

접착 유층과 계면활성제 액적의 충돌에 의한 에멀전 형성

이동훈* · 김도형* · 김일두[‡] · 이진기[†]

Generation of emulsions due to the impact of surfactant-laden droplet on a viscous oil layer on water

Donghoon Lee*, Dohyung Kim*, Ildoo Kim[‡], Jinkee Lee[†]

Abstract We present an experimental investigation on emulsions created during the impact process between a surfactant-laden droplet and an oil layer on water. By varying the surfactant concentration and the viscosity of oil layer, we created emulsions and visualized them using multi-dimensional high-speed imaging. Our analysis shows that the emulsions are more likely to be unstable and decay within a minute if the impacting droplet contains more surfactant. We also found that there are three mechanisms of generation of emulsions depending on the concentration of surfactant and the viscosity of oil layer; the jet pinch-off, cavity pinch-off, and tearing of oil layer. Jet and cavity pinch-off turned out to be dominant mechanisms for high oil viscosities, while tearing of oil layer is dominant for low oil viscosities. Our result is potentially useful in designing optimal dispersant properties for offshore oil contamination.

Key Words : Droplet impact (액적 충돌), Bilayer liquid (이층 액체), Emulsion (에멀전)

1. 서론

고체 혹은 단층 액체 표면에 액적이 충돌할 때 일어나는 현상에 대해 Worthington⁽¹⁻²⁾을 시작으로 다양한 연구가 이어졌다. Pasandideh-Fard et al.⁽³⁾은 실험 및 수치해석적 방법으로 스테인리스 표면에 물 액적이 충돌할 때의 동역학에

대한 표면장력과 접촉각의 영향을 분석하였고, Castillo-Orozco et al.⁽⁴⁾은 액적이 깊은 액체 pool에 충돌하면서 발생하는 Worthington jet과 이에 따른 secondary drop의 형성을 분석했다. 이외에도 대상 액체 pool의 깊이⁽⁵⁻⁶⁾, 액적의 지름과 대상 액체 pool 온도⁽⁷⁾, 액적 충돌 각도⁽⁸⁾ 및 액적의 점도⁽⁹⁾ 등 다양한 조건하에 연구가 이뤄졌다. 이러한 연구들은 분사 코팅, 분사 냉각, 살충제 분사 등 많은 분야에서 활용되고 있다.⁽¹⁰⁻¹⁴⁾

얇은 기름층이 물에 띄워져 있는 이층 액체 (bilayer liquid)에 대한 액적 충돌의 경우, 단층 액체에 비해 계면이 하나 더 존재하기 때문에 동역학이 단층 액체에 비해 더 복잡하여 분석이 난해하므로 상대적으로 적은 수의 연구만이 진

[†] School of Mechanical Engineering,
Sungkyunkwan University, Professor
E-mail: lee.jinkee@skku.edu

[‡] Department of Mechatronics, Konkuk University,
Assistant Professor
E-mail: ildoo.kim.phys@gmail.com

* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan
University, M.S./Ph.D. combined course

행되었다.⁽¹⁵⁻¹⁶⁾ 일반적으로 액체 표면에 액적이 충돌하면 충돌 지점에 크레이터가 생성되며, 이러한 크레이터의 성질은 수면 아래로 형성되는 cavity, 크레이터의 둘레를 따라 수면 위로 분출되는 crown, 그리고 충돌 지점에서 위로 솟구치는 Worthington jet으로 분석할 수 있다.⁽⁴⁾ 이러한 현상은 운동에너지가 위치에너지로 전환되면서 일어나는 일반적인 현상으로써, 충돌 대상이 단층이 아닌 이층 액체가 되어도 기본적인 현상론의 틀은 유지된다. 하지만 구체적인 작동 기작은 달라지며, 이층 액체에서 추가된 두 번째 계면을 고려하지 않고는 실험 결과를 온전히 설명할 수 없다. 추가 계면의 영향을 파악하기 위해 Murphy et al.⁽¹⁵⁾은 초순수 또는 바닷물로 이뤄진 액적을 혼화성이 없는 여러 종류의 기름에 넓은 범위의 속도로 충돌시켜 이에 따른 스플래시(splash) 거동의 변화와 에어로졸의 형성을 연구했다. 또한 Kim et al.⁽¹⁶⁾은 기름층의 두께 대비 cavity 깊이에 따른 유효 Weber 수를 제시하고, 핵사데케인 기름층에 핵사데케인 액적이 충돌할 때 발생하는 cavity의 깊이와 jet의 높이 각각의 scaling 식을 제시하였다.

액적이 이층 액체에 충돌할 경우 중요한 특징 중 하나는 에멀전(emulsion)의 생성이다. 액체끼리 충돌하는 과정에서 계면이 변하게 되며 이 사이로 다른 유체가 섞여 들어간다. 이와 관련하여 가장 흔히 볼 수 있는 현상은 물을 따를 때 거품이 생기는 현상으로, Pumphrey et al.⁽¹⁷⁾은 이를 모사하여 물 액적이 water pool에 충돌함에 따라 공기 방울이 생성되는 과정을 연구했다. 이층 액체에 대한 본격적인 연구는 Wang et al.⁽¹⁸⁾에 의해 수행되었으며, 그들은 물 액적이 물 위에 띄워진 혼화성이 없는 기름층에 충돌할 때 물/기름 혹은 물/기름/물 형태의 에멀전이 생성됨을 확인했다.

에멀전은 액적과 목표 액체층의 혼화성 유무에 관계없이 발생하며, 우리는 액적이 계면활성제 수용액일 때도 에멀전이 발생함을 실험적으로 관찰했다. 이 에멀전들은 일정 시간 이상 그 형태를 유지할 수 있는지에 따라 안정 또는 불안정 에멀전으로 구분된다. 불안정 에멀전의 경

우, 에멀전 내부에 계면활성제가 담겨 있다가 에멀전을 구성하고 있는 막이 얇아지고 최종적으로 터지면서 계면활성제 분자들이 확산되어 주위의 기름층을 밀어내는 현상이 관찰되기도 한다.⁽¹⁹⁾

에멀전의 생성 원인은 일반적으로 액적 충돌 후 생성된 cavity를 복원하기 위한 기름층의 후퇴, 그리고 cavity 하단부에서 발생하는 에멀전의 pinch-off, 그리고 jet pinch-off에 의한 에멀전 secondary drop 이 있다.⁽¹⁷⁻¹⁸⁾ 따라서 에멀전의 형성을 이해하기 위해서 이층 액체 충돌에 수반되는 현상을 면밀히 분석할 필요가 있다. 하지만 액적이 계면활성제 수용액일 경우에는 액적이 대상 액체층에 충돌함과 동시에 계면활성제 분자가 계면을 따라 확산된다. 이로 인해 표면 에너지가 감소하고 동적 표면장력(dynamic surface tension)이 발생하며 동역학 분석에 어려움을 더한다.⁽²⁰⁾ 따라서 에멀전의 형성 원리를 이해하려면 추가계면에 의한 계면장력과 계면활성제의 존재로 인한 동적 표면장력, 두가지 요인이 모두 고려되어야 한다. 이는 분석에 난해함을 더하며, 아직 계면활성제 액적의 이층 액체 충돌로 인한 에멀전의 형성에 대한 연구는 미진한 실정이다.

본 논문은 이층 액체에 대한 계면활성제 액적 충돌을 분석하여 에멀전 생성 원리를 이해하고자 한다. 이와 더불어 에멀전 생성에 대한 계면활성제 농도와 기름층의 점도의 영향을 파악하여, 안정 및 불안정한 에멀전이 형성되는 조건을 분석하고자 한다.

본 연구 결과는 해상 기름 유출 사고 시 가소제 분사 조건을 확립하여 효율적인 기름 분산을 이루는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.⁽²¹⁾

2 실험 장치 및 분석 방법

2.1 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 실험장치의 대략적인 구조는 Fig. 1에 도식되어 있다. 이 장치는 유체가 담겨있는 수조, 액적을 생성하기 위한 액적 생성

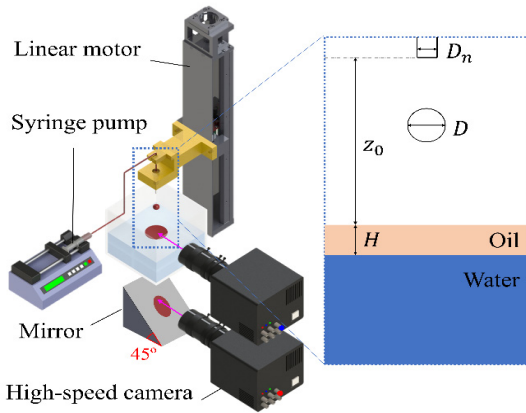


Fig. 1. Experimental setup and variables.

장치, 그리고 가시화를 위한 카메라 세팅으로 이루어져 있다.

수조는 아크릴(poly methyl meth-acrylate)로 제작하였으며, 내부 크기는 144 mm × 144 mm × 147 mm이다. 액적이 유체에 충돌할 때, 표적이 되는 유체에는 표면파(capillary wave)가 생성이 되는데, 본 실험에서 사용하는 아크릴 수조는 발생한 표면파를 충분히 무시할 수 있는 크기로 설계되었다.

실험을 위해서 수조에 초순수(deionized water)를 채우고 물과 섞이지 않는 기름층을 올렸다. 기름은 헥사데케인($C_{16}H_{34}$)과 세 가지 종류의 실리콘 오일을 사용하였다. 사용한 헥사데케인의 점도는 TA Instruments 사의 HR30 rotational rheometer로 측정되었으며, 점도는 4.5 cSt로 나타났다. 또한, 실리콘 오일의 점도는 5 cSt, 100 cSt, 1000 cSt이다. 마이크로파이펫을 이용하여 기름 일정량을 물 위에 도포하여 기름층을 생성하였고, 기름층의 두께는 도포되는 기름의 양으로부터 계산될 수 있다. 우리는 물 위에 떠 있는 기름층의 상단부가 수조의 최상단에 위치하도록 하였다. 이렇게 함으로서 충돌 이후에 일어나는 유체의 움직임을 수조 벽면의 가림 없이 최대한 선명하게 가시화하였다.

최대한 안정적이고 재현성 있는 실험 결과를 위해 수조에 담긴 물과 기름층은 매 회 새로 교체되었다. 표적 유체를 교환할 때마다 수조를 충분히 세척하여 표적 유체가 오염되지 않도록

하였다.

액적은 계면활성제를 다양한 농도로 포함하고 있다. 우리가 사용한 계면활성제는 라우릴 황산 나트륨(sodium dodecyl sulfate (SDS), $M_w = 288$, $CMC = 8.4$ mM)이며, 계면활성제가 포함된 유동을 연구하는 데 표준적인 물질로 알려져 있다. 우리는 질량 기준으로 0%, 0.5%, 1.0%, 5%의 용액을 사용하였고, 1% 용액은 대략 35.1 mM에 해당하며 CMC의 약 4.2배 정도이다. 모든 실험 조건들은 Table 1에 표기돼 있다.

액적을 생성하기 위해 얇은 바늘에 시린지 펌프를 이용하여 계면활성제 수용액을 공급하였다. 유체가 서서히 공급되도록 시린지 펌프는 5.43 $\mu\text{L}/\text{min}$ 의 유량으로 세팅되었다.

Table 1. Experimental conditions.

Height (z_0)	525 mm	
Nozzle diameter (D_n)	1.60 mm	
SDS concentration (by weight)	0%	0.5%, 1.0%, 5.0%
Drop diameter (D)	4.15 mm	3.22 mm
Impact velocity (U)	3.12 m/s	3.09 m/s
Oil layer thickness (H)	1.7 mm	
Oil layer viscosity	Hexadecane (HO) 4.5 cSt	
	Silicone oil (SO) 5, 100, 1000 cSt	

바늘의 두께는 $D_n = 1.60$ mm며, 바늘에 유체가 서서히 공급됨에 따라 바늘에 pendant drop이 형성된다. 액적의 무게가 표면장력에 의한 집착력을 증가하게 되면 액적은 자연스레 중력에 의해 표적 유체로 떨어지게 된다. 그러므로 액적의 크기는 바늘의 크기에 따라 달라지며 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다⁽¹⁶⁾.

$$D = \left(\frac{6\sigma_{a,a}D_n}{\rho_d g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력 가속도이며 액적의 밀도 ρ_d 는 이론적으로는 계면활성제 농도에 따라 달라

지나 본 실험에서는 대략 997.2 kg/m^3 으로 거의 일정한 값을 가진다. 하지만 액적과 공기 사이의 계면장력인 σ_{da} 는 계면활성제 농도에 따라 달라지기 때문에 결과적으로 D 역시 달라진다. 계면활성제 농도가 가장 높은 경우, 계면활성제가 전혀 없는 경우에 비해 약 25% 정도 직경이 작은 액적이 생성된다.

액적의 충돌속도 U 는 기름층으로부터 노즐의 거리 z_0 를 변화시키는 방식으로 조절할 수 있다. 충돌 속도는 식(2)에 의해 결정되며⁽¹⁶⁾,

$$U = U_t \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{2g}{U_t^2} z_0\right)} \quad (2)$$

$U_t = (4\rho_a Dg / 3\rho_a C_d)^{\frac{1}{2}}$ 는 액적의 종단 속도이고 ρ_a , z_0 와 C_d 는 각각 공기의 밀도, 액적의 초기 높이 그리고 구체의 drag coefficient이다. 본 연구에서 z_0 는 525mm로 고정되었으며, 각 SDS 농도에 상응하는 액적의 지름과 액적의 충돌 속도는 Table 1.에 표기돼 있다.

마지막으로, 가시화를 위해 우리는 두 개의 초고속 카메라를 설치하였다. 두 대의 카메라는 모두 Photron사의 FASTCAM Mini UX100 모델이며, 조명은 모두 Alpha lite사의 E4-1.2BF 모델이다. 카메라와 조명 각 한 대는 수조의 양옆에 마주보도록 설치되어 액적 충돌의 측면 영상을 제공한다. 또한 다른 카메라 한 대는 보다 낮은 위치에 설치되어 수조 상단에 수직으로 설치된 조명과 45도로 기울어진 거울을 통해 반사된 하단부의 영상을 제공한다. 두 대의 카메라 모두 최대 10000 fps으로 동작하며, 약 61만 화소(480×1280 pixels)의 공간 분해능을 지닌다.

2.2 분석 방법

Fig. 2(a) - (b)는 상단에 있는 카메라로 촬영한 측면 영상의 프레임으로, 액적이 목표 액체에 충돌하면서 나타나는 cavity, crown과 이후 분출되는 Worthington jet을 보여준다. 위와 같은 영상으로부터 우리는 액적이 충돌하는 수면을 기

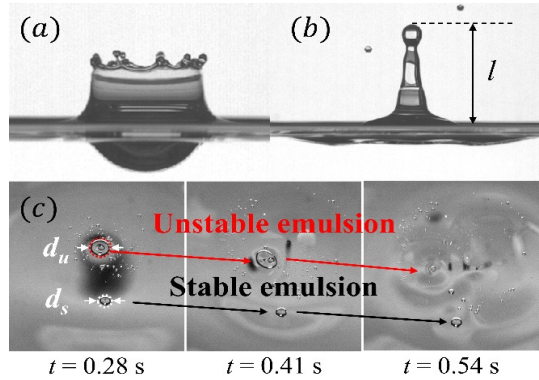


Fig. 2. Sample image of surfactant droplet impact on silicone oil layer and formation of (a) crown and cavity, (b) Worthington jet, (c) stable and unstable emulsions.

준으로 하여 Worthington jet의 높이 l 을 측정하였다. 동시에 측면 영상을 정성적으로 분석하여 에멀전이 생성되는 원리를 분류하였다.

Fig. 2(c)는 하단에 위치한 카메라로 촬영한 하단 영상으로, 계면활성제 액적이 충돌한 후에 발생하는 에멀전들을 명확하게 보여준다. 우리는 이 영상을 이용하여 에멀전의 크기와 갯수의 분포에 대해 통계 분석을 수행하였다. 우리는 에멀전을 불안정 에멀전 (빨간색 원 안)과 안정 에멀전(흰색 원 안)으로 분류하였다. 불안정 에멀전은 오랫동안 유지되지 못하고 대부분 1분 이내에 소실되는 반면, 흰색 원의 안정 에멀전은 수 분 이상 유지된다. 우리는 두 경우 각각에 대해 그 수 N 과 직경 $d(i = 1 \dots N)$ 를 측정하였다. 기름층의 점도와 액적의 SDS 농도를 변화시켜 가며 각 조건당 실험을 3회($M=3$) 반복하였고, 측정 결과를 이용하여 에멀전의 평균 수 \bar{N} 과 표면적의 평균을 무차원화한 값 \bar{A} 을 다음과 같이 계산하였다.

$$\bar{N} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N_i \quad (3)$$

$$\bar{A} = \frac{1}{MD^2} \sum_{i=1}^M \left\{ \sum_{j=1}^N \frac{d_j^2}{N} \right\}_i \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 에멀전의 안정성 분석

Fig. 3(a)는 이층 액체에 대한 SDS 수용액 액적 충돌로 인해 형성된 에멀전의 표면적의 총량을 로 단순화하여 안정 및 불안정으로 분류하여 표기한 것이다. 즉, 은 액적의 단면적과 같은 단면적을 차지하는 에멀전이 1개 생성되었거나, 액적의 단면적의 반만큼 차지하는 에멀전이 2개 생성된 것으로 해석할 수 있다. 에멀전의 면적의 총량은 모든 경우에 대해 1보다 크고 점도가 작은 기름층의 경우 최대 3.5 가량까지 올라가는 것을 볼 수 있다. 대체적으로 점도가 작을 수록, 혹은 SDS 농도가 높을 수록 에멀전의 크기가 커지는 경향을 보인다.

Fig. 3(b)와 3(c)는 평균 수와 평균 표면적을 각각 나타낸 것이다. 흥미롭게도, 기름층의 점도에 따라 과 의 경향성이 정반대인 것으로 관찰되었다. 기름층의 점도가 작을 수록 크기가 작은 에멀전이 다수(수 십 개) 생성된 반면, 기름층의 점도가 클 수록 크기가 큰 에멀전이 소수 (1~2개) 생성되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 계면활성제 농도가 높아짐에 따라 총 에멀전 대비 불안정한 에멀전의 비율이 높아진다 (Fig. 3(b)).

위와 같은 경향성은 근사적으로 성립하며, 이는 에멀전의 생성원리가 계면활성제 농도나 기름 점도에 달라짐에 따른 비선형성이 작용하는 것으로 추측된다. 명확하게 관찰되는 예외는 다음과 같다. 1) Fig. 3(b)에서 보이듯이 SDS 0% 액적을 충돌시키는 경우 SO 5 cSt의 점도에서 에멀전의 생성이 최대가 되었으며, Fig. 3(b)에서 보이듯이 헥사데케인에 SDS 1% 액적을 충돌시키는 경우 같은 SO 5 cSt 에서 에멀전의 생성이 상대적으로 억제되었다. 이러한 결과의 원인은 크게 세 가지로 가설을 세워볼 수 있는데 a) (예외 1)에 대해 SO와 HO의 화학적 차이에 의한, b) (예외 2)에 대해 실험에서 크기가 작은 불안정 에멀전의 측정에 한계가 있음, c) 계면활성제의 존재와 기름 점도의 차이로 인해 에멀전

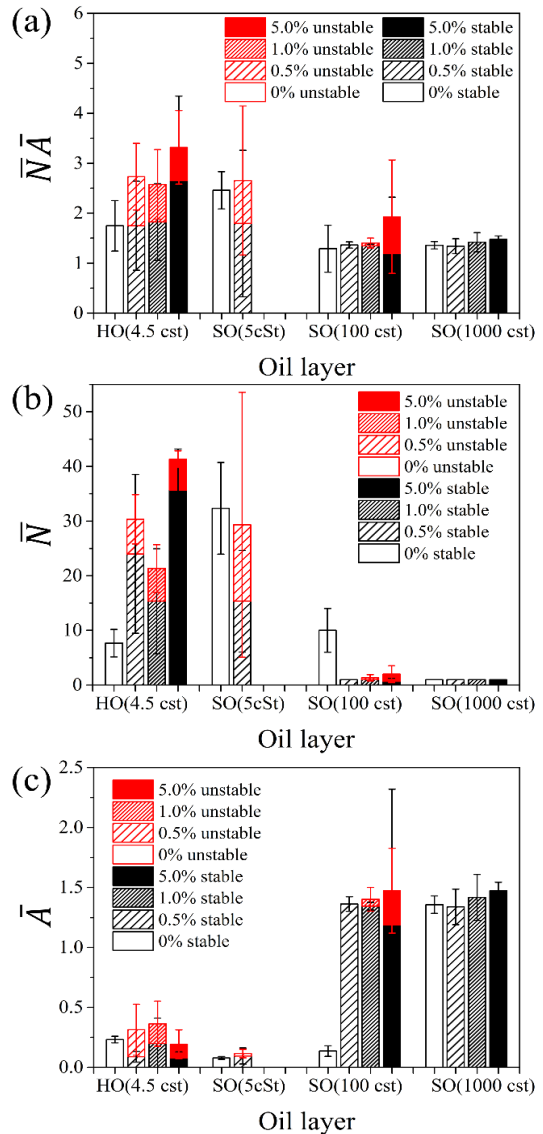


Fig. 3. (a) Total surface area of emulsions represented by the product of average number and average surface area of stable and unstable emulsions. And summation of (b) average number, (c) dimensionless average surface area of stable and unstable emulsions. HO and SO refers to hexadecane and silicone oil, respectively.

의 생성원리가 달라짐 등이다. 우리는 이 중 a) 가설은 SDS 1% 액적이 SO와 HO에 충돌하는 경우를 비교했을 때 발견되는 충돌 동역학의 일관성을 이유로 기각할 수 있으며, b) 가설은 SO 5 cSt에서 더 많고 작은 에멀전이 측정된 것으

로 미루어 기각할 수 있다. 따라서 우리는 남은 가설 c)를 검증하기 위해 추가적인 관찰 및 측정을 하였다.

3.2 에멀전의 형성 원리

본 실험의 결과를 분석한 결과, 우리는 에멀전이 생기는 기각이 세 가지가 있음을 확인하였다. 첫번째 기각으로 급격한 기름층의 후퇴 속도로 인해 뒤따르는 기름층이 찢어지면서 발생하는 에멀전이 있다. 두번째 기각으로는 cavity 하단부에서 cavity가 축소되면서 발생하는 불안정성으로 인해 pinch-off 되어 에멀전이 발생하는 경우(cavity pinch-off)가 있으며, 세번째 기각으로 jet이 pinch-off되면서 생기는 secondary drop이 에멀전의 형태로 생성되는 경우(jet pinch-off)가 있다. 우리는 모든 기각에서 나타난 에멀전들이 기름 막 내부에 SDS 용액이 감싸져 있는 에멀전임을 확인하였다. 기름의 점도와 액적의 SDS 농도별로 에멀전 형성 과정을 도시하였다. Fig. 4에 무차원화된 최대 jet 높이를 jet pinch-off와 cavity pinch-off 여부로 영역을 나누었으며, 경우에 따라 jet과 cavity pinch-off 모두 일어나는 경우(mixed pinch-off), 매우 얇고 빠른 Worthington jet이 형성되는 경우(narrow-jet pinch-off), 그리고

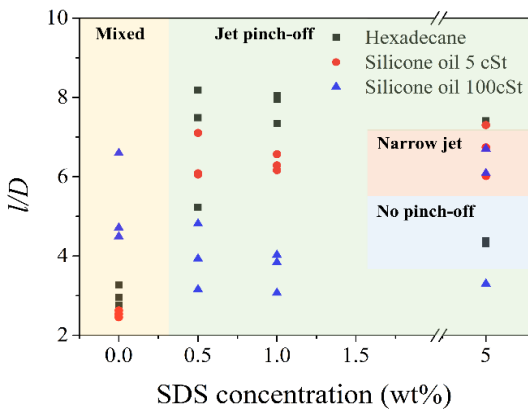


Fig. 4. Dimensionless maximum jet height with respect to SDS concentrations for different oil layers. Pinch-off modes were divided into four; jet pinch-off, no pinch-off, narrow-jet pinch-off, and mixed pinch-off where both jet and cavity pinch-off occur.

pinch-off가 일어나지 않는 경우(no pinch-off)가 있어서 따로 표시하였다. 이어 오는 문단에서 각 에멀전 생성 기각별로 자세히 논의한다. 첫번째 기각으로, 충돌 이후 기름층의 급격한 후퇴 속도로 인해 기름층이 파단되며, 이 과정에서 에멀전이 생성된다 (Fig. 5(a)-(d)). 실리콘 오일 100 cSt처럼 높은 점도의 기름층에서는 급격한 후퇴에도 파단되지 않아 에멀전이 형성되지 않는 반면, 낮은 점도의 기름층에서 급격한 기름층의 후퇴로 인한 전단응력으로 인해 뒤따르는 기름이 파단되면서 다수(수십개)의 작은 에멀전을 형성하게 된다.

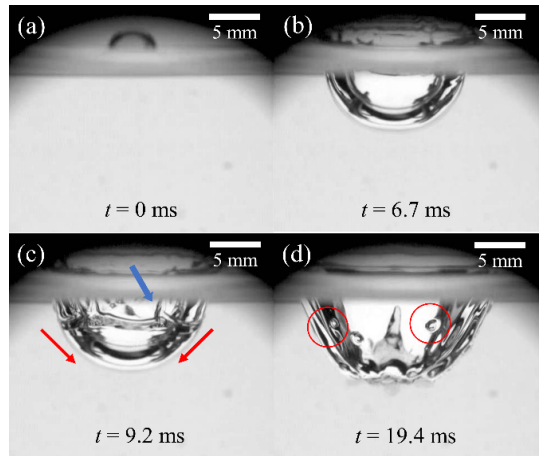


Fig. 5. Sample image of oil layer contraction after the impact of water droplet on 5 cSt silicone oil. The blue arrow points the breakage of oil ligament into emulsions due to rapid contraction.

이러한 현상은 낮은 점도의 기름층(HO, SO 5 cSt)에 액적이 충돌하는 경우에서 에멀전 형성의 주된 원인으로 나타난다. 이러한 기각은 본 실험에서 사용된 모든 SDS 농도에서의 액적이 HO에 충돌할 때 전부 발생함을 실험적으로 확인했다. CMC 이상의 SDS 농도에서는 액적의 지름은 동일하여 충돌 에너지가 일정하고 기름층의 점도도 일정하므로, 에멀전 형성 과정은 오로지 SDS 농도 및 확산속도에 의한 동적 및 평형 계면장력에 의해 결정된다. 일반적으로 계면활성제의 확산 시간 스케일은 계면활성제의 농도에 반비

레한다고 알려져 있다.⁽²²⁾ 따라서, 우리는 SDS 농도가 증가할 수록 분자의 확산 속도가 증가하여 안정적인 다수의 에멀전이 생성될 것으로 추측했으며, 대체로 그 경향성을 따라간다. 하지만 예측과는 다른 결과가 Fig. 3(b) HO에 1.0% 액적이 충돌할 때 나타났다. 이 경우 생성된 에멀전의 크기가 매우 작아서 카메라가 분해하지 못하였기 때문인 것으로 추측한다.

두번째, 에멀전은 cavity 내부에서 pinch-off가 일어나 발생할 수도 있다 (cavity pinch-off). Fig. 6(c)-(f)에서 볼 수 있듯이, cavity pinch-off는 기름층의 강도 대비 높은 액적의 충돌 에너지로 인해 액적이 cavity 하단부를 관통함과 동시에 기름층의 후퇴 및 충돌이 액적을 가둠으로써 에멀전이 발생한다. 이 과정 속에서 소수의 큰 에멀전이 형성되나, 우리의 실험 결과에서는 그 영향이 뚜렷하지 않다.

세번째, 에멀전은 충돌 후 생성된 Worthington

jet이 pinch-off되면서 생성될 수 있다. Worthington jet은 액적이 충돌함에 따라 발생하는 표면과 충돌지점에 되돌아오면서 발생되며 (Fig. 6(a) 93 ms), 상대적으로 두꺼운 jet이 형성된다. 이러한 과정 중에 cavity pinch-off가 일어날 경우, cavity로부터 유체가 손실됨에 따라 표면 에너지의 운동 에너지로의 전환은 jet의 속도를 증가시키므로, 매우 얇고 빠른 jet이 형성(Fig. 6(c) 44 ms)되기도 한다. 전자의 두꺼운 jet은 Fig. 4의 Jet pinch-off 영역에서 관측되며, 얇고 빠른 jet은 Fig. 4의 mixed pinch-off와 narrow-jet pinch-off 영역 모두에서 관측된다.

Jet pinch-off로 인해 에멀전이 생성되는 경우, 기름층의 점도와 SDS의 농도는 모두 중요한 역할을 한다. 두 가지의 jet 형태 모두 기름층의 점도가 높을 수록 jet의 pinch-off가 지연되면서 보다 많은 에멀전이 생성된다. 하지만 그 수가 첫 번째 기작에 비해 많지 않다 (수 개). 또한 계면

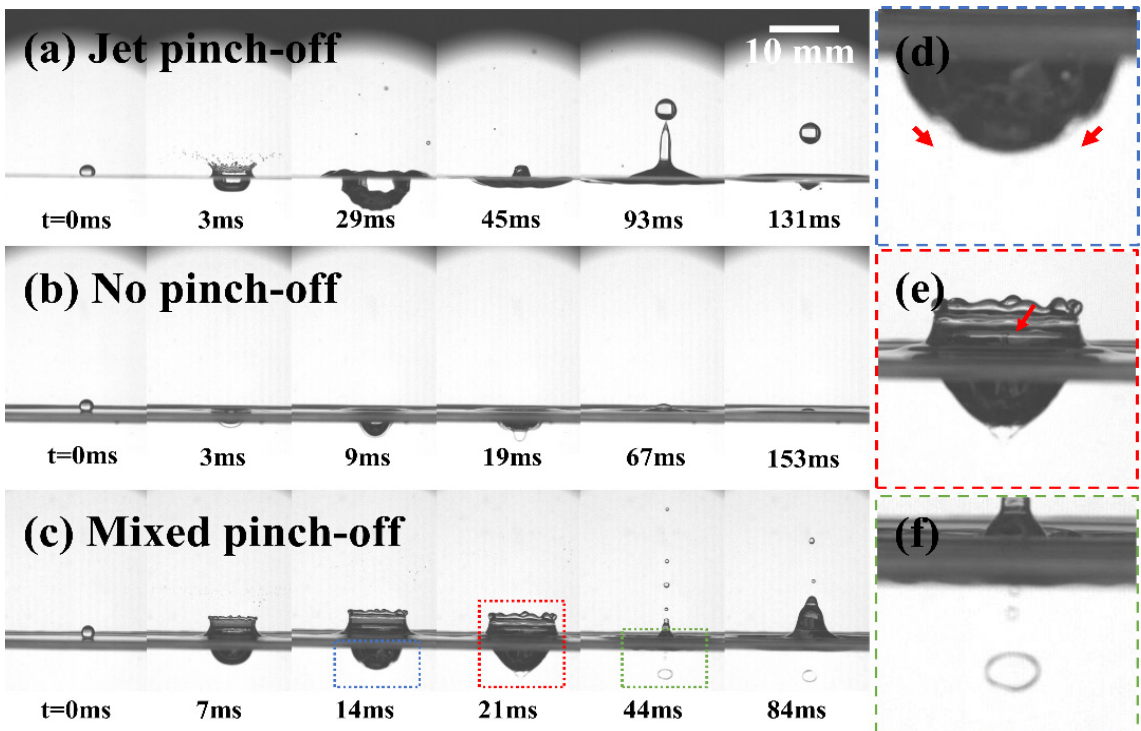


Fig. 6. Three pinch-off modes after the impact of droplet. (a) jet pinch-off, (b) no pinch-off, (c) mixed pinch-off. (d) shows the retraction and collision of an oil layer when cavity reaches its maximum depth, (e) represents the resulting narrow jet followed by the main body of jet, and (f) pinch-off of emulsion at the bottom of cavity.

활성제의 농도가 높을 수록 jet의 계면이 안정화되어 pinch-off가 늦춰지므로, jet의 최대 높이는 증가하고 두께는 얇아진다. 다만 pinch-off의 시간 스케일이 SDS 분자의 확산의 시간 스케일보다 매우 짧으므로, 동적 계면장력으로 인한 불안정성이 발생한다. 이러한 기작의 특징은 SO 100 cSt에 액적이 충돌하는 경우에서 뚜렷하게 나타나며, SDS 농도가 증가할수록 불안정 에멀전의 수가 증가한다. 다만, mixed pinch-off 기작을 보이는 0% 액적의 경우 얇고 빠른 jet의 pinch-off로 인해 크기가 작은 소수의 에멀전이 생성된다.

4. 결론

본 연구에서는 계면활성제 액적을 농도별로 여러 점도를 지닌 이층 액체에 충돌시켜 에멀전의 형성에 대한 SDS 농도와 기름층 점도의 영향을 확인하였다. 이를 위해 초고속 카메라로 측면 및 아래에서 촬영된 영상을 기반으로 전반적인 충돌과 에멀전 형성 과정을 분석하였다. 우리는 에멀전의 평균 수와 평균 표면적의 비선형적인 결과로부터, 계면활성제 농도와 기름의 점도의 변화는 전혀 다른 에멀전 형성 기작으로 이어질 것이라는 가설을 세웠다. 이를 검증하기 위해 우리는 3가지의 에멀전 형성 기작에 대한 분석을 진행했다. 첫번째는 급격한 기름층의 후퇴 속도로 인해 뒤따르는 기름층이 찢어지면서 에멀전이 형성되는 것으로, 기름 점도가 낮을 때 에멀전 형성에 지배적인 역할을 하며, 점도가 높은 경우에는 에멀전 형성에 거의 영향을 미치지 않았다. 두번째는 cavity pinch-off로, 크기가 크고 소수의 에멀전이 형성되고 본 실험의 조건에서는 실리콘 오일 1000 cSt에 액적이 충돌할 때를 제외하곤 뚜렷한 영향을 관측할 수는 없었다. 세번째 기작은 jet pinch-off로, 소수의 에멀전이 형성되고 그 크기는 jet의 두께에 의해 결정되며, 주로 높은 점성에서 에멀전 형성에 지배적인 역할을 한다. 우리는 이러한 분석 결과로부터 에멀전 형성의 기작에 대한 계면활성제의 농도와 기름층의 영향을 알 수 있었다. 이러

한 결과는 해상 기름 유출 사고시 가소제 농도를 특정하여 효과적인 가소제 분사를 이루는데 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행하였으며 (No. 2020R1A2C3010568, No. 2021R1C1C1010158), 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구사업 (No. 2021R1A6A1A03039696)으로 수행되었음. 또한, 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생태모방 기반 환경오염관리 기술개발사업의 지원을 받아 연구가 수행되었음 (2019002790003).

REFERENCE

- 1) Worthington, A. M., 1877, "XXVIII. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate," *Proceedings of the royal society of London*, 25(171-178), 261-272.
- 2) Worthington, A. M., 1883, "On impact with a liquid surface," *Proceedings of the Royal Society of London*, 34(220-223), 217-230.
- 3) Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y. M., Chandra, S., & Mostaghimi, J. (1996). Capillary effects during droplet impact on a solid surface. *Physics of fluids*, 8(3), 650-659.
- 4) Castillo-Orozco, E., Davanlou, A., Choudhury, P. K., & Kumar, R. (2015). Droplet impact on deep liquid pools: Rayleigh jet to formation of secondary droplets. *Physical Review E*, 92(5), 053022.
- 5) Michon, G. J., Josseland, C., & Séon, T. (2017). Jet dynamics post drop impact on a deep pool. *Physical review fluids*, 2(2), 023601.
- 6) Ferreira, A. G., & Singer, M. J. (1985). Energy dissipation for water drop impact into shallow pools. *Soil Science Society of America Journal*,

- 49(6), 1537-1542.
- 7) Fan, X., Wang, C., Guo, F., Chen, B., & Li, M. (2021). Water droplet impact on high-temperature peanut oil surface: The effects of droplet diameter and oil temperature. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106601.
 - 8) Gielen, M. V., Sleutel, P., Benschop, J., Riepen, M., Voronina, V., Visser, C. W., ... & Gelderblom, H. (2017). Oblique drop impact onto a deep liquid pool. *Physical review fluids*, 2(8), 083602.
 - 9) Jain, U., Jalaal, M., Lohse, D., & van der Meer, D. (2019). Deep pool water-impacts of viscous oil droplets. *Soft matter*, 15(23), 4629-4638.
 - 10) Zheng, L., Cao, C., Cao, L., Chen, Z., Huang, Q., & Song, B. (2018). Bounce behavior and regulation of pesticide solution droplets on rice leaf surfaces. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(44), 11560-11568.
 - 11) Pasandideh-Fard, M., Chandra, S., & Mostaghimi, J. (2002). A three-dimensional model of droplet impact and solidification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(11), 2229-2242.
 - 12) WORTHINGTON, A. M. 1908 A Study of Splashes. Longmans Green.
 - 13) Josserand, C., & Thoroddsen, S. T. (2016). Drop impact on a solid surface. *Annual review of fluid mechanics*, 48(1), 365-391.
 - 14) Smith, D. B., Askew, S. D., Morris, W. H., Shaw, D. R., & Boyette, M. (2000). Droplet size and leaf morphology effects on pesticide spray deposition. *Transactions of the ASAE*, 43(2), 255.
 - 15) Murphy, D. W., Li, C., d'Albignac, V., Morra, D., & Katz, J. (2015). Splash behaviour and oily marine aerosol production by raindrops impacting oil slicks. *Journal of Fluid Mechanics*, 780, 536-577.
 - 16) Kim, D., Lee, J., Bose, A., Kim, I., & Lee, J. (2021). The impact of an oil droplet on an oil layer on water. *Journal of Fluid Mechanics*, 906.
 - 17) Pumphrey, H. C., & Elmore, P. A., "The entrainment of bubbles by drop impacts," *Journal of Fluid Mechanics*, 220, 539-567, 1990.
 - 18) Wang, W., Ji, C., Lin, F., Wei, X., & Zou, J. (2019). Formation of water in oil in water particles by drop impact on an oil layer. *Physics of Fluids*, 31(3), 037107.
 - 19) Ni, Z., Chu, F., Feng, Y., Yao, S., & Wen, D. (2021). Large-Scale Dewetting via Surfactant-Laden Droplet Impact. *Langmuir*, 37(46), 13729-13736.
 - 20) Cai, Z., Wang, B., Liu, S., Li, H., Luo, S., Dong, Z., ... & Jiang, L. (2022). Beating Worthington jet by surfactants. *Cell Reports Physical Science*, 3(3), 100775.
 - 21) Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B., & Zhang, B., 2016, "Offshore oil spill response practices and emerging challenges," *Marine pollution bulletin*, 110(1), 6-27.
 - 22) Aytouna, M., Bartolo, D., Wegdam, G., Bonn, D., & Rafai, S. (2010). Impact dynamics of surfactant laden drops: dynamic surface tension effects. *Experiments in fluids*, 48(1), 49-57.