 인해 유체 방울의 운동 방향을 제어할 수 있으며,⁽²⁾ 유체가 충돌할 경우 후퇴 과정을 경험하지 않고 꽃잎 모양으로 되튀게 할 수 있는 것으로 분석되었다.⁽³⁾ 하지만, 이러한 홈 구조와 유체 방울의 상호작용은 매우 작은 스케일에서 면밀히 분석되지 않았으며, 추가적인 공학적 효용성에 대한 탐구가 필요하다. 본 연구실에서는 유체 방울과 발수 표면 간의 상호작용을 높은 공간 분해능(2-4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) 조건에서 촬영된 초고속 영상을 통해 분석하였다.

2.1.1 홈 구조를 가진 발수 표면에서의 미세 방울 형성: 연신레오미터로의 활용

홈 구조가 형성된 Polydimethylsiloxane (PDMS) 표면에 뉴턴 및 비뉴턴 유체 방울을 충돌시켜 방울의 퍼짐과 수축 역학을 관측하였다. Fig. 1에 보이는 것과 같이 유체 방울이 수축되는 과정에서 유체 방울 후미와 표면 구조 간에 마이크론 크기의 캐필러리 브리지가 형성되는 것을 확인할 수 있었다.⁽⁴⁾ 캐필러리 브리지는 유체 방울의 관성과 유체와 표면 사이의 부착력의 대결구도로 인해 시간이 경과함에 따라 그 직경이 점진적으로 줄어들면서 파단되었다. 파단 이후, 표면 구조 상단에 수십 마이크론 크기의 유체 방울이 적층되었는데, 이러한 미세 유체 방울의 크기는 유체의 점도 증가와 함께 증가하였다. 본 연구 결과

[†] Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail: kimjh@seoultech.ac.kr

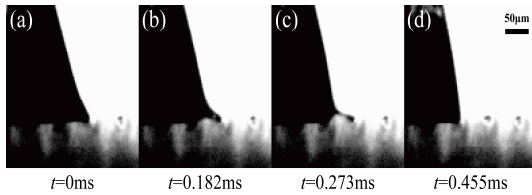


Fig. 1. Formation of micro-capillary bridge between a retracting liquid droplet and a grooved surface. Minute liquid droplets were deposited on top of the grooved structure after the capillary bridges were broken.⁽⁴⁾

를 통해 표면과 접촉하는 복잡유체방울에 담긴 입자(particle)을 크기별로 분류하거나 유체 방울 후미에 형성된 유체 끈의 파단 현상을 시간대별로 관측하여 비뉴턴 유체의 인장 물성을 측정할 수 있을 것이라 예상할 수 있었고 후속 연구를 진행하게 되었다.

기존 유체 방울 충돌 실험에서는 충돌 에너지가 증가할수록 유체가 구조 사이로 침투하고 구조 바닥면을 따라 추가로 팽창, 수축을 하여 방울의 완벽한 되튐 현상(complete rebound)이 관측되지 않았다. 또한, 유체 방울 후미와 구조 사이에 형성된 유체 끈의 직경이 매우 작아 초고속 이미징을 통해 끈의 직경 변화를 실험적으로 관측하는 것이 쉽지 않았다. 유체 방울의 후퇴 역학과 미세 방울 형성을 보다 큰 스케일에서 명확하게 관측하기 위하여 CO₂ 레이저 가공기를 사용하여 PDMS 표면에 구조 상단의 너비가 50 - 150 µm 정도인 홈 구조를 형성하였다. 또한, 유체 방울을 표면에 충돌시키는 대신 굴러서 표면 바닥 및 측면에서 후퇴 접촉선 역학을 관측하고 (Fig. 2(a),(b)) 홈 구조에 적층되는 미세 방울 크기의 변화에 주목하였다.

후퇴접촉선 역학은 표면 상단에서 고체 면적이 차지하는 비중인 solid fraction (φ_s)에 따라 달라졌다. φ_s 이 0.5이상인 경우 후퇴접촉선은 표면 구조를 따라 미끄러져 파단되어 φ_s 가 0.5이하인 경우보다 더 작은 크기의 미세 유체 방울을 적층할 수 있음을 실험적으로 규명하였다.⁽⁵⁾ 홈 구조에 적층되는 미세 유체 방울의 크기는 φ_s 뿐 아니라 표면의 경사각 α , 유체 방울의 부피 V 와 점도 μ 에 매우 민감하게 변화하는 것으로 관측되었다. 이처럼

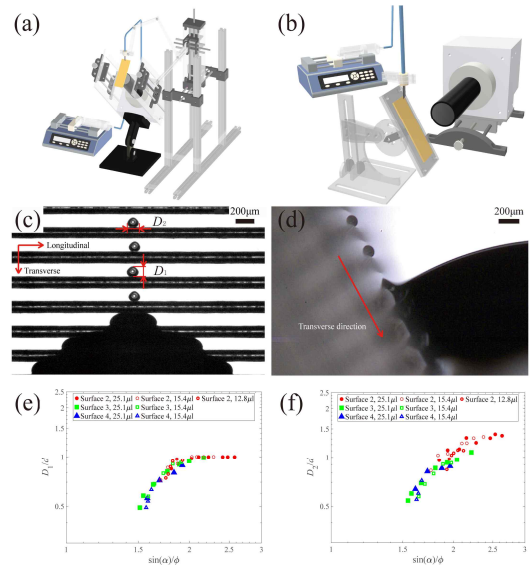


Fig. 2. Schematics of the experimental setup for visualizing the droplet dynamics from (a) the bottom and (b) the side. (c) and (d) Representative images of the droplet dynamics for the bottom and the side setups. (e) and (f) Nondimensional transverse and longitudinal sizes of the residual droplets deposited on the grooved hydrophobic surfaces.⁽⁵⁾

다양한 변수에 따라 변화하는 미세 방울의 크기 D 는 Fig. 2(e), (f)에 제시된 것과 같이 실험에 사용된 변수들의 무차원화를 통해 하나의 곡선을 따라 겹쳐졌다:

$$D/d = f\left(\frac{\sin(\alpha)}{\varphi_s}, \frac{D_0}{d}, \frac{\mu}{\sqrt{\rho\gamma D_0}}\right)$$

이러한 결과는 실험 변수에 따른 미세방울 크기 변화가 예측 가능함을 암시한다. 여기서 d 는 홈 구조 상단의 너비, D_0 는 유체 방울의 초기 직경, ρ , γ 는 유체 방울의 밀도와 표면장력을 의미한다.

표면을 따라 굴러가는 물방울의 후미에는 Fig. 2(d)에 보이는 것과 같이 유체 끈이 형성된다. 이러한 유체 끈이 지속되는 시간은 유체에 탄성이 부가될 경우 급격하게 증가하여 유체의 인장 물성을 측정할 수 있는 기회를 제공한다. 본 연구실에서는 분자량이 1.0×10^6 g/mol인 polyethylene oxide를 초순수물과 다양한 질량비로 섞어 모델 비뉴턴 유체를 제작하고 홈 구조를 가진 발수 표면에 굴러 비뉴턴 유체와 홈 구조 사이에 형성되는 유체 끈의 시간에 따른 직경 변화를 관측하였다.

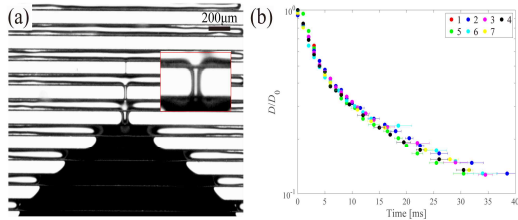


Fig. 3. (a) Liquid ligaments trapped between the grooved structures. 1.0 wt % Polyethylene oxide ($M_w = 1 \times 10^6$ g/mol) in water solution was used. (b) Non-dimensional diameter of the ligaments as a function of time.

Fig. 3에 제시된 무차원된 유체 끈의 직경과 시간 사이의 선형 기울기를 구하고 문헌에서 제시한 모델식⁽⁶⁾을 이용하여 인장완화시간을 실험적으로 측정하는데 성공하였다. 본 실험에서 측정된 고분자PEO 수용액의 인장완화시간은 최근에 소개된 Dripping-onto-Substrate (DoS) 기법으로 측정된 값⁽⁷⁾과 큰 차이를 보이지 않았다. 미세 구조를 가진 발수 표면에 유체 방울을 골리는 Drop sliding 기법은 저점도 유체의 관성 효과로 인장물성 측정이 어려웠던 Capillary Breakup Extensional Rheometer (CaBER) 기법의 단점을 극복할 수 있으며, 1회 실험에 많은 양의 인장 물성 데이터를 확보할 수 있는 장점이 있다.

2.1.2 홈 구조를 가진 초발수 표면에 충돌하는 점성 유체 방울: Petal bouncing 현상

초발수 표면에 충돌한 유체 방울은 표면과 접촉하고 있는 시간 동안 질량, 운동량, 에너지를 표면에 전달한다. 초발수 표면이 가진 공학적 효율성을 극대화하기 위해서는 이러한 접촉 시간 (contact time)을 감소 시키는 일이 중요하다. Richard et al.은 초발수 표면에 충돌하는 유체 방울의 접촉 시간이 방울의 충돌 속도와는 무관하고 관성-모세관 시간 $\tau = \sqrt{\rho D_0^3 / 8\gamma}$ 에 비례하는 것으로 보고하였다.⁽⁸⁾ 이 연구 이후 초발수 표면의 형상을 바꾸거나,⁽⁹⁾ 탄성을 부여하거나,⁽¹⁰⁾ macroscale의 구조를 추가하여⁽¹¹⁾ 이론적인 접촉 시간보다 더 줄이려는 노력들이 이어져왔다. Guo et al.⁽¹²⁾은 초발수 표면에 macroscale의 홈 구조를

형성하여 충돌하는 물방울이 후퇴 과정 없이 꽃잎 모양으로 되튀어오르게하였으며, 접촉 시간이 약 70 % 정도 감소하였다고 보고하였다. 이러한 급격한 접촉 시간 감소를 위해서는 충돌하는 물방울의 충돌에너지가 충분히 커야 하며, 또한 구조 내부로 침투한 물이 구조 밖으로 빠져나오는 시기와 구조 상단에서 거동하는 유체의 수축 시기가 유사해야 한다.⁽¹²⁾ 본 연구실에는 이러한 꽃잎 모양의 되튐 (petal bouncing) 현상이 물보다 점도가 높은 점성 유체 방울에서도 가능한지 여부를 확인하고 regime map을 완성하고자 하였다.

스테레오리소그래피 기반 3D 프린터를 사용하여 구조 상단의 너비가 400 μm 이며 구조 간의 간격이 750 μm , 구조의 높이가 1000 μm 인 macroscale의 홈 구조가 형성된 표면을 제작하고, hydrophobic fumed nanosilica particle을 표면에 적층하여 최종적으로 초발수 표면을 완성하였다. 완성된 표면에 글리세린의 농도가 0 – 80 wt%의 비율로 변화된 글리세린 수용액 액체 방울을 다양한 낙하 높이에서 표면에 충돌시켜 되튐 역학을 분석하였다. Fig. 4에 보이는 것처럼 petal bouncing이 관측되는 영역은 물방울의 낙하 속도 (혹은 웨버수, We)와 유체 방울의 점도 (혹은 오네

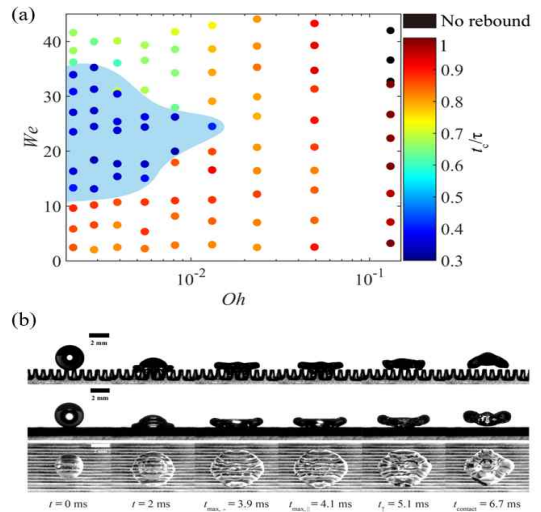


Fig. 4. (a) Scatter plot for the impact outcome of the droplet as a function of Weber and Ohnesorge numbers. (b) Sequential images of water droplet impacting the grooved superhydrophobic surfaces at $We \sim 23$.

소지수, Oh)에 따라 민감하게 변화하는 것으로 관측되었다. 웨버수가 10이하인 경우 실험한 모든 용액에서 conventional rebound 현상 (피침과 수축과정을 모두 동반한 거동)이 관측되었는데, 이는 유체 방울의 충돌에너지가 충분치 않아 구조 내부로 침투하는 유체에 충분한 양의 모세관 힘이 저장되지 않은 것에 기인한다. 웨버수가 10보다 크고 35보다 작은 영역에서 petal bouncing 현상이 관측되었으며, 접촉 시간이 매끈한 초발수 표면 대비 60 - 70% 가량 감소하였다. 웨버수가 25인 경우일 때 50 wt% 글리세린 수용액 방울까지($Oh = 0.014$, 물의 점도에 약 6배) petal bouncing 현상이 관측되었다. 웨버수가 25를 넘어서면서 점성 유체 방울의 충돌에너지가 과도하게 커져 구조 내부로 침투한 유체가 바닥면을 따라 추가로 팽창 및 수축하는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 구조 내부로 침투한 유체가 구조 밖으로 빠져 나가는 시간을 지연시켜 구조 상단에서 거동하는 유체의 수축 시기와 차이를 발생시켰다. 결과적으로 petal bouncing 현상은 사라지고 유체 방울은 conventional rebound 현상을 재차 나타내게 되었다. 위의 연구 결과들은 섭씨 0도 근방의 점도가 증가된 빗방울 (freezing rain)이나 산업 현장에서 사용되는 물보다 점도가 미약하게 큰 점성 방울의 접촉 시간을 단축시키기 위한 표면 디자인에 기초정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 저비용 유체 물성 측정 장비 제작

계면 유동 (Interfacial flow) 연구를 실험적으로 수행하는 연구실에서는 점성, 표면장력 등과 같은 유체의 상태량이나 표면의 발수성 여부를 정량적으로 평가할 수 있는 접촉각 측정이 필수적으로 요구된다. 본 연구실에서는 유체 및 고체 표면의 상태량을 정량적으로 측정할 수 있는 장비를 적은 비용으로 개발하고, 교육 및 연구에 활용하는 방안에 관심을 가져왔다. 특히, 수백에서 수천만원대로 가격이 형성된 접촉각 측정기 (contact angle goniometer)에 의존해 평가되어 온 정적 접촉각을 연구실 내에서 자체 제작한 장비

로 정밀하게 측정할 수 있는 방안에 대해 연구하였다.

접촉각은 물방울이 고체 표면에 접촉하였을 때 고체-액체-기체 3상이 만나는 지점을 중심으로 액체 내부에서 측정된 각으로 정의할 수 있다. 이 지점에서 액체와 기체 상이 만나는 계면에 평행한 선을 접촉선(contact line)으로 정의하며, 접촉선이 전진하기 시작할 때 측정된 각도를 정적 전진접촉각 (Static advancing contact angle), 후퇴하기 시작할 때 측정된 각도를 정적 후진접촉각 (Static receding contact angle)으로 정의한다. 정확한 접촉각 측정을 위해서는 영상의 공간분해능을 향상시켜 고체-액체-기체가 만나는 지점을 정확히 찾아내는 것이 필요하다. Fig. 5에 제시된 것과 같이 본 연구실에서는 3D 프린터와 CO₂ 레이저 가공기를 활용하여 스마트폰 기반 수제 접촉각 측정기를 제작하였다. 접촉각을 정밀하게 측정하기 위하여 스마트폰용 접사렌즈를 부착하여 공간분해능 4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 을 구현하였다. 영상의 심도가 깊어짐에 따라 영상의 초점을 맞추는 것이 매우 까다로워져서 3축으로 이송이 가능한 직렬 이송 장치를 제작하여 접촉각 측정기에 도입하였다. 또한, 접촉각에 영향을 주는 유체 유량을 정밀하게 조정하기 위하여 수제 시린지 펌프를 제작하여 접촉각 측정기에 도입하였다. 제작된 장비를 사용하여 PMMA, PDMS, 초발수 표면 등 다양한 표면에서 정적 접촉각을 측정하였고 문헌에 보고된 접촉각과 일치하는 결과를 얻었다.⁽¹³⁾ 또한, PDMS 표면에서 측정된 후진접촉각이 설정한 유량에 상당히 민감하게 변화하는 것을 관측하였다. Fig. 5(d)에 보이는 것과 같이 유량이 30 $\mu\text{l}/\text{min}$ 을 초과할 경우 후진접촉각이 점진적으로 감소함을 확인하였다. 이러한 결과는 작업자가 손으로 직접 유량을 제어하여 원치 않는 높은 유량을 부여할 경우 정적 접촉각이 아닌 동접촉각을 측정하게 됨을 의미한다. 따라서, 정적 접촉각 측정을 위해서 시린지 펌프를 통한 매우 낮은 유량 공급이 요구된다.

제작된 수제 접촉각 측정기는 시린지 펌프가 작동되는 동안 접촉선 속도의 점진적인 상승과 감소를 유발하였다. 우리는 이러한 접촉선의 속도

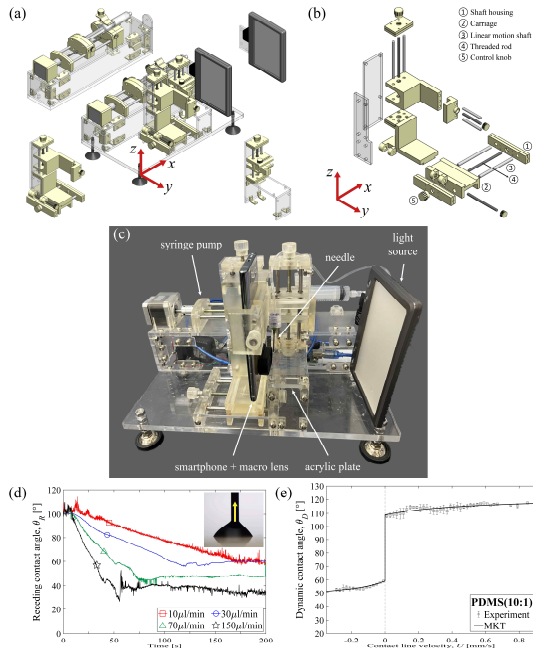


Fig. 5. 3D Model of (a) a custom-made contact angle goniometer using a smartphone. (b) Disassembled parts of a smartphone holder. (c) Photograph of a custom-made contact angle goniometer. (d) Variation of static receding contact angles of water droplets at different flow rates of 10, 30, 70, 150 $\mu\text{l}/\text{min}$. (e) Variation of instantaneous dynamic contact angles on PDMS surface with respect to contact line velocity.^{(13),(14)}

변화에 따른 접촉각 변화 양상에 주목하였고, 순간 접촉선 속도에 따른 접촉각 정보를 활용하여 표면의 동적 젖음 (dynamic wetting) 분석도 가능할 것이라 예상하였다. 촬영한 접촉각 영상을 분석한 결과, Fig. 5(e)에 보이는 것과 같이 매우 느린 접촉선 속도 영역에서 ($U < 1.2\text{mm}/\text{s}$, $Ca = (\mu U/\gamma) \leq 1.6 \times 10^{-5}$) 동 전진 및 후진 접촉각의 변화를 관측할 수 있었다. 또한, 베이스와 경화제의 비율에 따라 PDMS 표면의 정적 및 동적 접촉각의 변화 양상이 매우 달라질 수 있음을 관측하였다. 측정된 동적접촉각 변화는 Hydrodynamic 이론보다 Molecular-Kinetic 이론에 부합하여 변화함을 파악할 수 있었다.⁽¹³⁾

본 연구실에서 개발된 접촉각 측정기는 유체 유량을 정밀하게 조절하는 수제 시린지 펌프와 유체를 공급하는 시린지 니들을 수평, 수직으로

정밀하게 이송할 수 있는 직렬 이송 시스템이 반영되어 있었다. 따라서, 정적 및 동적 접촉각 측정뿐 아니라 DoS 기법⁽⁷⁾을 적용한 비뉴턴 유체 유변학 물성 측정도 가능하였다. 유변학 물성 측정 성능을 확인하고자 다양한 질량비의 PEO 수용액을 모델 비뉴턴 유체로 선정하고 제작하였다. Sharma 그룹이 제안한 DoS 기법에 따라 주사침과 표면 간에 일정한 간격을 설정한 뒤 (유체 끈 초기 직경의 3배), 20 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 매우 느린 유량으로 유체를 공급하여 주사침과 표면 사이 유체 끈의 형성을 유도하였다. 그런 다음, 시간에 따른 유체 끈의 직경 변화를 촬영하고 자체 개발한 MATLAB 코드로 그 크기를 측정하여 비뉴턴 유체의 인장 물성을 계산하였다. 그 결과, Fig. 6에 보이는 것과 같이 질량비가 2.0 wt% 이상인 고분자 PEO 수용액의 인장완화시간과 인장 점도 측정이 가능하였으며 문헌에 보고된 수치와 유사함을 확인할 수 있었다.⁽¹⁴⁾ 단, 2.0 wt% 미만의 질량비를 갖는 PEO 수용액의 경우 스마트폰으로 촬영한 영상의 낮은 시간분해능(16.7 ms)으로 유체 끈의 변화 과정을 면밀히 분석할 수 없었다. 하지만, 스마트폰에 내장된 슬로우 모션 기능을 활용할 경우 시간 분해능을 4.2 ms까지 향상시킬 수 있었으며, 실험에 사용된 가장 저점도 유체인 1.0 wt% PEO 수용액까지 (인장완화시간 $\lambda_E \sim 9\text{ms}$) 유변학 물성 측정이 가능하였다.

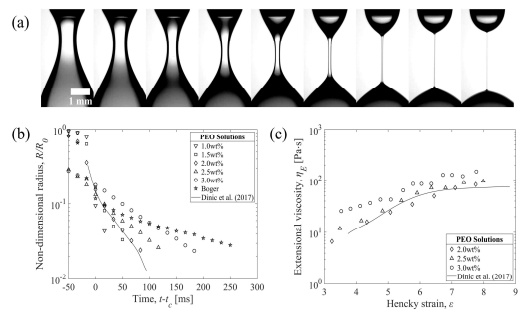


Fig. 6. (a) Sequence of images to show thinning dynamics of 3.0 wt% PEO in water solution. (b) Time evolution of non-dimensional radius of aqueous PEO solutions and a Boger fluid. (c) Extensional viscosity of 2.0 – 3.0 wt% PEO in water solutions as a function of Hencky strain.⁽¹⁴⁾

수제 접촉각 측정기는 정적 전진 및 후진 접촉각, 매우 낮은 접촉선 속도 영역에서의 동 전진 및 후진 접촉각, *Pendent drop* 기법을 활용한 유체의 표면 장력, 비뉴턴 유체의 인장완화시간 및 인장 점도를 측정할 수 있는 범용적인 장비이다. 장비를 제작하는데 있어 약 30만원 이하의 재료비가 소진되었으며, 3D 프린터 및 레이저 가공기 장비 사용이 허락하는 조건에서 본 장비를 유사하게 제작할 수 있을 것이라 판단된다. 본 장비는 계면 유동 기초 연구에 활용될 수 있을 뿐 아니라 대학 교육 현장에서 유체의 상태량과 접촉각 측정에 관한 실험 교구로도 활용될 수 있다. 향후 2.1.1에서 소개된 실험을 가능하게 하는 장비도 저비용으로 제작하고 그 성능을 분석할 예정이다.

3. 맺음말

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 미세유체연구실은 유체 방울과 발수 표면 간 상호작용과 관련된 다양한 물리 현상들을 초고속 이미징 기법에 기반하여 실험적으로 규명하고 있다. 또한, 유체 물성을 측정할 수 있는 경제적인 장비를 개발하여 교육 및 연구용으로 활용할 수 있는 방안을 강구하고 있다. 보다 상세한 연구 내용은 연구실 홈페이지를 통해 확인할 수 있다.
<https://davidjeonghyunkim.wixsite.com/fluids>.

후 기

실험 결과를 도출하는데 함께 노력한 학석사 연계과정 학생들 (김의진, 김형원, 박창훈, 박한별, 김시현)과 연구가 가능하도록 지원해준 한국연구재단 (No. 2020R1C1C1005588)에 감사드립니다.



Fig. 7. Laboratory group photo in Jeju, 2022

REFERENCES

- 1) Rothstein J.P., 2010, "Slip on superhydrophobic surfaces," *Annual Review of Fluid Mechancis*, Vol. 42, pp.89~109.
- 2) Yoshimitsu Z., Nakajima A., Watanabe T., Haashimoto K., 2002, "Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets," *Langmuir*, Vol. 18, pp.5818~5822.
- 3) Guo C., Zhao D., Sun Y., Wang M., Liu Y., 2018, "Droplet impact on anisotropic superhydrophobic surfaces," *Langmuir*, Vol. 34, pp.3533~3540.
- 4) 김의진, 김정현, 2021, "거친 발수 표면에 충돌하는 유체 방울의 팽창 및 수축 역학: 미세 유체 방울의 형성," *한국가시화정보학회지*, Vol. 19, pp.15~21.
- 5) Kim U., Kim H., Kim J.-H., 2022, "Deposition of micro/macroscale water droplets on grooved hydrophobic surfaces," *Physics of Fluids*, Vol. 34, pp.112106.
- 6) Anolds O., Buggisch H., Sachsenheimer D., Wilenbacher N., 2010, "Capillary breakup extensional rheometry (CaBER) on semi-dilute and concentrated polyethylenoxide (PEO) solutions," *Rheological Acta*, Vol. 49, pp.1207~1217.
- 7) Dinic J., Zhang Y., Jimenez L.N., Sharma V., 2015, "Extensional relaxation times of dilute, aqueous polymer solutions," *ACS Macro Letters*, Vol. 4, pp.804~808.

- 8) Richard D., Clanet C., Quere D., 2002, "Surface phenomena: Contact time of a bouncing drop," *Nature*, Vol. 417, pp.811.
- 9) Liu Y., Andrew M., Li J., Yeomans J.M., Wang Z., 2015, "Symmetry breaking in drop bouncing on curved surfaces," *Nature communications*, Vol. 6, pp.10034.
- 10) Kim J.-H., Rothstein J.P., Shang J., "Dynamics of a flexible superhydrophobic surface during a drop impact," *Physics of Fluids*, Vol. 30, pp.072102.
- 11) Bird J.C., Dhiman R., Kwon H.-M., Varanasi K.K., 2013, "Reducing the contact time of a bouncing drop," *Nature*, Vol. 503, pp.385.
- 12) Guo C., Zhao D., Sun Y., Wang M., Liu Y., 2018, "Droplet impact on anisotropic superhydrophobic surfaces," *Langmuir*, Vol. 34, pp.3533~3540.
- 13) Pak H., Kim J.-H., 2023, "Static and dynamic contact angle measurements using a custom-made contact angle goniometer," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 37.
- 14) 김시현, 박한별, 김정현, 2023, "저비용 수제 연신레오미터 개발 및 성능 평가," *한국가시화 정보학회지*, Vol. 21, pp.110~118.