

메쉬를 통과하는 액적 군집의 분산

Dispersion of droplet group through mesh

2019-17883 김승훈

Abstract

본 연구는 사각형으로 분할된 격자무늬 스테인리스 메쉬의 동일 위치를 액적 군집이 순차적으로 통과할 때 분산되는 현상을 관찰한 연구이다. 이 현상은 시간에 따라 메쉬의 젖음 정도가 변화하며 세 가지의 regime으로 나뉜다. Regime A에서 액적은 건조 메쉬에 충돌하며 균일하게 작은 크기와 큰 각도로 분산된다. Regime B에서 액적은 메쉬-액적 사이 힘과 잔여 유체-액적 사이 힘을 받아 다양한 크기의 액적으로 분할되는데, 작은 크기의 액적은 큰 각도로, 큰 크기의 액적은 작은 각도로 분할된다. Regime C에서 잔여 유체-액적 사이의 인력이 지배적이어서 낙하 축의 연장선으로 굵은 유체기둥이 생긴다. 메쉬 잔여 유체 축적 여부와 축적 속도는 regime 변화 양상의 주요 인자인데, 이는 액적 크기와 메쉬 격자 크기의 비율 β , 충돌 속력에 의존함을 실험적으로 밝혀냈다. 또한 액적의 크기 분포 및 분산 각도-크기 결합 분포를 통계적으로 산출하고 각 분포가 regime 별로 고유한 형태를 가짐을 보였다.

1. Introduction

본 연구의 목적은 액적 군집이 사각형으로 분할된 격자무늬 메쉬를 통과하며 분산되는 과정을 관찰하고 시간에 따른 양상의 변화를 세분화하며, 주요 매개변수 사이의 상관관계를 찾고 분산 후의 액적 크기 및 분산 각도를 분석하는 것이다. 유체의 자유낙하 과정에서 흩뿌려지듯이 분사되거나, 장애물을 만나 유동의 모양이 변하는 과정은 일상과 산업에서 흔하게 관찰할 수 있는 현상이다. 농업 현장, 스프레이 분사, 잉크 작업에서의 균일한 작은 유체 방울 분사, 기체-유체 혼합 화학 공정의 효율적 물질 전달(mass transfer)을 위한 분사 등 유체를 작고 균일한 크기의 액적들로 분사하는 과정은 산업의 여러 분야에서 중요하다. 기존 연구들에서는 단일 액적을 메쉬에 통과시킬 때 분산되는 과정을 액적과 메쉬의 크기 비율, 메쉬의 초소수성 정도, 액적의 충돌 속력 등의 변수에 대해 관찰했다. 본 연구에서는 단일 액적 충돌 조건을 여러 액적의 연속 충돌 조건으로 확장하여 시간에 따라 양상이 변화하는 과정과 충돌 후 통계 분포를 분석한다.

2. Related Works

(Soto, et al. 2018)는 메쉬의 기하학적 특성(메쉬의 두께, 메쉬 격자의 크기 등)에 따른 액적 분사결과의 기하학적 특성(분사 각도-conical angle)과 물질 전달을 모델링하고 측정했다. 물 액적을 단일 구멍에 통과시킬 때 액적이 구멍에 입사하는 각도에 따른 분사 각도와, 액적/메쉬 격자 크기 비율과 충돌 전후 속력 비율에 따른 물질 전달 관계를 보였다. 구멍이 여러 개인 메쉬를 통과시킬 때 물질 전달이 정규화된 전달 면적의 제곱에 비례함

$$\left(\frac{m}{m_b}\right) \sim \left(\frac{R_t}{R}\right)^2 \phi \left(1 - \frac{v^*}{v}\right) \text{임을 보였다.}$$

(Kooji, et al. 2019)는 메쉬를 통과한 단일 액적의 크기 분포에 대한 연구이다. 메쉬를 통과한 물은 ligament 형태로 퍼져서 분출되다가 분할이 일어난다. Newtonian 유체의 ligament가 분할될 때 크기 분포는 감마 함수를 따른다는 사실이 알려져 있기 때문에 액적

크기 분포의 측정 결과를 이에 근사할 수 있음을 확인했다. 충돌 속력이 증가할 때 평균 액적 크기가 감소함을 실험적으로 검증했다. 또한 ligament의 분할 이후 물방울들이 병합되며 작은 액적들의 수가 감소함을 실험적으로 확인했다. 추가적으로 충돌 과정의 lattice Boltzmann 모델링으로 실행한 시뮬레이션 결과를 통해 실험 결과를 검증했다.

(Ryu, et al. 2017)는 물 액적이 메쉬에 부딪힐 때 통과할 속력 조건과 메쉬의 소수성의 관계를 분석했다. 소수성 메쉬와 초소수성 메쉬에 액적을 충돌시키며 액적의 투과(penetration)가 일어날 경계 속력을 모델링했다. 물의 투과 과정은 물이 메쉬에 충돌하며 투과가 되는 '충돌 투과(impact penetration)'와 충돌 후 튕겨져 나가는 액적으로부터 분리되는 '반동 투과(recoil penetration)'로 분류될 수 있다. 투과 압력과 저항 모세관력 사이의 균형으로부터 경계 속력을 구할 수 있다. 반동 투과는 초소수성 메쉬의 경우에만 관찰되는데, 이는 소수성에 의해 반동 과정에서 마찰에 의해 분산되는 에너지를 무시할 수 있기 때문이다. 이로 인해 초소수성 메쉬가 오히려 물 액적을 잘 통과시킨 것으로 관찰되었다.

(Su, et al. 2020)은 메쉬의 소수성을 변화시키며 유체 분출 각도와 물방울의 평균 크기 등을 측정했다. 메쉬의 마이크로/나노 구조는 스테인리스 기판에 스프레이 코팅을 변화시키는 방식으로 소수성을 변화시켰고, 액적을 올려놓았을 때의 접촉 각도로 측정했다. 실험 결과 단일 액적을 메쉬에 충돌시킬 때 메쉬의 표면 소수성을 80% 증가시킴에 따라 충돌 후 액적의 크기는 70%까지 감소하며, 분포도 더 균일해지는 것으로 나타났다.

(Tang, et al. 2019)은 단일 액적을 스테인리스 메쉬에 충돌시키는데, 접촉하는 철사의 모양(아래로 돌출되었는지, 위로 돌출되었는지, 평면인지)과 두 철사가 교차하는 점인지에 따라 분류해서 실험을 진행했다. 액적의 퍼짐을 측정할 때 주요 요소인 액적이 분할된 후 완전히 분리되기까지 액적의 최대 연장 길이(maximum spread length)와 Weber 수를 측정했으며, 액적과 메쉬의 크기 비율 β 를 변수로 두었다. 최대 연장 길이와 β 사이의 증가 관계를 보였으며, $We-\beta$ 그래프에서 분리 형태 영역(ligament, double-drop, single-drop)을 구분할 수 있음을 보였다.

(Liao, et al. 2022)은 메쉬의 소수성이 분산에 미치는 영향을 CFD 시뮬레이션 실험으로 분석했으며, 따라서 측정할 수 있는 변수가 다양하다. 액적의 운동에너지와 표면 퍼텐셜에너지의 비율로 정의된 We 수를 사용했고, 분산에 의해 증가한 사후 액적들의 표면적 증가율을 측정해 두 변수의 증감이 일치함을 실험적으로 입증했다. 또한 메쉬의 소수성이 강할수록 액적의 표면 퍼텐셜에너지로 전환되는 비율이 증가함을 보여 현상을 설명했다.

(Vontas, et al. 2020)은 유체의 점성도(viscosity)와 표면장력을 변화시키며 초소수성 메쉬를 통과하는 단일 액적 현상을 시뮬레이션으로 분석했다. 충돌 시점에는 유체의 고유 특성보다 관성 효과가 지배적이며, 액적이 메쉬에 의해 최대 퍼지는 길이는 We 수(Weber number)와 Oh 수(Ohnesorge number)에 의존한다. 구멍을 통해 분출되는 제트는 관성력(inertial force)과 모세관력(capillary force)에 의해 결정되며, 최대 연장 길이는 We 수에 대한 함수로 표현된다. 연구에서는 또한 유체의 We 수, Oh 수를 변화시키며 시간에 따른 에너지 변화와 투과 질량 변화도 측정했고, 점성도가 증가하면 분산되는 에너지가 증가하며, 투과 질량은 표면장력이 증가함에 따라 감소하지만 점성도에는 영향이 없음을 보였다. 점성도가 낮은 유체는 최대 연장 길이가 짧으므로 작은 액적으로 분할됨을 확인했다.

이와 같이 메쉬를 통과하는 단일 액적의 분산을 다룬 선행 연구들이 있다. 메쉬와 액적의 크기 비율이나 충돌 각도 같은 기하학적 특성, 액적의 운동에너지 대 퍼텐셜에너지의 비율, 메쉬의 소수성 등을 변화시키며, 물질 전달 비율, 사후 액적의 크기 분포, ligament의 최대

연장 길이 간의 상관관계에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 실제 산업 현장에서는 동일 위치를 액적이 반복적으로 통과하는 현상이 흔한데, 이러한 군집이 메쉬를 통과하는 현상을 다룬 연구는 없었다. 이에 착안하여 단일 액적에 대한 탐구를 액적 군집으로 확장해 연구를 진행하게 되었다.

3. Experiment Details

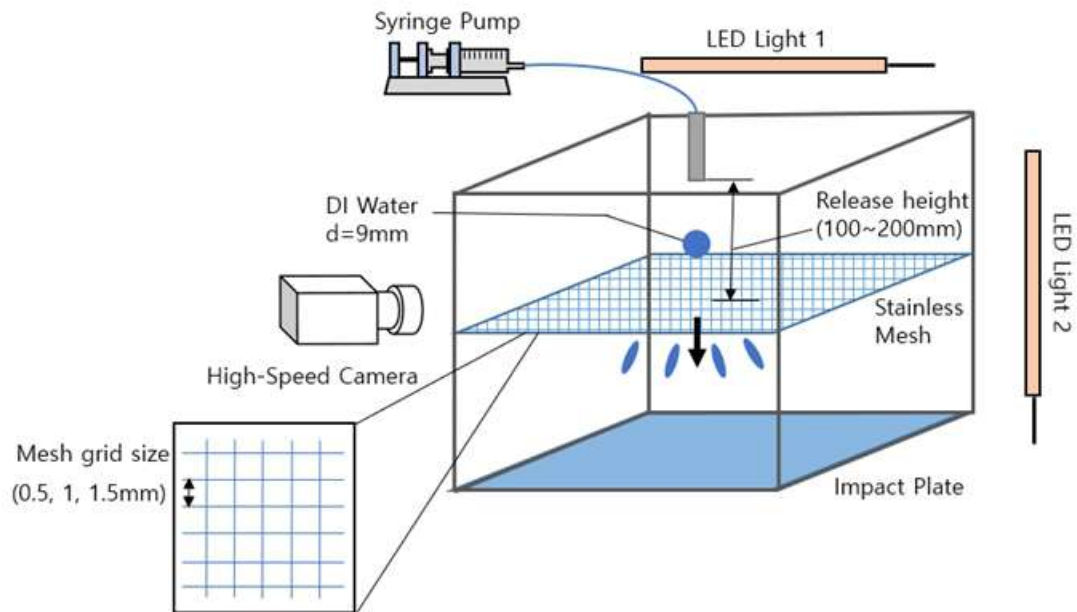


Figure 1. Overview of experiment method.

본 연구에서는 메쉬의 같은 위치에 순차적으로 충돌하는 액적 군집의 거동을 분석한다. 스테인리스 메쉬를 고정시키고, 메쉬로부터 특정 높이에 니들(needle)을 고정하고 시린지펌프에 연결해 균일한 유량을 공급한다. 따라서 균일한 크기의 액적(물)을 균일한 시간 간격으로 방출하게 된다. 방사 방향으로 현상이 대칭적이라는 가정을 할 수 있으므로, 충돌 위치를 포함하고 메쉬에 수직인 단면에 초고속 카메라 초점을 두고 충돌 후 액적 군집의 거동을 촬영한다. PCC(Phantom Camera Control) 소프트웨어와 OpenCV 라이브러리의 findContours 함수를 이용해 프레임마다 액적을 검출하는 방식으로 이미지 처리한다.

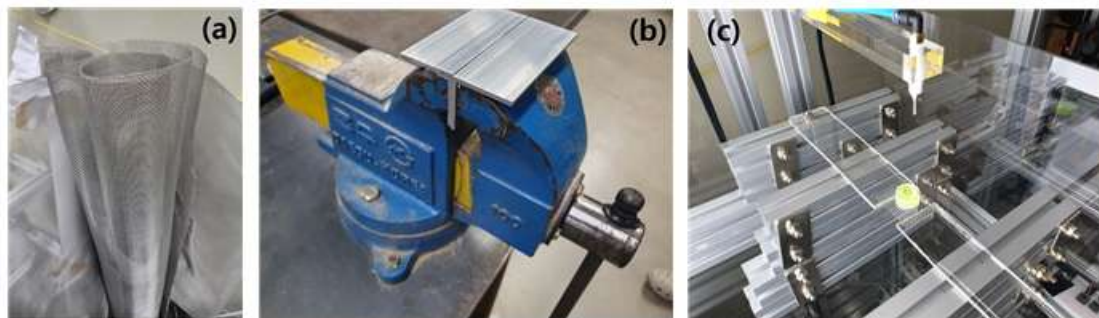


Figure 2. (a) Preprocessed mesh. (b) Flattening the mesh. (c) Checking the level of mesh.

메쉬가 평평한 단면을 이루도록 강제하기 위해 사진과 같이 스테인리스보다 굳기가 강한 두 금속판 사이에 메쉬를 끼우고 Figure 2(b)와 같이 고정 클램프를 이용해 압력을 가한다. 소수성 등의 성질을 조절하기 위해 메쉬를 에탄올로 세척하고 마를 때까지 충분한 시간을 기다린다. Figure 2(c)와 같이 수평계를 이용해 메쉬가 지면과 평행함을 실험 시작 전 확인한다. 액적의 분사 각도를 고려해 유체의 분산 경로를 방해하지 않도록 지지 프레임을 간격을 두고 설치한다.

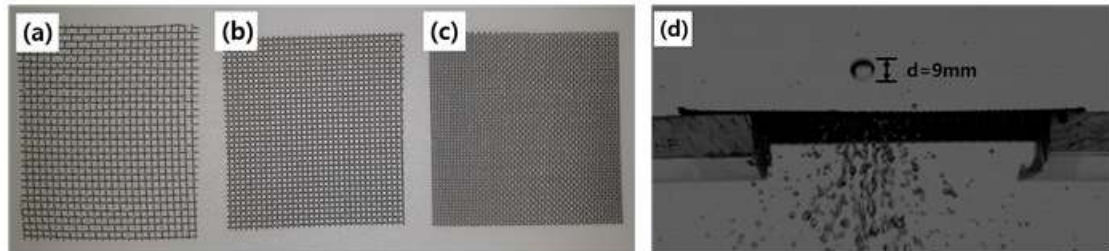


Figure 3. Mesh grid size: (a) 1.5 (b) 1.0 (c) 0.5mm, (d) droplet diameter: $d=9\text{mm}$

유체는 DI Water이고, 메쉬의 재질은 스테인리스이고, 액적의 지름 $d=9\text{mm}$ 이고, 메쉬의 한 변 길이는 각각 1.5, 1.0, 0.5mm이고, 철사 직경은 0.35, 0.4, 0.3mm에 대해 실험한다. 액적의 충돌 속력을 1.4~1.98m/s로 변화시킨다. 이때 유체를 공급하는 시린지펌프의 공급 유량(펌프 수축 속도)은 70~130mm/min으로 변화시키며 실험한다.

4. Results and Discussion

4-1. Regime Classification

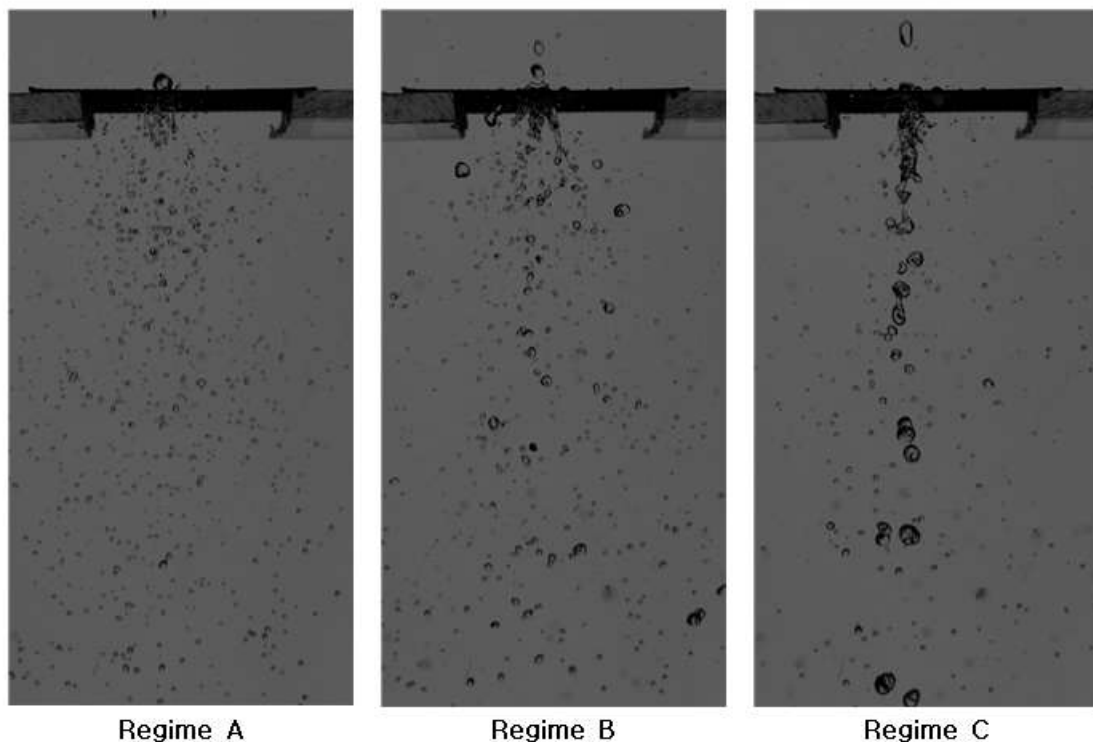


Figure 4. Droplet dispersion at regime A, B, C

액적 군집이 메쉬의 같은 위치에 반복적으로 충돌하는 과정에서 메쉬의 젖은 정도가 변화하기 때문에 액적의 분산 양상도 변화하는데, Figure 4에 나타나듯 크게 세 단계로 구분할 수 있다. A단계(Regime A)는 충돌 초기 메쉬가 건조 상태에 있을 때, 액적이 작고 균일한 크기로 분할되는 단계이다. B단계(Regime B)는 액적이 다양한 크기의 액적으로 분할되는 단계이다. C단계(Regime C)는 충돌 전 낙하 축의 연장선으로 굵은 유체기둥(pillar)이 생기는 단계이다. A단계에서는 액적과 메쉬 사이의 힘만 작용하기 때문에 충돌 과정에서 생기는 수평 방향 속력은 저항받지 않고, 따라서 큰 분산 각도로 액적들이 분할된다. B단계에서는 메쉬에 잔여 유체에 의해서 충돌하는 액적은 메쉬로부터 받는 힘과 유체로부터 받는 인력을 혼합하게 받게 된다. 따라서 B단계에서 큰 각도로 분할되는 작은 액적과, 메쉬에 남아있다가 분출되는 기둥 형태의 ligament에서 분할되는 비교적 큰 액적들이 함께 나타난다. C단계는 메쉬의 잔여 유량이 충분해서 유체 사이의 인력이 지배적으로 됐을 때 나타난다. 분할로 생긴 수평 방향 속력이 인력으로 소멸하므로 대부분 액적은 작은 분산 각도를 가지고, 그래서 굵은 기둥이 생긴다. C단계에서 액적의 분산 과정에는 액적의 충돌에 의한 반동(recoil)이 중요하게 작용한다.

4-2. Regime transition according to droplet-mesh size ratio (β)

단계 A, B, C는 실험 조건에 따라 다르게 나타나며, 특정 조건 하에서는 어떤 단계는 나타나지 않기도 한다. Figure 5는 액적의 충돌 속력 1.98m/s, 시린지펌프 유량 130mm/min로 고정하고 메쉬 격자의 크기를 1.5mm, 1.0mm, 0.5mm로 변화시키며 메쉬 격자 크기 대비 액적 크기($\beta = \text{droplet diameter/mesh size}$)가 6, 12, 18에 대해 단계 변화를 관찰한 것이다. $\beta = 18$ 일 때는 단계 A, B, C가 순서대로 선명하게 나타나고, $\beta = 12$ 일 때는 초기의 A단계를 거친 후 B단계가 정상 상태가 되며, $\beta = 6$ 일 때 지속적으로 B단계만 나타난다. $\beta = 12$ 의 메쉬 격자 크기가 $\beta = 18$ 인 경우보다 크기 때문에 메쉬의 잔여 유량이 충분히 축적되기 전에 ligament 형태로 분출된다. 따라서 이 경우 시간이 충분히 지나 정상 상태에 도달했을 때에도 중심축 방향의 두꺼운 유체기둥이 나타나는 C단계는 나타나지 않고, B단계가 정상 상태가 되는 것이다. 반면 $\beta = 6$ 일 때, 메쉬 격자 크기가 커서 메쉬가 건조 상태에서도 작고 균일한 액적으로 분할이 일어나지 않고 처음부터 ligament 분할이 되는 B단계가 된다. 또한 충분한 시간이 흘러도 메쉬에 잔류 유량이 충분히 축적되지 않기 때문에, $\beta = 12$ 인 경우와 마찬가지로 C단계는 나타나지 않고 B단계가 정상 상태가 된다. 정리하자면, 메쉬 격자 크기 대비 액적 크기 비율 β 가 변화함에 따라 $\beta = 18$ 은 A-B-C단계, $\beta = 12$ 는 A-B단계, $\beta = 6$ 는 B단계가 나타나는 차이를 보인다.

4-3. Regime transition according to impact velocity

액적의 충돌 속력을 변화시킴에 따라 regime transition 속도도 다른 것이 관찰되었다. Figure 6는 시린지펌프 유량 130mm/min, 메쉬 격자 크기를 0.5mm($\beta = 18$)로 고정하고 액적의 충돌 속력을 1.98, 1.4m/s로 변화시키며 regime 변화를 관찰한 것이다. 두 경우 모두 A, B, C단계를 거치지만, 액적의 충돌 속력이 더 클 때 regime transition이 더 느리게 일어나는 것을 관찰할 수 있다. 동일한 시간대에서 비교했을 때, $t=37.5\text{ms}$ 에서는 동일하게 A단계이지만, $t=300\text{ms}$ 에서 충돌 속력이 큰 경우는 A→B단계인 반면 충돌 속력이 작은 경우는 이미 B→C단계이고, $t=750\text{ms}$ 에서 충돌 속력이 큰 경우는 B→C단계인 반면 충돌 속력이 작은 경우는 C단계이다. 이처럼 충돌 속력이 클 때 regime transition이 더 천천히 일어나는

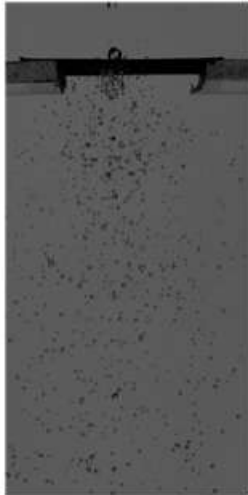
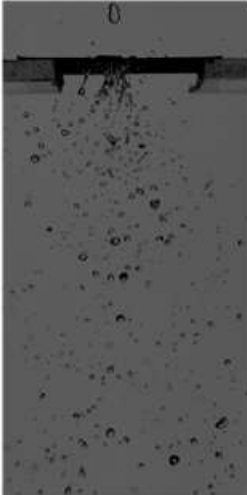
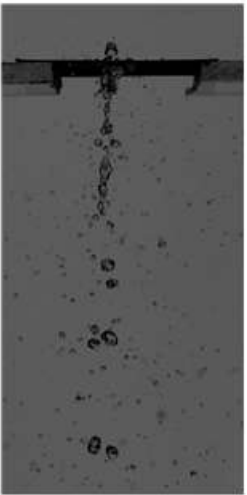
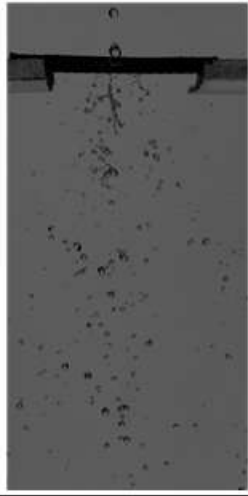
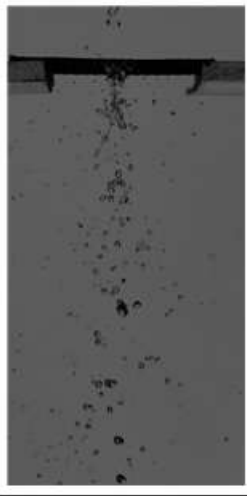
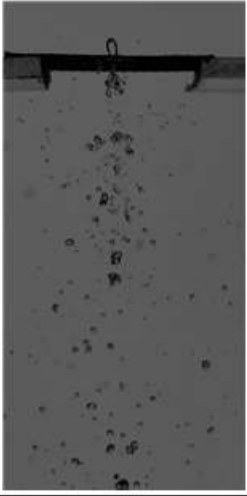
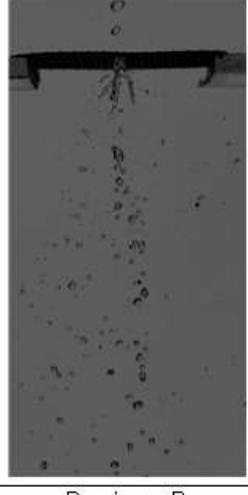
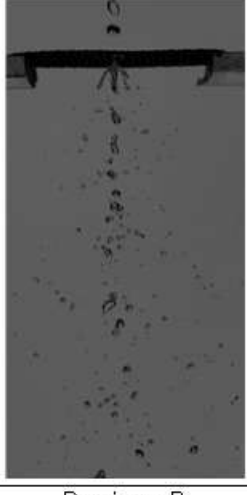
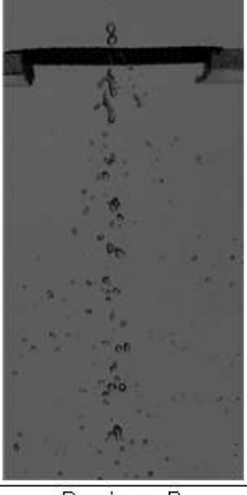
	$t = 50ms$	$t = 500ms$	$t = 800ms$
$\beta = 18$			
	Regime A	Regime B	Regime C
$\beta = 12$			
	Regime A	Regime B	Regime B
$\beta = 6$			
	Regime B	Regime B	Regime B

Figure 5. Regime transition according to $\beta = 6, 12, 18$, under droplet impact velocity $1.98m/s$ and syringe pump compress rate $130mm/min$. $\beta = \text{droplet diameter/mesh grid size}$.

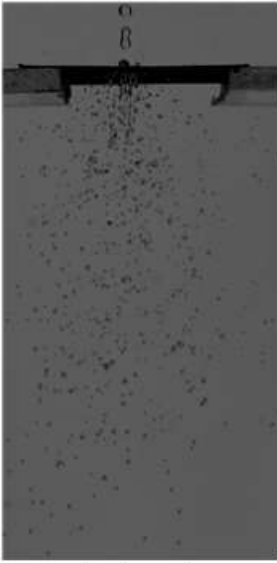
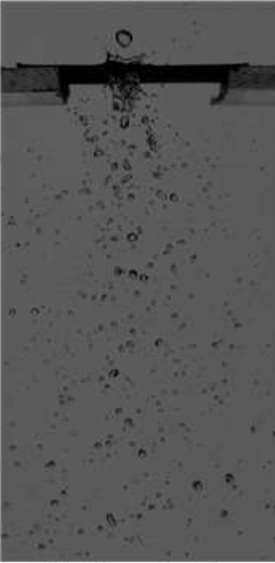
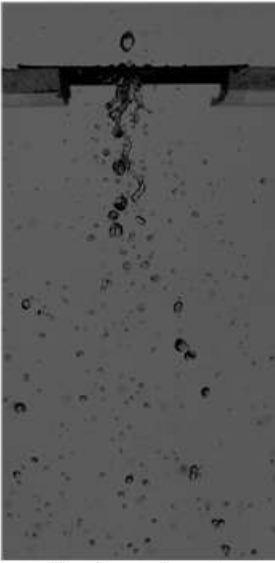
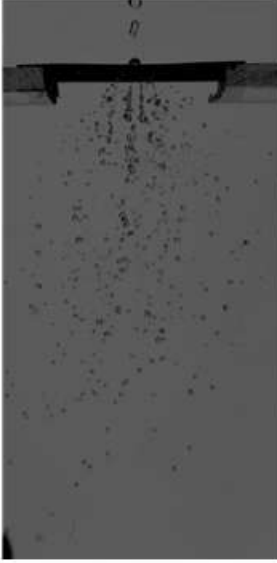
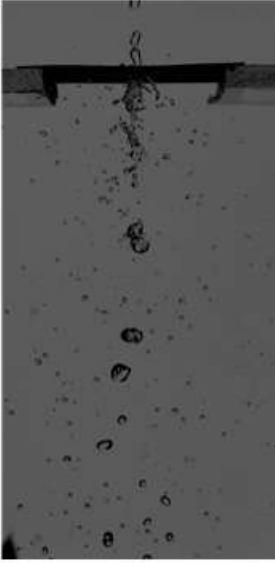
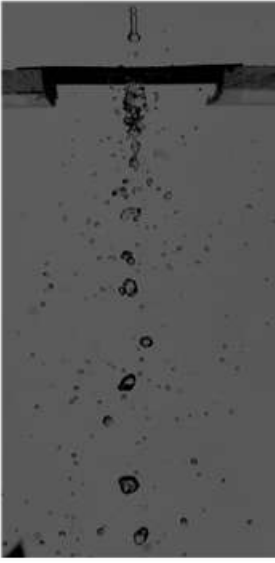
	$t = 37.5ms$	$t = 300ms$	$t = 750ms$
$H = 200mm$			
	Regime A	Regime A→B	Regime B→C
$H = 100mm$			
	Regime A	Regime B→C	Regime C

Figure 6. Regime transition according to droplet impact velocity 1.98, 1.4m/s, under mesh size 0.5mm($\beta = 18$) and syringe pump compress rate 130mm/min.

이유는, 유체 사이의 인력 대비 운동에너지가 커서 분할이 활발하게 이루어지기 때문이다. 메쉬의 잔여 유량 축적이 더 느리게 일어나기 때문이다. 이처럼 유체 사이의 인력 대비 운동에너지 값은 메쉬의 잔여 유체 축적 속도에 영향을 미쳐 regime transition 시점을 결정하는 요소로 작용한다.

4-4. Size distribution depending on regimes and droplet/mesh size ratio

Figure 7는 위에서 관찰한 실험 조건인 액적의 충돌 속도 1.98m/s, 시린지펌프 유량 130mm/min로 고정하고 메쉬 격자 크기를 1.5mm, 1.0mm, 0.5mm로 변화시키며 액적의 크기 분포를 단계별로 나타낸 것이다. 분산 전 액적의 크기 대비 분산 후 액적의 크기(A^*)를 히스토그램으로 나타내고, 가우시안 커널밀도추정(KDE, Kernel Density Estimation)을 이용해 연속확률분포로 근사한 것이다. 각 regime 별로 특정 시간 구간(구간 길이: 200ms)을 설정하고 통계량을 도출했다.

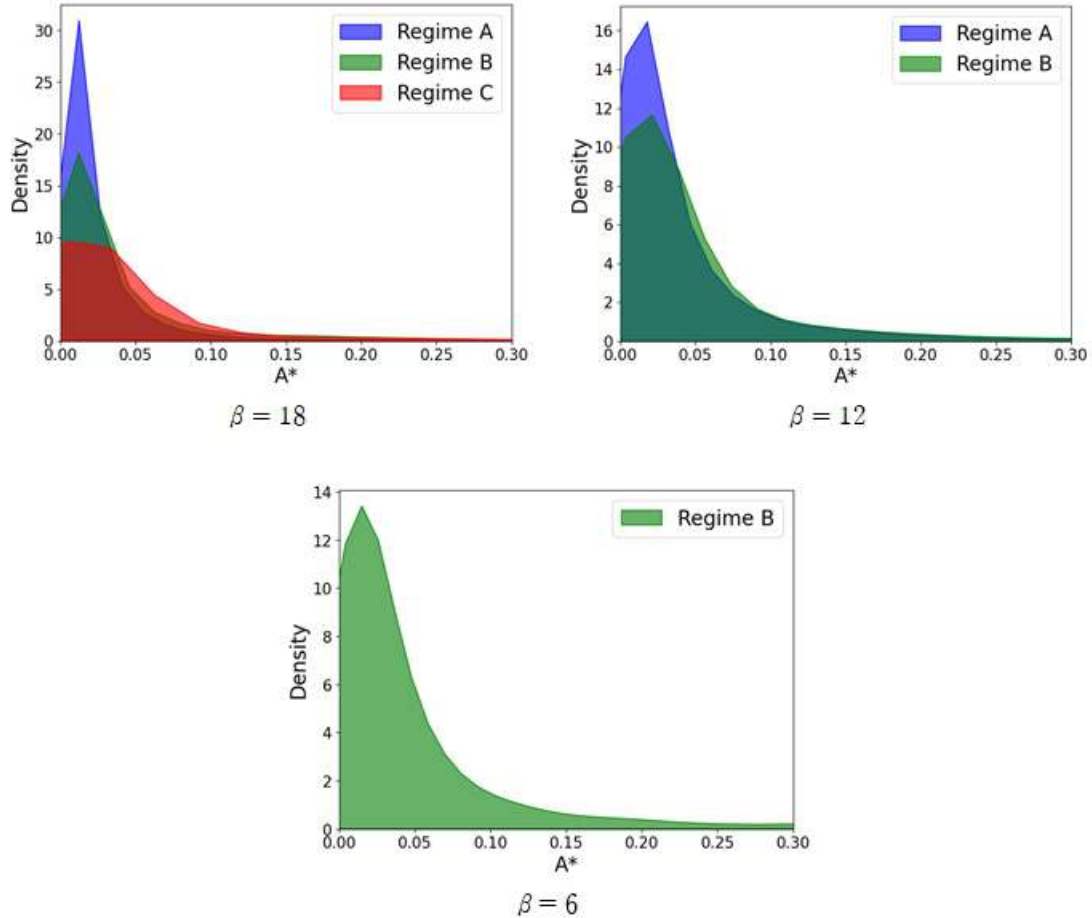


Figure 7. Size distribution of droplets for each phase according to $\beta = 6, 12, 18$, under impact velocity 1.98m/s and syringe pump compress rate 130mm/min.

β = droplet diameter/mesh grid size, A^* = droplet diameter before impact/droplet diameter after impact.

각 단계별로 액적의 크기 확률밀도함수를 관찰하면, A단계에서는 기존 액적 지름의 5% 이하의 액적들이 대부분의 분포를 이루고 있다. B단계로 변화하면서 기존의 5% 이하의 액적 분포가 감소한만큼 기존의 5~10%의 액적 분포가 증가하고, 분포의 꼬리도 두꺼워진 것을 관찰할 수 있다. C단계가 되어서는 확률밀도함수가 크기에 따라 감소하는 양상을 유지하기는 하지만, 기존의 5% 이하의 액적 분포는 급격히 감소하고 분포의 꼬리가 더욱 두꺼워진 것을 확인할 수 있다. 이러한 분포의 특징들은 단계를 구분한 조건들과도 직관적으로 잘 부합한다. 한편, $\beta = 18$ 와 $\beta = 12$ 의 A단계와 B단계를 비교하면 $\beta = 18$ 의 경우 확률밀도가 최대가 되는 액적의 크기가 작고, 그 최댓값도 더 크며 분포 형태도 더 뾰족한 것을 관

찰할 수 있는데, 이는 β 가 클수록 더 작고 균일한 액적으로 분산된다는 사실을 통계적으로도 입증한다.

4-5. Dispersion angle-size joint distribution depending on regimes

Figure 8은 위에서 관찰한 실험 조건인 액적의 충돌 속도 1.98m/s, 시린지펌프 유량 130mm/min, 메쉬 격자 크기를 0.5mm로 고정하고 액적의 크기와 분사 각도에 대한 이변수 결합확률분포를 단계별로 나타낸 것이다. 4-4에서처럼 분산 전 액적의 크기 대비 분산 후 액적의 크기(A^*)와 분산 각도를 히스토그램으로 나타내고, 가우시안 커널밀도추정(KDE, Kernel Density Estimation)을 이용해 연속확률분포로 근사한 것이다. 각 regime 별로 특정 시간 구간(구간 길이: 200ms)을 설정하고 통계량을 도출했다.

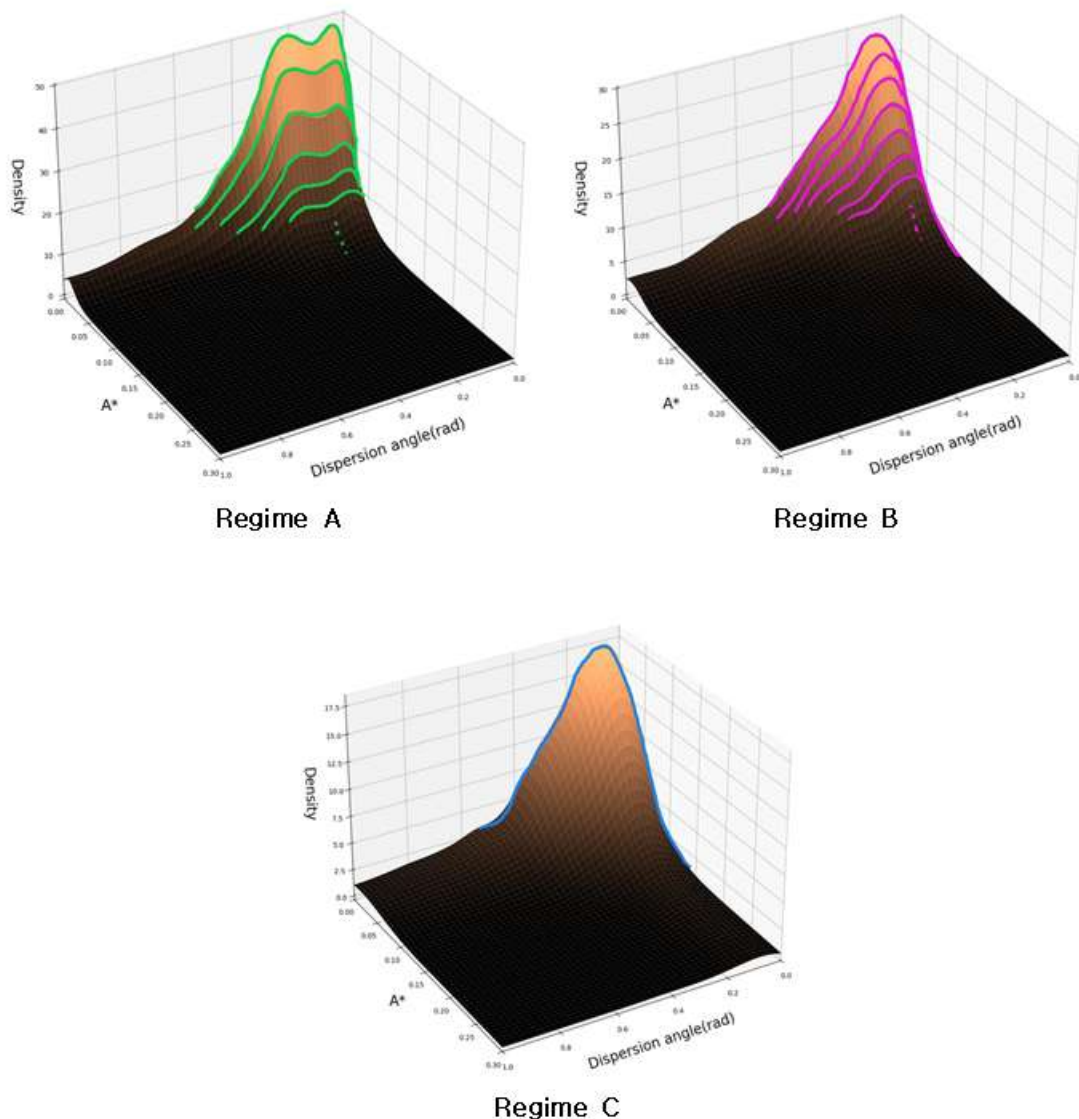


Figure 8. Dispersion angle-size distribution of droplets for each phase, under $\beta = 18$, droplet release height 200mm, and syringe pump compress rate 130mm/min. A^* =droplet diameter before impact/droplet diameter after impact.,

Figure 8을 분산 각도 축 방향으로 적분하면 단일 변수에 대한 주변확률분포인 Figure 7을 얻게 된다. 4-4에서 관찰했듯, A단계의 액적들은 작은 크기에 집중적으로 분포하며, 분산각도에 평행한 평면의 단면을 관찰했을 때 큰 분산각도까지 넓게 분포해있는 것을 관찰할 수 있다. Figure 8 Regime A 그래프의 녹색 선을 살펴보면, 액적의 크기가 증가함에 따라 분포 자체의 크기는 급격히 감소하지만, 큰 분산각도까지 넓게 분포해 있는 이러한 양상은 액적의 크기가 증가해도 유지된다. 반면, Figure 8 Regime B 그래프의 자주색 선을 살펴보면, B단계의 액적들은 작은 크기에서는 큰 분산각도까지 넓게 분포해있지만, 액적의 크기가 증가함에 따라 분산각도 분포가 급격히 좁아진다. 이는 B단계의 큰 액적들은 잔여 유체 ligament의 분할로 생긴 경우가 많아 수평 방향 속력이 저지되고 분산 각도가 작기 때문이다. C단계에서는 중심축을 따라 두꺼운 유체 기둥이 생기며, 특히 액적의 크기가 클수록 중심 분포가 크기 때문에 Figure 8 Regime C 그래프의 청색 선과 같이 각 xz 평면, yz 평면에 밀착된 분포가 나타난다. 따라서 이해를 돕기 위해 이변수 결합확률분포의 모양을 간략히 설명하자면, A단계는 끝이 좁아지는 미끄럼틀 형태, B단계는 비스듬히 잘린 삼각기둥 형태, C단계는 측면이 오목하게 패인 봉우리 형태가 된다.

5. Conclusion and Future Works

액적 군집이 메쉬의 같은 위치에 반복적으로 충돌하는 과정에서 메쉬의 젖은 정도가 변화하기 때문에 액적의 분산 양상도 변화한다. 메쉬에 잔여 유체가 없이 건조 상태일 때는 액적과 메쉬 사이의 인력만이 액적의 분산에 영향을 주지만, 잔여 유체가 남아 있는 경우는 충돌하는 액적과 남아 있는 유체 사이의 인력이 함께 작용하며 기둥 형태로 분출되는 ligament가 나타난다. 잔여 유체가 메쉬를 감쌀 정도로 지배적이게 되면 메쉬에 의해 분할되는 수평방향 속력은 잔여 유체에 의한 인력으로 소멸하고, 낙하 축 연장선으로 굽은 유체 기둥이 생기게 된다. 이에 따라 A, B, C 세 단계로 regime을 구분할 수 있음을 보였다. 또한, 메쉬 크기 대비 액적 크기 값(β)과 액적의 충돌 속력에 따라 regime transition 및 속도가 다름을 보였고, 메쉬 잔여 유량이 주요 요소임을 실험적으로 밝혀냈다. 또한, 액적의 크기 분포 및 분산 각도-크기 결합 분포가 각 regime마다 고유한 형태로 나타남을 확인했고, 각 regime의 특성을 통계적으로 분석하는 방법을 제시했다. 본 연구의 의의는 실제 산업 현장에서 발생하는, 메쉬를 순차적으로 통과하는 단일 액적에서 군집으로 확장한 점이다.

추후 연구의 진행 방향으로는 액적의 최대 연장 길이(maximum spread length)를 측정하여 액적의 관성력 대비 표면장력이 ligament 분할에 미치는 영향을 규명하는 것을 목표로 확장할 수 있다. 또한, 본 연구의 한계점으로는 액적의 방출 간격(release rate)을 균일하게 통제하지 못했는데, 이를 정교하게 통제한다면 보다 의미있는 결과를 도출할 수 있을 것이다. 다른 방향으로서는, 메쉬의 소수성(액적이 메쉬와 이루는 접촉각도)을 변수로 하여 단일 액적이 아닌 군집 액적을 통과시킬 때 regime 변화 양상을 관찰하는 연구를 제안할 수 있다.

References

- Xu, L., et al. (2021). "Droplet impact on a prewetted mesh." *Physical Review Fluids* 6.10: L101602.
- Catsoulis, S., et al. (2023). "Droplet impact on a wettability-patterned woven mesh." *Droplet*. e53.
- Kooji, S., et al. (2019). "Sprays from droplets impacting a mesh." *Journal of Fluid Mechanics* 871., 489-509.
- Liao, H., et al. (2022). "Numerical studies of a liquid droplet impacting on single-layer hydrophilic and hydrophobic wire meshes." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 61.20. 7154-7162.
- Ryu, S., et al. (2017). "Water penetration through a superhydrophobic mesh during a drop impact." *Physical review letters* 118.1. 014501.
- Soto, D., et al. (2018). "Droplet fragmentation using a mesh." *Physical review fluids* 3.8. 083602.
- Su, M., et al. (2020). "Dispersion behaviors of droplet impacting on wire mesh and process intensification by surface micro/nano-structure." *Chemical Engineering Science* 219. 115593.
- Tang, Y., et al. (2019). "Impact phenomena of liquid droplet passing through stainless steel wire mesh units." *Chemical Engineering Science* 198. 144-154.
- Vontas, K., et al. (2020). "Droplet impact on suspended metallic meshes: Effects of wettability, Reynolds and Weber numbers." *Fluids* 5.2. 81.
- Wang, G., Gao, J., & Luo, K. (2020). "Droplet impacting a superhydrophobic mesh array: Effect of liquid properties." *Physical Review Fluids* 5.12. 123605.
- Xu, L., et al. (2021). "Droplet impact on a prewetted mesh." *Physical Review Fluids* 6.10. L101602.
- Zhang, J., et al. (2019). "Enhancing liquid droplet breakup by hydrophobic wire mesh: Visual study and application in a rotating packed bed." *Chemical Engineering Science* 209. 115180.