

환상분무유동 국소 액적 변수 측정을 위한 2중 광섬유 센서 측정 기법 개발

김태호* · 문정민* · 윤병조*†

Development of a Double Sensor Optical Fiber Probe Method for the Measurement of Local Droplet Parameters in Annular Mist Flow

Taeho Kim*, Jeongmin Moon*, Byongjo Yun*†

Key Words : Two-phase flow(2상유동); Annular mist flow(환상분무유동); Droplet(액적); Double sensor optical fiber probe(2중 광섬유 센서)

ABSTRACT

The liquid droplet which appears in the annular mist flow plays an important role in the interfacial heat and mass transfer processes under the two-phase flow because of its large surface area per unit volume. However, research is difficult by the limited number of instrument that can measure droplet parameters. In the present study, a double sensor optical fiber probe technique (2S-OFP) was developed for the measurement of local droplet parameters under annular mist flow. The optimal geometric design of the 2S-OFP for the droplet parameters was obtained by the Monte Carlo simulation, and the measurement performance of the sensor was quantified through two benchmark experiments conducted in an air-water annular mist flow. In the first benchmark experiment for dispersed droplet flow, the droplet velocity measured by the 2S-OFP showed a maximum error of $\pm 10\%$ compared to the LDV measured value. In the second benchmark experiment for the droplet flow appearing in the vicinity of liquid film, a new method was developed to discriminate the droplets from the liquid interface wave and liquid ligament by 2S-OFP. In this case, the error range of the measured droplet velocity measured by 2S-OFP was between -20% and 35% of the visualization technique.

1. 서 론

환상분무유동은 고속의 기체 유동 조건에서 발생하는 2상 유동 양식으로, 액적을 동반한 기체 유동과 액막 유동이 유로 중심부와 유로 벽면에 발생한다. 이때, 기체와 액막 간의 마찰에 의해 발생하는 액적은 유로 내에서 다양한 크기와 속도 분포를 가지며, 액막과 비교하여 질량 유량은 작으나 2상 유동 혼합물의 단위 부피에 대한 표면적 비인 상경계면밀도 (interfacial area concentration)가 커 상간의 질량, 운동량, 그리고 에너지 교환이 활발하게 일어난다⁽¹⁾. 이러한 환상분무유동은 상변화를 동반하는 열교환기⁽²⁻³⁾, 가압경수로형 원전의 대형냉각재 상실사고시 노심 내부와 강수부⁽⁴⁻⁵⁾, 그

리고 정상 운전 중인 비등경수로형 원전의 노심 상부 등에서 발생된다. 특히 비등경수로형 원전의 정상운전 과정에서 발생하는 환상분무유동은 노심내 핵연료의 건조(dry-out) 발생을 피하기 위한 운전조건 결정 과정에서 중요하다⁽⁶⁻⁷⁾.

환상분무유동에서 발생하는 액적 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 액적인자 모델과 이를 개발하기 위한 실험데이터의 확보가 필수적이다. 선행연구자들은 액적인자 실험데이터를 생산하기 위해 다양한 유로 크기와 작동 유체 조건에서 액막과 액적 유량, 액막 평균 두께와 속도, 액적 크기 그리고 액적 점착량과 이탈량을 측정하는 실험 연구들을 수행하였다⁽⁸⁻¹¹⁾. 대부분의 선행 연구에서 액적 변수들은 고속 카메라를 이용한 가시화 기법과 레이저 빔을 이용한 Laser

* 부산대학교 기계공학부 원자력시스템전공(Pusan National University, School of Mechanical Engineering, Nuclear Systems Major)

† 교신저자, E-mail : bjjun@pusan.ac.kr

diffraction과 LDV(Laser Doppler velocimetry) 기법으로 측정되었다⁽¹²⁻¹⁶⁾. 그러나, 광학적인 측정 기법은 유로 벽면에서 발생하는 액막에 의한 광학적 간섭을 피하기 위해 액막의 제거가 필요하고 측정이 가능한 유동 범위도 제한된다⁽¹⁷⁾. 또한, 액막 제거 과정에서 액적이 동시에 제거되는 문제가 발생할 수 있으므로 액적 분율이 크고 다양한 액적 크기를 가지는 액막 근처에서 액적인자 측정 시 불확실성이 증가한다⁽¹⁸⁾.

액적 변수를 측정하는 다른 측정기법으로 전도도 센서와 광섬유 센서 같은 삽입식 탐침형 센서가 있다. 전도도 센서는 액적이 양극 탐침과 음극 탐침을 동시에 통과할 때 발생하는 전기 신호 변화를 감지하여 액적인자를 측정하는 것으로, 측 방향으로 배열된 다중 양극 탐침들을 액적이 통과할 때 발생하는 시간차를 측정하여 액적 계면 속도를 측정한다⁽¹⁹⁾. 광섬유 센서는 광원에서 발생한 빛이 광섬유 코어를 통해 감지부로 전달되며, 이때, 감지부가 노출된 매질의 굴절률 차이에 따라 반사되어 돌아오는 빛의 양이 달라지는 특징을 이용하여 액적인자를 측정한다⁽²⁰⁾.

광섬유 센서를 이용한 액적 측정 방법은 센서를 구성하는 광섬유의 수에 따라 단일 광섬유 센서와 다중 광섬유 센서로 구분되며, 각각은 액적 속도를 측정하는 방법에 차이가 있다. 단일 광섬유 센서는 기포 또는 액적의 계면이 광섬유 센서와 접촉할 때 발생하는 신호 세기 변화율이 계면 속도에 따라 변하는 특징이 있으므로⁽²¹⁾, 계면 속도에 따른 센서 신호 교정 실험을 통해 두 변수의 관계식을 얻고 이를 이용하여 계면 속도를 측정한다⁽²²⁾. 다중 광섬유 센서는 전방 센서와 후방 센서에 액적이 접촉하는 시점 차이를 측정하여 센서 사이를 이동하는 액적 속도를 측정한다. 센서의 액적 속도 측정 정확도가 액적 속도와 액적 크기 조건에 의해 영향을 받는 단일 광섬유 센서 기법에 비해, 다중 센서 기법은 액적인자에 의한 영향이 작고 센서의 기하학적 배치에 따라 측정 정확도가 개선되는 장점이 있다. Khalid와 Yun⁽²³⁾은 2중 광섬유 센서를 이용하여 2x2번들 구조물이 설치된 시험유로에서 환상분무유동 조건 액적 변수 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 다양한 액적 변수들의 국소 분포와 단면적 분포를 측정하였으나, 번들 벽면에 형성된 액막 근처 영역에서 액적과 액체 줄기(ligament)를 구분하여 측정하지 않았다.

본 연구에서는 다양한 액적 크기가 분포하고 있는 환상분무유동 조건에서 2중 광섬유 센서 기법을 적용하여 액적 실험 데이터를 측정하는 방법론을 개발하고 평가하였다. 이를 위해 1) Monte Carlo 수치해석 방식에 기반한 환상분무유동 조건 액적 측정에 최적화된 센서 설계안을 도출하고, 액적-공기 유동 조건에서 2) 액적인자를 측정하는 벤치마크 실험을 수행해 센서의 액적인자 측정 성능을 평가하며, 3) 액막 근처 영역에서 액체 줄기와 액적 신호를 구분하여 액적을 측정하는 방법론을 개발하였다.

2. 2중 광섬유 센서 액적인자 측정 기술 개발

2.1 광섬유 센서의 작동 원리

국소 광섬유 센서는 2상유동 내에서 각 상의 굴절률 차이에 따라 광섬유 센서 끝단에서 되돌아오는 광량의 차이가 발생한다. 광섬유 센서 끝단에서 반사된 빛은 광전자 증배관을 거쳐 전기적인 신호로 바뀌며 전기 신호 세기의 차이를 이용해 물과 공기의 계면을 인식할 수 있다. 즉, Fig. 1과 같이 광섬유 센서가 공기에 노출된 경우 전반사되는 빛의 양이 많으나 물에 노출된 경우 상대적으로 전반사되는 빛의 양이 작다. 따라서, 센서가 공기중에 노출된 상태에서 전기 신호 세기가 높게 측정된다. 이러한 특징을 가지는 광섬유 센서가 공기중에서 액적을 측정할 때 측정되는 신호는 Fig. 2와 같다. Kim과 Yun⁽²⁴⁾는 광섬유 센서 측정 신호의 시간에 대한 2차 미분 신호의 국소 최솟값과 최댓값에 기반하여 상 경계면이 센서를 통과할 때 발생하는 신호의 급변 지점을 검출하는 알고리즘을 개발하였다.

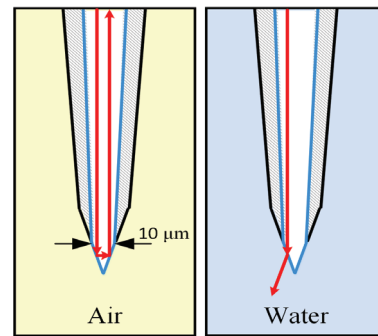


Fig. 1 Characteristics of laser refraction at the tip of OFP sensor depending on the medium

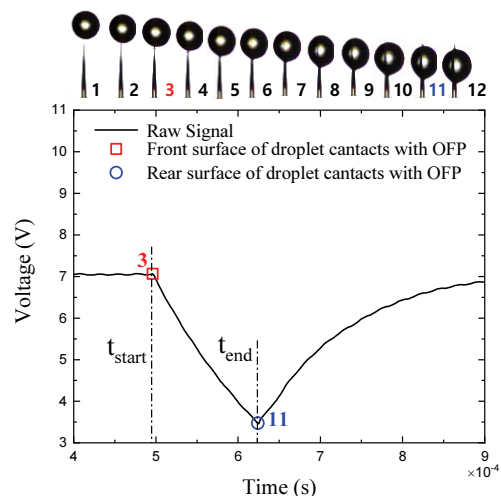


Fig. 2 Electrical output signal of OFP sensor for a droplet (Kim and Yun⁽²⁴⁾)

2.2 액적 변수 측정 방법론

액적을 동반한 2상유동에서 액적 분율은 액적인자 거동에 직접적으로 영향을 미치는 가장 중요한 변수이다. 국소 액적 분율은 총 샘플링 시간에 대한 액적이 센서를 적시는 총 시간의 비율로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha_d = \frac{\sum_{i=1}^N TRIANGLE_{wet,i}}{T} \quad (1)$$

상기 수식에서 Δt_{wet} 은 Fig. 3의 전단 센서에서 측정되는 액적이 센서를 적시는 시간이고 T 는 총 데이터 수집 시간이다. Kim과 Yun⁽²⁴⁾는 정상상태 유동 조건에서 국소 지점에서 통계적으로 신뢰할 수 있는 액적 분율을 측정하는데 필요한 데이터 측정 시간 T 를 결정하기 위해 다양한 액적 크기와 속도 조건에서 벤치마크 실험을 수행하여, 500개 이상의 액적이 측정될 때 $\pm 3\%$ 오차범위에서 시간 평균 분율 값이 수렴하는 것을 보고하였다.

액적이 2중 광섬유 센서의 전단 센서와 후단 센서를 순차적으로 통과할 때, Fig. 4에서와같이 액적신호 시작 지점 사이에 시간 지연(Δt_{delay})이 발생한다. 이때, 전단부 센서와 후단부 센서 사이의 축 방향 거리(s)를 지연 시간으로 나누면 다음과 같이 액적 속도를 얻을 수 있다.

$$v_{d,2s} = \frac{s}{\Delta t_{delay}} \quad (2)$$

액적 속도와 전방 센서의 액적 체류시간을 곱하면 센서가 액적을 통과하는 거리인 액적 현의 길이가 되며, 이로부터 총 샘플 수집 시간 동안 센서를 통과하는 액적들에 대해 현의 길이 분포를 얻을 수 있다. 이때, 액적 형상이 구형이고 센서가 액적 단면적의 모든 지점을 동일한 확률로 통과한다고 가정하면, 임의의 액적 크기(D)에 대한 현의 길이 L 의 측정 확률은 다음 식과 같다⁽²⁵⁾.

$$f(L) = 2L/D^2 \quad (3)$$

액적 현의 길이 분포 함수 $G(L)$ 과 액적 직경의 분포 함수 $H(D)$ 는 Uga⁽²⁵⁾에 의하여 정의된 변환행렬 A 를 통해 다음과 같이 서로 변환될 수 있다.

$$G(L) = AH(D) \quad (4)$$

이때, 변환행렬은 식 (3)으로 구해진 현의 길이 측정 확률 분포 함수로 구성된다. 현의 길이 분포함수로부터 액적 직경

의 분포함수를 계산하기 위해 정방행렬이 아닌 변환행렬의 역행렬을 구해야 한다. 이때, 직경 분포함수는 음의 값을 가질 수 없으므로 Lawson⁽²⁶⁾이 개발한 비음수 최소제곱법을 적용한다⁽²⁷⁾. Fig. 5는 현의 길이 분포함수를 직경 분포함수로 변환한 결과로, Sauter 평균 직경(D_{32}), 산술 평균 직경(D_{10}) 등 다양하게 정의되는 액적의 직경을 구할 수 있다⁽²⁸⁾.

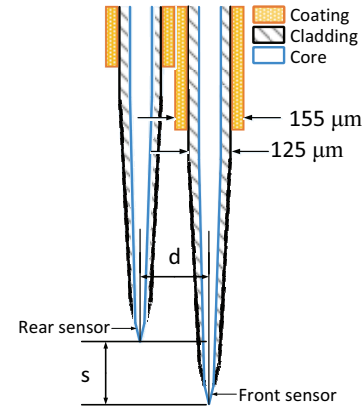


Fig. 3 Schematic diagram of double sensor optical fiber probe

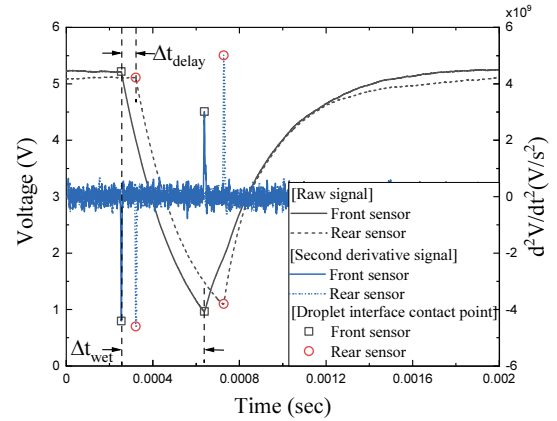


Fig. 4 Raw and second derivative of double OFF sensor signal for a droplet

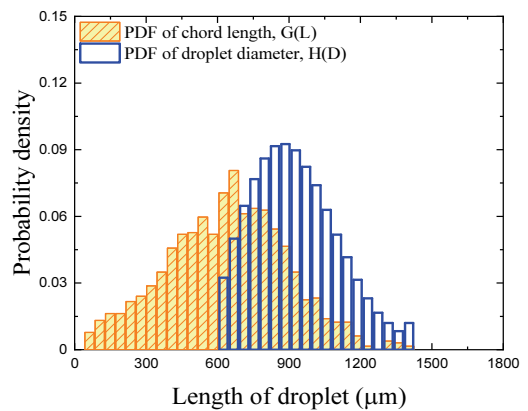


Fig. 5 Conversion of chord length distribution to the droplet size distribution

2.3 2중 광섬유 센서 최적 형상 도출

선행 연구자들은 2중 센서를 기포류 유동 조건에서 적용하여 국소 기포 인자를 측정하기 위해 Monte Carlo 수치해석 기법을 사용하여 센서의 기하학적 배치 구조와 기포의 유동에 따른 기포 측정 민감도 분석을 수행하였다⁽²⁹⁻³¹⁾. 본 연구에서도 환상분무유동 조건에서 액적 측정에 최적화된 2중 광섬유 센서 설계안을 도출하기 위해 Monte Carlo 수치해석을 수행하였다.

난류 유동으로 인해 좌우로 흔들리며 이동하는 액적을 모의하기 위해 액적 섭동을 고려한 속도는 다음과 같이 정의된다³⁰.

$$\vec{V}_d = \vec{V}_d \vec{k} + \vec{V}_d' = \vec{V}(\vec{k} + H\vec{n}_v) \quad (5)$$

액적 입자에 대한 속도와 섭동은 Fig. 6에 표기되어 있으며, 상기 수식에 사용된 H 와 \vec{n}_v 는 상대적인 입자 섭동 크기와 섭동 방향을 나타내며 다음 수식과 같이 정의된다.

$$H = |\vec{V}'|/|\vec{V}| \quad (6)$$

$$\vec{n}_v = \sin\zeta\cos\phi\vec{i} + \sin\zeta\sin\phi\vec{j} + \cos\zeta\vec{k} \quad (7)$$

환상분무유동에서는 고속의 기체 유동으로 인해 종횡비 (β)가 1인 구형 액적이 발생되며, 이때, 액적의 상대 속도 섭동(H)은 0.25 이하의 값을 가진다⁽³²⁾. 다중 탐침형 국소 2상 유동 센서를 대상으로 한 Moon과 Yun⁽³³⁾의 입자 거동 연구 결과에 따르면, 해당 구간에서 입자 속도 측정 정확도는 H 에 영향을 받지 않으며, 입자 크기에 대한 센서의 기하학적 배치 구조인 센서간의 횡 방향 간격비(d/D_{30})와 입자 크기 대비 센서 감 지부 간의 축 방향 거리비(s/D_{30})에 영향을 받는다.

Fig. 7에서 Fig. 9는 구형 형상의 입자 조건에서 입자 크기 대비 센서 감지부 거리에 따른 액적 측정성능을 평가한 Monte Carlo 시뮬레이션 결과들이다. 고속의 기체 유동이 발생하는 환상분무유동 조건에서 액적 상대 섭동이 속도 측정 정확도에 미치는 영향은 무시할 수 있으므로 0으로 가정하였다. s/D_{30} 가 0.1보다 작은 경우 입자의 계면 곡률 효과로 인해 속도 측정 정확도가 저하된다⁽³³⁾. s/D_{30} 가 0.1보다 큰 경우, 센서의 축 방향 간격이 입자 속도 측정에 미치는 영향을 무시할 수 있으며, d/D_{30} 는 센서의 속도 측정성능에 영향을 미치지 않는다. 그러나, Fig. 9와 같이 전방 센서에서 측정되는 전체 입자 수(N_{total}) 중 속도 측정에 이용되는 전후방 센서를 동시에 통과하는 유효 입자 수(N_{eff})의 비율은 d/D_{30} 가 증가함에 따라 급격히 감소한다.

본 해석 결과는 정밀한 액적인자 측정을 위해서 2중 센서를 구성하는 센서 사이의 축 방향 거리가 측정하고자 하는

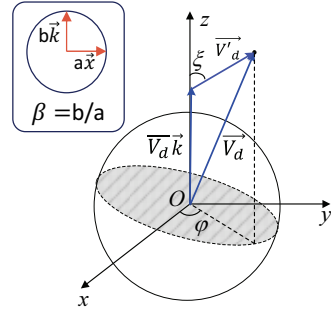


Fig. 6 Modeling of droplet velocity fluctuation

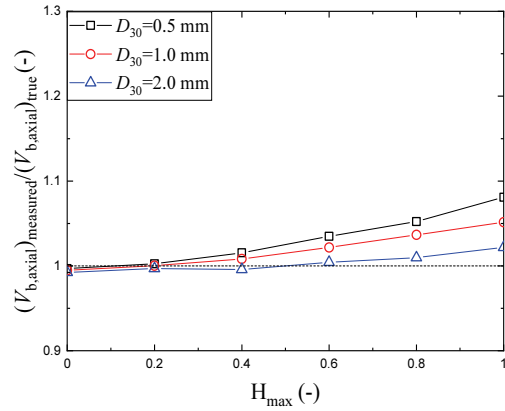


Fig. 7 Velocity fluctuation effect on the droplet axial velocity

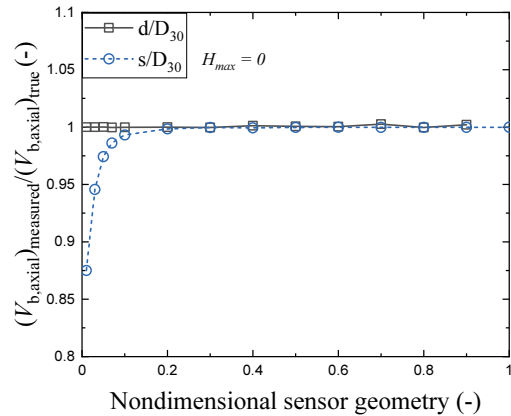


Fig. 8 Probe geometry effect on the droplet axial velocity

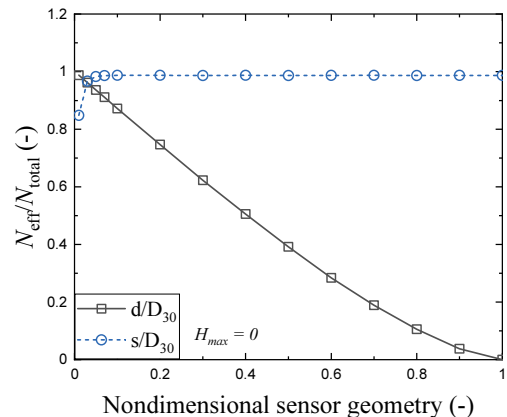


Fig. 9 Effective droplet passing ratio according to probe geometry

입자 크기의 0.1배 이상이 되어야 하고, 센서 중심축 사이의 횡방향 거리는 최소화되어야 하는 것을 보여준다. 저압의 물-공기 환상분무유동 조건에서 예상되는 액적 최대 크기는 2 mm로, 센서의 설계 변수인 s 는 0.2 mm보다 크게 제작되어야 한다. 횡방향 거리 d 는 직경이 가장 작은 광섬유의 직경인 155 μm 에 해당되며, 제작된 2중 광섬유 센서로 속도를 측정할 수 있는 최소 액적 크기는 155 μm 로 제한된다.

3. 2중 광섬유 센서 성능평가 실험

수치해석에 기반한 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용한 센서 성능평가는 실제 유동 환경에서 발생하는 액적의 직경 및 난류 유동 분포를 고려하지 못하는 한계를 갖는다. 따라서 환상분무유동이 발생하는 유로 중심부의 액적유동과, 액적과 액체줄기가 발생하는 액막 근처 유동을 모의한 조건에서 2중 광섬유 센서 액적 측정성능을 평가하는 실험연구를 수행하였다. 실험에 사용된 2중 광섬유 센서는 수치해석을 통해 도출한 최적 설계에 따라 센서간 축 방향 간격 230 μm 횡 방향 간격 155 μm 로 제작되었다.

3.1 액적 크기 및 속도 측정 성능평가

첫번째 벤치마크 실험은 환상분무유동 중심부에서 발생하는 액적을 동반한 연속 기체 유동 조건에서 센서의 액적인자 측정성능을 평가하였다. 실험이 수행되는 대기압의 액적-기체 유동 조건에서는 크기가 1 mm 이하로 작고 속도가 빠른 액적 유동이 발생된다.

3.1.1 실험장치

본 실험은 출구가 대기 중에 노출된 사각유로 내부에서 고속의 기체가 하향류 유동을 형성할 때 동반되는 액적인자를 LDV, 고속카메라 그리고 2중 광섬유 센서로 측정하고 상호 비교하기 위한 것이다. 실험 장치는 Fig. 10과 같이 사각형

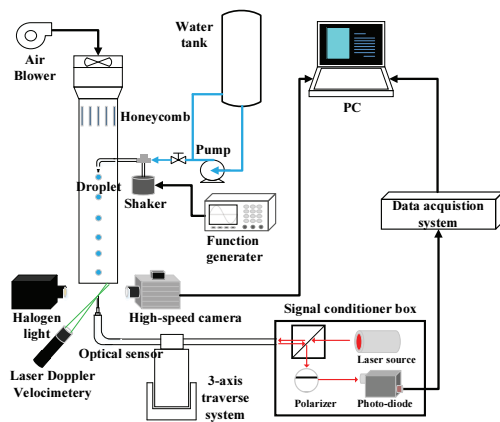


Fig. 10 Experimental for the for the droplet parameters

시험부, 기체 공급 장치 그리고 송풍기와 액적 발생 시스템으로 구성되었다. 시험부는 가로 40 mm 세로 20 mm 높이 400 mm인 투명 아크릴로 제작되었다. 실험에서 유로 내의 액적은 고주파로 진동하는 액체 주입 노즐을 사용하여 일정한 크기로 발생시키며 액적은 송풍기로부터 시험유로에 유입되는 고속의 공기 유동에 의해 목표 속도까지 가속된다. 2중 광섬유센서는 액적 발생장치로부터 300 mm 떨어진 실험장치 유로 하부의 개방된 출구에서 상부 방향으로 향하게 설치되었고, 센서에서 측정되는 액적 속도는 전방센서 상류 지점에 위치한 1차원 LDV(Dantec Dynamics)로 측정되는 액적속도를 기준으로 평가된다. 실험에 사용된 LDV 시스템의 입자 속도 측정 오차는 측정값의 0.07%이다. 2중 광섬유 센서로 측정되는 액적 직경은 고속 카메라로(Phantom, Miro M310) 촬영한 영상에서 얻은 직경과 비교 분석된다. 이때, 카메라는 초당 160,000 프레임 속도로 액적 이동 영상을 촬영하며, 105 mm 초점거리를 갖는 렌즈와 확장튜브(Extension tube)를 장착함으로써 촬영된 영상의 해상도는 16 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 이다. 2중 광섬유 센서 전압 신호는 16비트 분해능의 고속 아날로그-디지털 변환기(NI PXIe-6124)에 의해 2 MHz 샘플링 주파수로 수집되었다.

3.1.2 실험결과

실험은 액적 속도 2 m/s에서 35 m/s 범위, 액적 직경 0.3 mm에서 0.8 mm 범위에서 수행되었다. 2중 광섬유 센서에서 측정되는 국소 액적 속도는 샘플 수집시간 동안 측정된 데이터를 평균하여 도출하고, 액적 직경은 2.2절에서 소개된 액적 직경 측정법을 적용하여 측정한다. 2중 광섬유 센서의 측정 불확도를 보다 정확하게 정량화하기 위해 다음의 Root Mean Square Error(RMSE)와 Mean Absolute Percent Error(MAPE) 지수가 사용되었다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{probe,i} - x_{ref,i})^2} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_{probe,i} - x_{ref,i}}{x_{ref,i}} \right| [\%] \quad (9)$$

Fig. 11은 실험에서 LDV 측정 값과 2중 광섬유 센서에서 측정된 액적 속도를 비교한 것으로, 광섬유 센서에서 측정된 액적 속도의 최대 측정 오차의 범위는 $\pm 10\%$ 였고, RMSE와 MAPE 지수는 각각 1.15 m/s와 6.6%로 나타났다. 액적의 속도가 증가할수록 액적이 두 센서 사이를 이동하는 시간이 짧아지고 센서간 축 방향 거리(s)에 대한 액적 곡률이 속도 측정에 미치는 오차 영향이 증가하므로, 광섬유센서에서 측정된 액적 속도가 LDV 측정값보다 작은 경향을 보였다.

Fig. 12는 고속 카메라를 이용한 가시화 측정기법으로 측

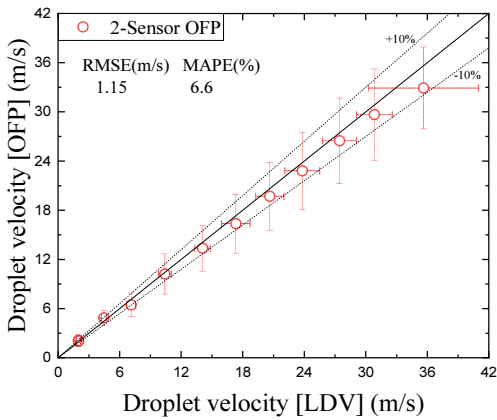


Fig. 11 Comparison of measured droplet velocity by 2S-OFP and LDV

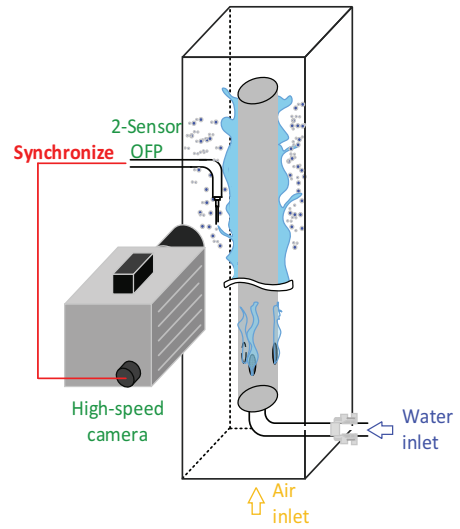


Fig. 13 Schematic diagram test facility for the second benchmark test

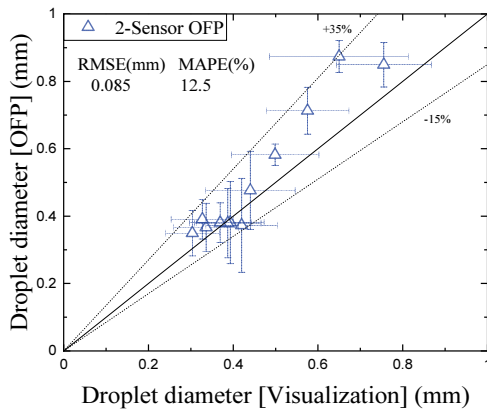


Fig. 12 Comparison of measured droplet diameter by 2S-OFP and visualization

정한 액적 직경과 광섬유 센서로 측정된 액적 직경을 비교한 것이다. 최대 측정 오차 범위는 -15%에서 +35%이며, 가시화 측정 결과 2중 광섬유 센서 측정값이 1σ (표준편차) 오차 범위 내에서 측정되었다. 실험에서 1σ 오차 범위를 만족하지 않는 실험 데이터들은 고속 촬영된 영상 분석 시 간헐적으로 발생 되는 크기가 작은 액적에 의한 것이다.

3.2 액막유동 근처 2중 광섬유 센서 액적 측정 성능 평가

두번째 벤치마크 실험은 환상분무유동 조건에서 유로 벽면에서 발생하는 액막에서 액적과 액체 줄기가 생성될 때, 2중 광섬유 센서의 액적변수 측정성능을 평가하였다. 이때, 액체상은 액적, 액체줄기, 파도 형태로 나타나 광섬유 센서에서 측정된다.

3.2.1 실험장치

실험 장치 시험부는 Fig. 13과 같이 한 변의 길이가 25 mm인 정사각형 투명 아크릴로 제작되었으며, 유로 중심에

는 물 주입 및 물막 형성을 위한 1/4" 다공성 튜브(porous tube)가 설치되었다. 튜브 내부로 주입된 물은 다공성 튜브 벽면을 따라 유로로 유입되어 표면에 액막을 형성한다. 유로 하부에는 공기가 주입되며, 이때 액막 표면에서는 공기 유동에 의해 액체 파도가 형성되며, 액체 파도로부터 액체 줄기와 액적이 생성된다. 2중 광섬유 센서의 액체 줄기 그리고 액적인자의 평가를 위한 기준 액적인자 값은 고속 카메라로부터 측정되었다. 이를 위해 고속 카메라는 2중 광섬유 센서의 전방 센서에 액체상이 접촉할 때 발생하는 전기 신호의 발생 시점과 동기화되어 작동하며, 고속 카메라 해상도 및 촬영속도는 앞선 실험과 동일하다. 상 경계면 형상과 속도는 시험 유로 내 국소 위치에 따라 달라지므로, 광섬유 센서를 유로 횡방향으로 이동시키며 액막 주변의 국소지점에서 데이터를 수집하였다.

3.2.2 실험결과

환상분무유동 조건에서 파도 속도는 기체 속도의 9~12%로 알려져 있으며, 파도 계면에서 발생하는 유동 불안정으로 인해 액적이 생성되는 조건은 물-공기 유동 조건에서 기체 겉보기 속도 16 m/s 이상인 조건에 해당한다^(10,34). 실험에서 고속카메라로 측정된 파도 계면 속도는 0.8 m/s에서 3.5 m/s 범위였으며, 파도 계면 속도에 기반하여 계산된 기체 속도의 추정 범위는 6.6 m/s에서 38.9 m/s이다. 따라서, 실험에서 측정된 파도 속도가 형성되는 유동 조건에서는 Fig. 14(a)와 같이 액적이 생성되지 않는 잔잔한 파도와, Fig. 14(b)와 같은 액체 줄기와 액적이 생성되는 구름 파도(roll wave) 유동을 모두 포함한다.

Fig. 15는 가시화 기법과 2중 광섬유 센서로 측정된 액체 상 계면 속도를 비교한 것으로, 최대 측정 오차 범위는 액체

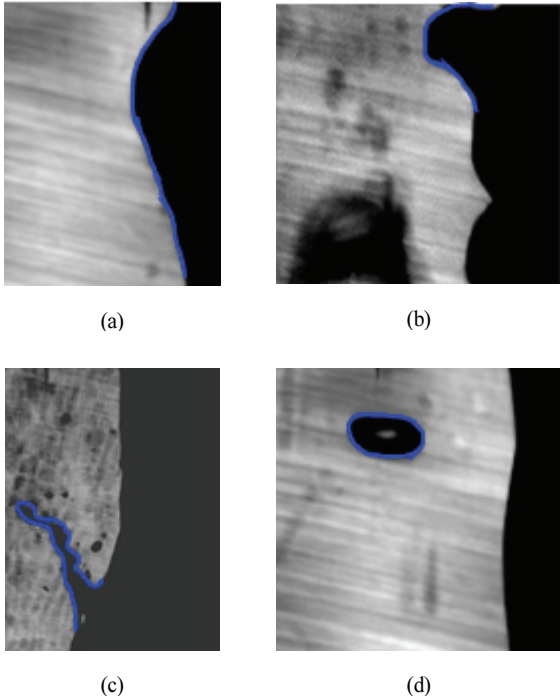
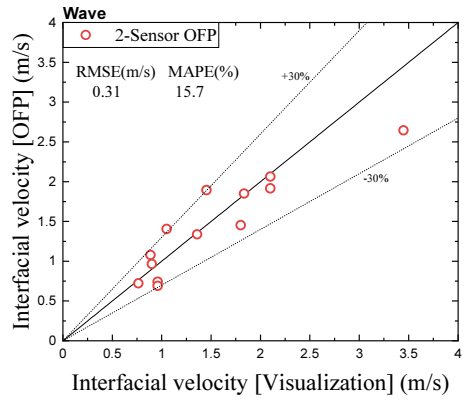


Fig. 14 The shape of liquid interface in the vicinity of liquid film (a) wave (b) roll wave (c) ligament (d) droplet

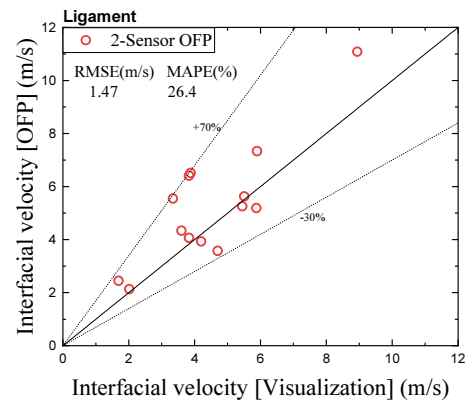
줄기에 대해 +70%에서 -30%로 크게 나타났다. 이는 파도에서 액체 줄기가 발생될 때 계면 형상이 불안정하여 변하고, Fig. 14(c)와 같이 액체 줄기 표면의 곡률이 파도나 액적과 비교해 크기 때문이다. 반면, 액막 근처 영역에서 2중 광섬유 센서 액적 측정 오차는 최대 +35%에서 -20% 범위로 나타났으며, *RMSE*와 *MAPE* 지수는 각각 1.7 m/s와 16.2%로 액체 줄기와 비교해 상대적으로 우수한 측정 성능을 보였다. 본 실험은 단일 액체 계면 측정에 대한 측정 성능평가로, 2.2 절에서 소개한 액적 직경 계산 방법을 적용할 수 없어 액적 직경 측정 정확도 평가는 이루어지지 않았다.

3.2.3 액막 근처 액적 신호 구분 방법

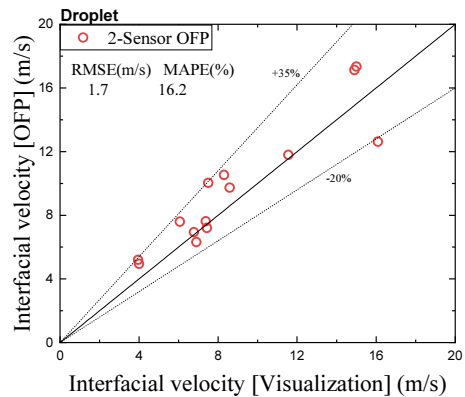
2중 광섬유 센서를 실제 환상분무유동 조건에 적용하는 경우 불규칙한 액막 경계면 형상에 의한 빛의 산란으로 유로 내부를 관찰할 수 없으므로, 센서에서 측정되는 변수에 기반하여 액적, 액체 줄기 그리고 파도를 구분할 수 있어야 한다. 실험에서 액체상 계면 속도를 고속 카메라로 측정한 결과 파도로부터 이탈되며 발생하는 액체 줄기와 액적은 파도 속도보다 큰 값을 보였다. 이는 Fig. 16에 나타낸 2중 광섬유 센서로 측정된 계면 속도에서도 확인되며, 그림에서와같이 약 3 m/s 이하 범위의 속도 측정값은 대부분 파도에 의한 것이다. 따라서 환상분무 유동에서 개발된 기존 파도 속도 모델을 경계값으로 적용하면, 2중 광섬유 센서 측정 결과 중 파도에 해당되는 액체상 계면 신호를 구별할 수 있다. 그러나, Fig. 16와 Fig. 17에서 액체 줄기는 2중 광섬유 센서에서 측



(a)



(b)



(c)

Fig. 15 Test result of the second benchmark test for the measurement performance of interfacial velocity

정된 계면 속도, 현의 길이, 액체상이 센서를 통과하는 시간을 이용하여 액적과 구분하는 것이 어렵다.

본 연구에서는 이를 구분하기 위해 각 액체상 경계면이 가지는 형상 특징을 고려하였다. 액체 줄기는 원심력과 국소적인 유동 불안정성으로 불규칙한 형상을 가진다. 따라서, 공기 유동장 내부에서 액적과 비교해 액체 줄기 양끝단에서 발생하는 동압 차이가 크게 작용하고 표면장력보다 운동량이

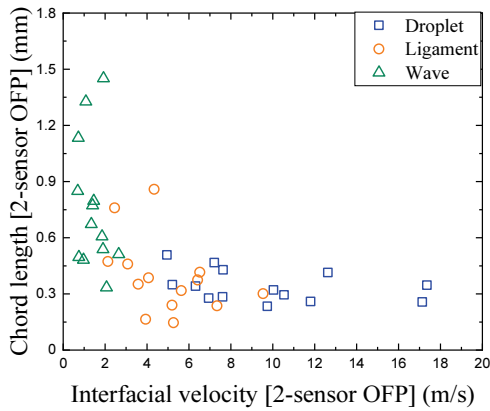


Fig. 16 Comparison of interfacial velocity of wave, ligament and droplet

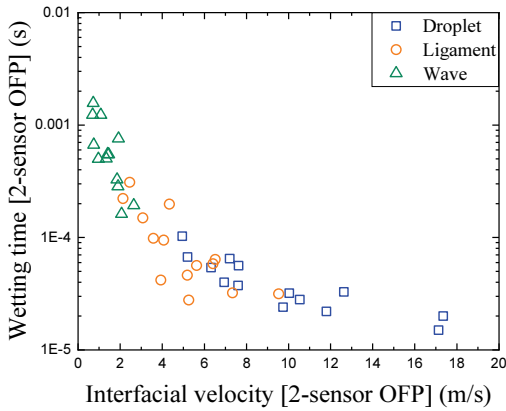


Fig. 17 Wetting time and interfacial velocity for wave, ligament and droplet

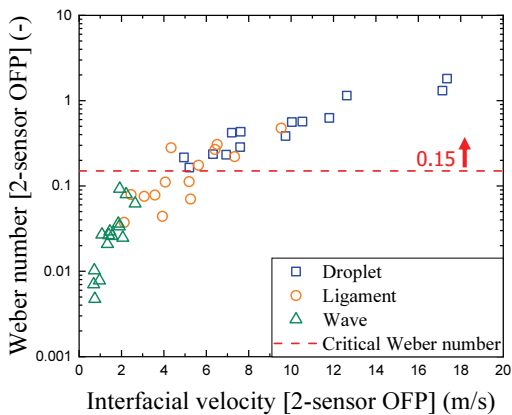


Fig. 18 *Weber* number and interfacial velocity for wave, ligament and droplet

커 액체 줄기는 액적으로 분해된다⁽³⁵⁾. 반면, 액적은 안정적인 표면 형상을 보이며 공기 유동에 의해 빠른 속도로 가속된다. 따라서, 액체 줄기와 액적은 표면 장력에 대한 관성력의 크기 비로 정의된 다음의 *Weber* 수를 기준으로 구분할 수 있다.

$$We = \frac{\rho_g v^2 L}{\sigma} \tag{10}$$

상기 수식에서 v 는 2중 광섬유 센서에서 측정된 액체상의 계면 속도, L 은 2중 광섬유 센서에 측정된 액체상의 현의 길이를 의미한다. σ 와 ρ_g 는 유체의 물성치 변수로 각각 표면 장력과 기체 밀도를 의미한다. Fig. 18은 2중 광섬유 센서에서 측정된 파도, 액체 줄기, 액적의 속도를 *Weber* 수에 대해 나타낸 것이다. *Weber* 수 0.15를 기준으로 액적을 파도와 액체 줄기로부터 분리할 수 있다. 그러나 일부 액체 줄기 데이터는 액적으로 분류되며, 이는 본 방법론의 오차로 처리되었다.

4. 결론

본 연구에서는 2중 광섬유 센서를 이용해 환상분무유동 조건에서 액적 분율, 액적 속도 그리고 액적 직경을 측정하는 측정기법을 개발하였다. 이를 위해, Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 2중 광섬유 센서 형상 최적 설계안을 도출하였다. 해석 결과 2중 센서의 측정 성능을 최대화하기 위해 센서를 구성하는 센서 간의 축 방향 간격을 측정하고자 하는 입자의 체적 직경과 비교해 0.1배 이상이 되어야 하며, 액적이 두 개의 센서를 모두 지날 확률을 높이기 위해 센서 간의 횡 방향 간격을 최소화해야 하는 것으로 나타났다. 또한, 센서의 액적인자 측정성능을 실험을 통해 정량적으로 평가하기 위해, 센서간 축 방향 간격이 $230 \mu\text{m}$, 횡 방향 간격이 $155 \mu\text{m}$ 인 2중 광섬유 센서를 제작하여 액적-공기 및 물막-액적-공기 조건의 두 가지 성능평가 실험을 수행하였다.

첫번째 실험은 액체상이 액적의 형태로만 존재하는 액적 분산류 유동에서 액적인자를 측정한 것으로 액적 속도 2~35 m/s 속도 범위 조건에서 수행되었다. 실험 결과 2중 광섬유 센서에서 측정된 액적 속도는 *LDV* 측정값과 비교해 *RMSE* 지수 1.15 m/s *MAPE* 지수 6.6%의 오차를 보였다. 실험에서 기준 액적 직경은 가시화 기법으로 측정하였으며, 액적 직경 0.3~0.8 mm 범위에서 *RMSE* 지수 0.085 mm, *MAPE* 지수 12.5%를 보였다. 두번째 벤치마크 실험은 환상분무유동의 액막 근처 유동을 모의한 것으로 파도 및 액체 줄기, 그리고 액적이 혼재된 조건에서 2중 광섬유 센서의 속도 측정 성능을 가시화 기법과 비교하였다. 실험 결과 액적 속도 4 m/s에서 16 m/s 범위에서 2중 광섬유 센서는 가시화 측정값과 비교해 *RMSE* 지수 1.7 m/s와 *MAPE* 지수 16.2%를 보였다. 또한, 액막 근처에서 발생하는 파도, 액체 줄기, 액적을 구분하기 위해 *Weber* 수를 이용한 액체 형상 구분 방법론을 개발하였다.

후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Ishii, Mamoru, and Kaichiro Mishima. "Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32.10 (1989): 1835-1846.
- (2) Cheng, Ping, and Hui Ying Wu. "Phase-change heat transfer in microsystems." *International Heat Transfer Conference 13*. Begel House Inc., 2006.
- (3) Zou, Yang, and Pega S. Hrnjak. "Experiment and visualization on R134a upward flow in the vertical header of microchannel heat exchanger and its effect on distribution." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 62 (2013): 124-134.
- (4) Bharathan, Desikan. *Air-water countercurrent annular flow*. No. EPRI-NP-1165. Dartmouth Coll., Hanover, NH (USA). Thayer School of Engineering, 1979.
- (5) Mohanta, Lokanath. *Theoretical and experimental study of inverted annular film boiling and regime transition during reflood transients*. The Pennsylvania State University, 2015.
- (6) Todreas, Neil E., and Mujid S. Kazimi. *Nuclear systems volume I: Thermal hydraulic fundamentals*. CRC press, 2021.
- (7) Son, Pham Hong. "Experimental Study of Annular Two-phase Flow on 3x3 Rod-bundle Geometry with Spacers." (2014).
- (8) Azzopardi, B. J. "Drop sizes in annular two-phase flow." *Experiments in fluids* 3.1 (1985): 53-59.
- (9) Okawa, Tomio, Akio Kotani, and Isao Kataoka. "Experiments for liquid phase mass transfer rate in annular regime for a small vertical tube." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48.3-4 (2005): 585-598.
- (10) Han, Huawei, Zhenfeng Zhu, and Kamiel Gabriel. "A study on the effect of gas flow rate on the wave characteristics in two-phase gas-liquid annular flow." *Nuclear Engineering and Design* 236.24 (2006): 2580-2588.
- (11) Hazuku, Tatsuya, Tomoji Takamasa, and Yoichiro Matsumoto. "Experimental study on axial development of liquid film in vertical upward annular two-phase flow." *International Journal of Multiphase Flow* 34.2 (2008): 111-127.
- (12) Pogson, John Thomas, James Henderson Roberts, and Paul John Waibler. "An investigation of the liquid distribution in annular-mist flow." (1970): 651-658.
- (13) Hay, K. J., Zi-Chao Liu, and T. J. Hanratty. "Relation of deposition to drop size when the rate law is nonlinear." *International journal of multiphase flow* 22.5 (1996): 829-848.
- (14) Fore, L. B., B. B. Ibrahim, and S. G. Beus. "Visual measurements of droplet size in gas-liquid annular flow." *International Journal of Multiphase Flow* 28.12 (2002): 1895-1910.
- (15) Azzopardi, B. J., and J. C. F. Teixeira. "Detailed measurements of vertical annular two-phase flow-part I: drop velocities and sizes." (1994): 792-795.
- (16) Alamu, Mhunir Bayonle. *Investigation of periodic structures in gas-liquid flow*. Diss. University of Nottingham, 2010.
- (17) Hobbel, Erik F., et al. "Modern methods of on-line size analysis for particulate process streams." *Particle & particle systems characterization* 8.1?4 (1991): 29-34.
- (18) Khasawneh, Khalid, et al. "Experimental investigation of droplet parameters in a 2x 2 rod bundle under air-water annular-mist flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 192 (2022): 122889.
- (19) Zhu, Qingzi, et al. "Two-sensor droplet-capable conductivity probe for measurement in liquid dispersed flows." *Annals of Nuclear Energy* 150 (2021): 107827.
- (20) Morris, Denis, et al. "Optical fiber probe to measure local void fraction profiles." *Applied optics* 26.21 (1987): 4660-4664.
- (21) Abuaf, N., O. C. Jones Jr, and G. A. Zimmer. "Optical probe for local void fraction and interface velocity measurements." *Review of Scientific instruments* 49.8 (1978): 1090-1094.
- (22) Mizushima, Yuki, and Takayuki Saito. "Detection method of a position pierced by a single-tip optical fibre probe in bubble measurement." *Measurement Science and Technology* 23.8 (2012): 085308.
- (23) Khasawneh, Khalid, et al. "Experimental investigation of droplet parameters in a 2x 2 rod bundle under air-water annular-mist flow." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 192 (2022): 122889.
- (24) Kim, Taeho, et al. "Measuring local droplet parameters using single optical fiber probe." *AIChE Journal* 65.6 (2019): e16591.
- (25) Uga, Takeo. "Determination of bubble-size distribution in a BWR." *Nuclear Engineering and Design* 22.2 (1972): 252-261.
- (26) Lawson, Charles L., and Richard J. Hanson. *Solving least squares problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995.
- (27) Li, Mingzhong, and Derek Wilkinson. "Determination of non-spherical particle size distribution from chord length

- measurements. Part 1: Theoretical analysis.” *Chemical Engineering Science* 60.12 (2005): 3251–3265.
- (28) Thermopedia. (2011). Sauter mean diameter. Retrieved from thermopedia.com
- (29) Kataoka, Isao, Mamoru Ishii, and Akimi Serizawa. “Sensitivity analysis of bubble size and probe geometry on the measurements of interfacial area concentration in gas–liquid two–phase flow.” *Nuclear engineering and design* 146.1–3 (1994): 53–70.
- (30) Wu, Q., and M. Ishii. “Sensitivity study on double–sensor conductivity probe for the measurement of interfacial area concentration in bubbly flow.” *International Journal of Multiphase Flow* 25.1 (1999): 155–173.
- (31) Le Corre, Jean–Marie, and Mamoru Ishii. “Numerical evaluation and correction method for multi–sensor probe measurement techniques in two–phase bubbly flow.” *Nuclear engineering and design* 216.1–3 (2002): 221–238.
- (32) Li, Xianguo, and Jihua Shen. “Experimental study of sprays from annular liquid jet breakup.” *Journal of propulsion and power* 15.1 (1999): 103–110.
- (33) Moon, Jeongmin, et al. “Evaluation of the multi–sensor probe methods for the measurement of local bubble velocity and diameter.” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 135 (2022): 106146.
- (34) Ishii, M., and I. Kataoka. “Interfacial transfer in annular dispersed flow.” *Advances in Two–Phase Flow and Heat Transfer: Fundamentals and Applications Volume 1* (1983): 93–118.
- (35) Levich, Veniamin Grigorevich, and Charles W. Tobias. “Physicochemical hydrodynamics.” *Journal of The Electrochemical Society* 110.11 (1963): 251C.