



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 2월  
석사학위논문

물 모델 및 시뮬레이션 모델을 통한  
점도성 유체 내 방울의 분산 거동  
해석

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

권혁인

# 물 모델 및 시뮬레이션 모델을 통한 점도성 유체 내 방울의 분산 거동 해석

Analysis of emulsion behavior of droplets in viscous fluids via  
water model and simulation model

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

권혁인

# 물 모델 및 시뮬레이션 모델을 통한 점도성 유체 내 방울의 분산 거동 해석

지도교수 김 선 중

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2018년 10월

조선대학교 대학원

첨단소재공학과

권 혁 인

## 권혁인의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김희수 (인)

위원 조선대학교 교수 김선중 (인)

위원 조선대학교 교수 장희진 (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF TABLES .....	viii
LIST OF FIGURES .....	ix
ABSTRACT .....	xii
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 금속 에멀전 .....	1
제 2 절 유동 해석 .....	6
제 2 장 모델 설명 .....	7
제 3 장 실험방법 .....	10
제 1 절 비 유동 하강 속도 .....	10
1. 비 유동 하강 속도 실험 .....	10
2. 비 유동 하강 속도 분석 .....	10
제 2 절 입자 영상 유속계 .....	14
1. 입자 영상 유속계(Particle image velocimetry, PIV) 원리 .....	14

2. 입자 영상 유속계(Particle image velocimetry, PIV) 실험	16
.....	
제 3절 유동 하강 속도	17
1. 유동 하강 속도 실험	17
2. 유동 속도 분석	17
제 4절 Droplet의 포물선 운동	19
1. 포물선 하강 운동 실험	19
2. 포물선 하강 운동 분석	19
제 5절 유동 상승 운동	21
1. Droplet의 상승 운동	21
2. Droplet의 상승 운동 해석	21
제 4 장 결과 및 고찰	23
제 1 절 비 유동 하강 속도	23
1. Droplet의 크기에 따른 하강속도 비교	23
2. 점도에 따른 하강속도 비교	24
제 2 절 입자 영상 유속계	27

1. 3차원 PIV데이터 .....	27
2. Droplet 하강 영역의 유속 .....	27
3. 포물선 운동에서 droplet의 유속 .....	28
제 3 절 유동 하강 속도 .....	31
1. 하강 속도 측정 .....	31
2. 시뮬레이션 값과 비교 .....	34
제 4 절 Droplet의 포물선 운동 .....	33
1. 하강 각도 측정 .....	33
2. 시뮬레이션 값과 비교 .....	33
제 5 절 유동 상승 운동 .....	39
1. 상승 속도 측정 .....	39
제 5 장 결 론 .....	40
참 고 문 헌 .....	41



## LIST OF TABLES

Table 3.1 Comparison of properties between experiment and actual process.  
..... 9

## LIST OF FIGURES

Fig. 1.1 A schematic of Metal emulsion phenomena. ....	4
Fig. 1.1 A schematic of generation the metal droplet. ....	5
Fig. 2.1 Various forces acting on a descending drop. ....	9
Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental method in static state. ....	13
Fig. 3.2 Behavior of Descending in static state in Silicone Oil III. (Droplet size = 4.62 mm) ....	13
Fig. 3.3 Basic principle of PIV. ....	15
Fig. 3.4 Schematic diagram of PIV. ....	16
Fig. 3.5 Schematic diagram of experimental method in static state. (Descending droplet) ....	18
Fig. 3.6 Behavior of Descending in static state in Silicone Oil III. (Droplet size = 7.11 mm) ....	18
Fig. 3.7 A schematic digram of experimental method about $r/R$ . ....	20
Fig. 3.8 Calculation method applying angle. ....	20
Fig. 3.9 A schematic diagram of experimental method in flow state. (Ascending droplet) ....	22
Fig. 4.1 Comparison of descending velocity and reynolds number of static state experiment and simulation in Silicone Oil I. ....	25

Fig. 4.2 Comparison of descending velocity and reynolds number of static state experiment and simulation in Silicone Oil II. .... 25

Fig. 4.3 Comparison of descending velocity and reynolds number of static state experiment and simulation in Silicone Oil III. .... 26

Fig. 4.4 Comparison of descending velocity of Silicone Oil I, II, III. .... 26

Fig. 4.5 Direction and velocity of flow using PIV. .... 29

Fig. 4.6 Velocity of flow by coordinates in descending area. .... 29

Fig. 4.7 Direction and velocity of flow in  $r/R = 0.46$  using PIV. .... 30

Fig. 4.8 Direction and velocity of flow in  $r/R = 1$  using PIV. .... 30

Fig. 4.9 Descending velocity of experiment in Silicone Oil III in flow. .. 32

Fig. 4.10 Comparison of descending velocity of experiment and simulation in Silicone Oil III and Actual process. .... 32

Fig. 4.11 Comparison of descending angle in  $r/R = 0.46$ . .... 36

Fig. 4.12 Comparison of descending angle in  $r/R = 1$ . .... 36

Fig. 4.13 Comparison the descending velocity by zone applying PIV data. ( $r/R = 0.46$ ). .... 37

Fig. 4.14 Comparison the descending velocity by zone applying PIV data. ( $r/R = 1$ ). .... 37

Fig. 4.15 Comparison the residence time by zone applying PIV data.  $r/R = 0.46$ ). ..... 38

Fig. 4.16 Comparison the residence time by zone applying PIV data. ( $r/R = 1$ ). ..... 38

Fig. 4.17 Ascending velocity of flow in silicone oil. .... 39

# Abstract

## Analysis of emulsion behavior of droplets in viscous fluids via water model and simulation model

Hyeok-in Kwon

Advisor: Prof. Sun-Joong Kim, Ph. D.

Dept. of Advanced Materials Engineering

Graduate School of Chosun University

Improving the quality of steel products in the steelmaking process is an important issue. To solve this problem, a study of metal emulsions was carried out. It is well known that the metal emulsion means that the metal droplets in the slag phase are dispersed through the bottom flue and that the quality and productivity of the steel products can be improved by increasing the reaction area and reactivity between the slag and the molten iron. The velocity of metal droplets produced by the metal emulsion greatly affects process reactivity and productivity, and its descending velocity is affected by size, physical properties and fluid flow. Particularly, in the case of a fine metal droplet, it migrates and stays in the slag phase, resulting in loss of metal and deterioration of productivity. In this study, the water model was used to investigate the behavior and velocity of the droplet. The descending velocity was measured in the static state by changing the viscosity of the fluid. In addition, a lower pump was installed to measure the descending / rising speed of the fluid, and the flow rate of the fluid was measured through the PIV test. In addition, the angle and velocity of the droplet were measured in accordance with the descending behavior of the droplet. A simulated model was developed to reflect the measured variables. The droplet descending velocity was consistent with the calculated results in static and fluid conditions. Through this model, the properties of the metal emulsion were analyzed by changing the physical properties.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 금속 에멀전

제강공정에서 생산성을 높이기 위해 반응 효율을 증가시키는 것은 철 생산량, 공정 생산성뿐만 아니라 환경 문제를 감소시키기 때문에 매우 중요하다. 용강 및 슬래그 사이의 반응속도는 물질 전달에 의해 제어되며 반응속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$-\frac{d[\%M]}{dt} = \left(\frac{Ak}{V}\right) \left\{ [\%M] - \frac{(\%M)}{L} \right\} \quad (1-1)$$

여기서 [% M]은 용강상의 농도, (% M)은 슬래그 상의 농도이고 t는 시간(s), V는 용강상의 부피(m<sup>3</sup>)이다. L은 평형분배비(-)이고, k는 물질전달계수(m/s)이며 A는 계면 면적(m<sup>2</sup>)이다.

용강 상과 슬래그 상 사이의 계면적을 넓히기 위한 효과적인 방법으로 슬래그를 용강 상에 유화시키는 슬래그 에멀전과 용강을 슬래그 상에 유화시키는 금속 에멀전이 있다. 슬래그 에멀전은 제강 공정에서 사용되지만 용강 상 내에 슬래그 방울은 안정적이지 못하고 체류시간이 길지 않다는 단점이 있다. 슬래그 상의 금속 방울은 안정하고 체류시간을 슬래그 점도를 조절하면서 변화 시킬 수 있다.

제강공정의 효율을 높이기 위하여 탈인, 탈황 등 많은 연구가 이루어져 있다. 최근의 철광석은 이전보다 많은 인을 함유하고 있으며 인은 취성을 일으키므로 탈인에 대한 연구[1]가 많이 이루어져 있다. 또한 황은 강의 연성, 인성, 성형성, 용접성 및 내부식성을 저하[2]시킨다. 앞에서 언급한 에멀전 중 금속 에멀전[3-12]은 탈인, 탈황의 효율을 높이기 위하여 물리적인 교반을 이용하여 생산성을 높이기 위한 방법으로 액체 상을 가진 용강/슬래그 간의 반응 효율을 향상시킨다. 이 금속 방울들이 슬래그 상에서 하강할 때 표면에서 슬래그 상과 반응을 일으킨다. 그림 1.1은 금속 에멀전의 전체적인 공정의 모식도를 나타낸 것이다. 금속 에멀전에서 생성된

금속 방울들은 그 크기가 미세하고 수가 많으면 슬래그와 반응하는 반응 계면이 넓어지게 된다. 하지만 너무 작은 금속 방울은 용강으로 침전되지 않고 오랫동안 슬래그에서 머물러 금속의 손실을 일으킨다는 단점[13]을 가지고 있다. 더 커진 반응 계면으로 인하여 용강/슬래그 간의 반응이 향상되고 생산성이 향상[14]된다.

그림 1.2는 금속 에멀전에서 금속 방울의 생성에 관한 모식도이다. 금속 에멀전에서 금속 방울의 생성은 크게 두 가지 형태로 나타난다. 첫 번째로 금속 기둥의 파열로 인한 금속 방울의 생성이다. 점도가 높은 용강이 슬래그로 상승할 때 용강으로 이루어진 금속 기둥이 발생한다. 이 금속기둥이 길어지면서 점점 얇아지고 이후 금속 기둥이 파괴되면서 용강으로 이루어진 금속 방울들이 생성 되고 슬래그에서 용강상으로 하강하게 된다. 두 번째로 기포의 파열이다. 하부 취련에 의하여 분사된 Ar 가스는 용강을 지나 슬래그 및 대기를 지나게 된다. 이 과정 중 용강/슬래그 계면을 지날 때 기포는 용강으로 이루어진 얇은 막을 생성하여 슬래그상으로 상승하게 된다. 기포를 둘러싼 금속막은 파열되면서 금속 방울이 생성된다.

Lin과 Guthrie[6]는 슬래그 상의 점도가 증가하고 용강의 밀도가 감소함에 따라 금속 방울들의 형성이 증가하는 것을 관찰하였다. Han과 Hollapa[15-17]는 철/슬래그 계에서 X선 투과법을 이용하여 철/슬래그 계면에서 기포에 있는 금속 막의 형성과 금속 막의 파열 직후 금속 물방울의 생성을 관찰하였고 기포의 크기 및 슬래그의 점도와 계면 장력을 조사하였다. 또한 금속 막의 파열 후 금속 물방울의 크기와 수를 조사하였다. 위 연구에서는 특정 크기의 기포에서 방울의 총 질량이 최댓값을 얻었고 계면 장력이 증가함에 따라 총 질량이 감소한다고 보고되었다. 하지만 실제 공정에서는 X선 투과법을 이용한 슬래그 및 용강의 거동을 관찰하는 것이 매우 어렵기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 예측이 널리 사용되었다. 산화 슬래그에서 금속 방울은 탈탄에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. BOF에서 반응 효율은 반응 동역학뿐만 아니라 슬래그 내의 금속방울의 체류 시간도 영향을 미친다. Brooks[18-20] 등은 금속 방울의 궤도와 체류 시간을 예측하는 모델을 개발하였다. 슬래그 내의 금속 방울의 체류시간은 1초 미만인 것으로 나타났으며, 그 궤도를 예측하였다. 하지만 궤도에 따라서 하강 속도가 바뀌는 것에 대해서는 고려하지 않았다.

이전 논문[21-23]에서 Navier-stokes 방정식을 이용한 하강하는 Sn, Pb, Al 등의

금속 방울의 하강 속도에 대하여 간단한 이론 모델을 제시하였다. D.Y.Song 등은 Pb-염과 Sn-염 및 Al-염 환경에서 하강하는 금속 방울을 관찰하여 하강 속도 모델을 제시하였다. 실험 온도는 각각 603K, 504.9K, 933.3K로 진행하였다. 그러나 다른 염화물을 사용하여 슬래그의 점도에 대한 영향은 모델의 계산 결과를 통해 보고하였다. 본 논문에서는 점도가 다른 실리콘 오일과 물을 활용하여 상온에서 관찰이 가능한 물 모델 실험을 진행하였으며 정적/동적 상태의 물방울 하강 속도에 대한 점도 비 및 방울 크기의 영향에 대해 알아본다.



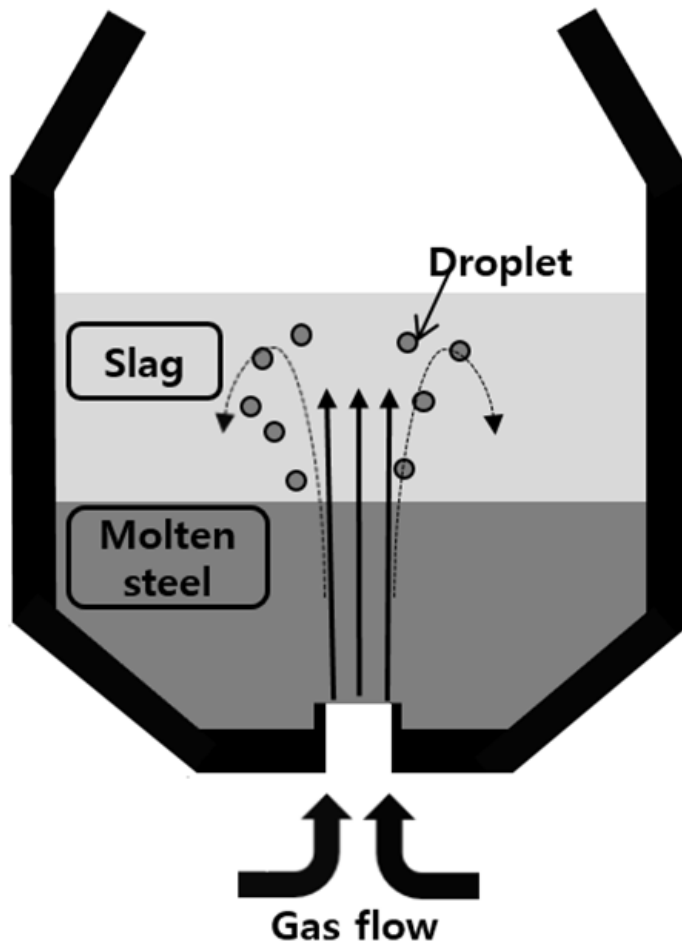


Fig. 1.1 A schematic of Metal emulsion phenomena.

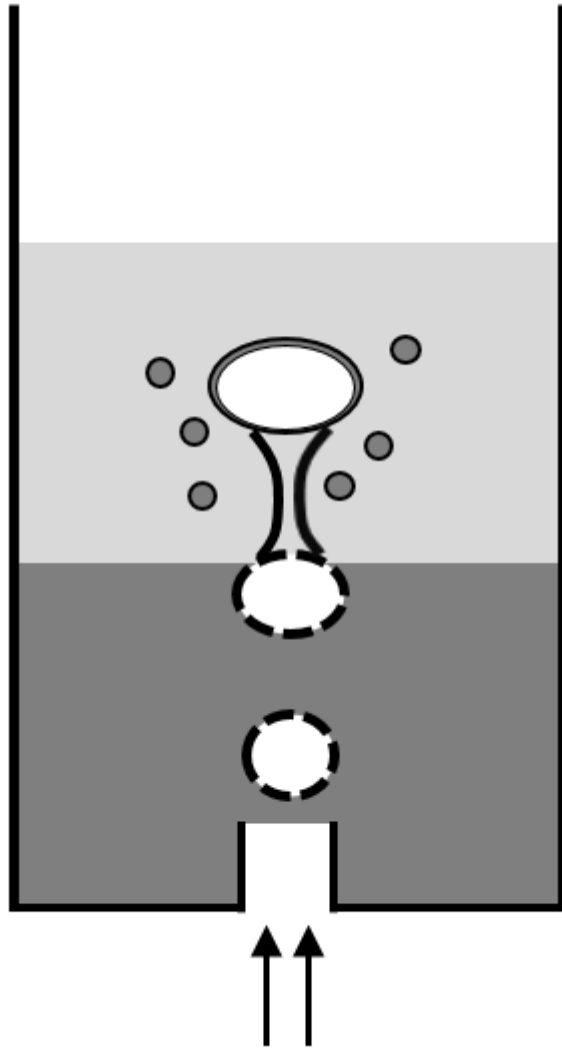


Fig. 1.2 A schematic of generation the metal droplet.

## 제 2 절 유동 해석

이전 실험들에서는 유동의 흐름을 고려하지 않았다. 유체의 거동 및 속도를 파악하는 방법으로 유체역학에서 PIV(Particle image velocimetry)는 널리 사용되었다. 유체에 작용하는 힘은 물체 주위의 유동 구조, 특히 와류 생성 및 하류 수송과 밀접하게 관련되어 있다. 그러므로 실린더의 유동은 간단한 형상과 실제 흐름에 관련하여 널리 연구되어왔다. 그러나, 실린더의 유동은 복잡한 3차원 유동 구조를 갖는다. 유체 역학은 레이놀즈수에 강하게 의존한다. [24-26] 이전 논문에서는 bluffbodies의 흐름에 대한 유동 가시화 및 입자 영상 유속계를 이용한 해석에 대하여 연구를 진행하였다. 본 연구는 유체 역학에서 널리 쓰이고 있는 입자 영상 유속계를 금속 에멀전에 적용해 금속 에멀전에서의 유체의 속도를 파악하고 그 속도를 droplet의 하강 속도에 적용하자 한다.

## 제 2 장 모델 설명

유체에서 움직이는 방울(이하, droplet)에 작용하는 힘은 중력, 부력, 항력과 부가 질량 힘이 작용한다. 그림 2.1은 하강하는 droplet에 작용하는 힘을 모식도로 나타낸 것이다. 하강하는 droplet에 관한 계산은 이전 논문[18, 19]에 자세히 나와 있다. 하강하는 droplet의 힘은 상부로 부력 및 항력이 가해지고 하부로 중력 및 추가 질량 힘이 가해진다. droplet에 작용하는 힘들은 아래의 식(1)~(4)로 나타낼 수 있다.

$$\text{항력 } F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_s u_{dr}^2 \cdot \pi r_d^2 = \frac{\pi}{2} C_D \rho_s u_{dr}^2 r_d^2 \quad (2-1)$$

$$\text{부력 } F_B = \frac{4\pi}{3} r_d^3 \rho_s g \quad (2-2)$$

$$\text{중력 } F_G = \frac{4\pi}{3} r_d^3 \rho_d g \quad (2-3)$$

$$\text{부가 질량 힘 } F_A = \frac{2\pi}{3} r_d^3 \rho_s \frac{du_{dr}}{dt} \quad (2-4)$$

여기서  $U_{dr}$ 은 droplet의 속도이고  $\rho_s$ 는 슬래그 상의 밀도,  $\rho_d$ 는 droplet의 밀도,  $r_d$ 는 droplet의 직경,  $g$ 는 중력가속도이다.  $C_D$ 는 항력 계수로 레이놀즈수( $N_{Re}$ )에 의존하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D = 24/N_{Re} \quad (0 < N_{Re} < 1)$$

$$C_D = 18.5/(N_{Re})^{0.6} \quad (0 < N_{Re} < 1000)$$

$$C_D = 0.44 \quad (N_{Re} > 1000)$$

여기서 레이놀즈수  $N_{Re}$ 는 로 계산된다.

하강하는 물방울의 부력과 항력은 상 방향으로 작용하며 중력과 부가 질량 힘은 하 방향으로 작용한다. 위 힘들의 운동량 균형은 식5와 같이 표현할 수 있다.

$$m_d \frac{d(u_{dr})}{dt} = F_A + F_G - F_B - F_D \quad (2-5)$$

식(2-5)에 식(2-1)~(2-4)를 대입하여 하강하는 droplet의 속도  $u_{dr}$ 에 대하여 정리하면 식 (2-6)과 같이 쓸 수 있다.

$$u_{dr} = \frac{e^{2t\sqrt{AB}}[A + \sqrt{AB} \cdot u_{dr,0}] + \sqrt{AB} \cdot u_{dr,0} - A}{e^{2t\sqrt{AB}}[\sqrt{AB} + Bu_{dr,0}] + \sqrt{AB} - Bu_{dr,0}} \quad (2-6)$$

여기서  $u_{dr,0}$ 은 droplet의 초기 속도이고,  $A = \frac{2g(\rho_d - \rho_s)}{(2\rho_d - \rho_s)}$  그리고  $B = \frac{3\rho_s C_D}{4r_d(2\rho_d - \rho_s)}$ 이다.

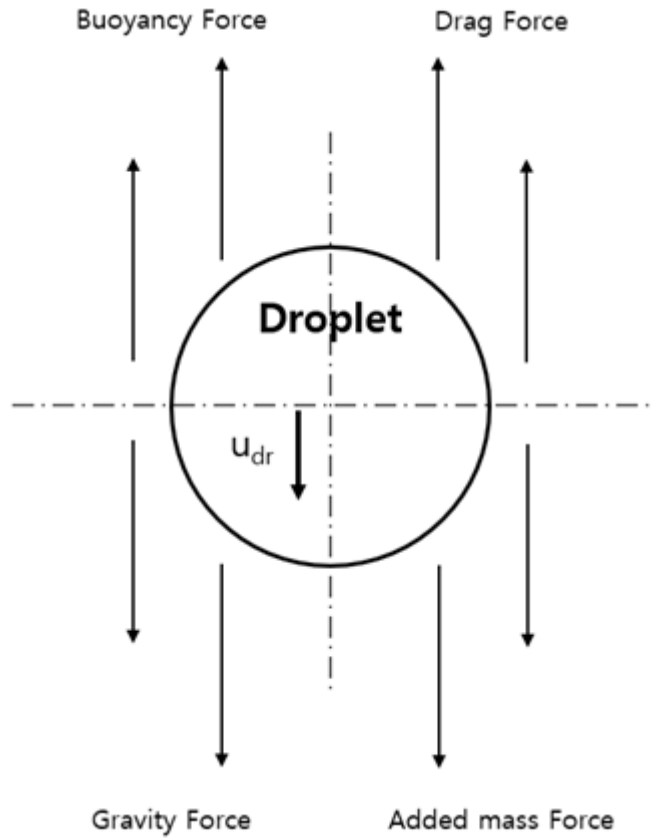


Fig. 2.1 Various forces acting on a descending drop. [13]

## 제 3장 실험 방법

### 제 1 절 비 유동 하강 속도

#### 1. 비 유동 하강 속도 실험

슬래그 - 용강 에멀전 현상을 해석하기 위하여 수 모델을 이용하였다. 액체를 담을 수 있는 폴리카보네이트 용기를 이용하였다. 폴리카보네이트 용기는 가로 150 mm, 세로 150 mm, 높이 300 mm 의 크기로 제작하였다. 본 실험에서는 슬래그를 실리콘 오일, 용강을 증류수로 가정하여 실험을 진행하였다. 슬래그 점도에 따른 용강 droplet 의 하강 속도를 알아보기 위하여 3가지 종류의 실리콘 오일을 이용하여 실험을 진행하였고 각각 실리콘오일 I, II, III로 나타낸다. 실리콘오일의 점도와 실제 공정의 물성치는 표 1에 나타내었다. 폴리카보네이트 용기에 실리콘 오일을 100 mm 높이로 채우고 스포이트를 이용하여 증류수를 떨어뜨렸다. 작은 droplet 을 얻기 위하여 적은 증류수를 떨어뜨렸고, 큰 droplet 을 얻기 위할 때는 많은 양의 증류수를 떨어뜨려 droplet 의 크기를 조절하였다. 실험의 개략도는 그림 3.1에 나타내었다. 실험 영상은 고속카메라(Nikon J5)에 매크로 렌즈(150mm F2.8 APO MACRO EX DG OS)를 장착하여 일정 거리에서 촬영하였다. 영상은 14fps 로 촬영하였다.

#### 2. 비 유동 속도 분석

위 실험에서 얻어진 영상을 이미지 소프트웨어를 이용하여 하강 속도를 분석하였다. 우선 영상을 소니 베가스 프로그램을 이용해 1/30초 단위로 나누어 스포이트에서 증류수가 떨어지는 순간부터 폴리카보네이트 바닥까지 떨어지는 시간을 측정하였다. 다음 증류수가 떨어지는 droplet 의 크기를 image pro 프로그램을 이용해 픽셀 단위로 측정하였다. droplet 의 지름을 픽셀 단위로

측정하고 실리콘 오일 내에 길이 측정 가능한 물체를 넣은 후 물체의 픽셀과 실제 크기를 비교하여 droplet 의 크기를 측정하였다. 또한 하강하는 구간의 길이도 픽셀 단위로 측정한 후 물체와 비교하여 실제 길이를 측정하였다. 소니 베가스를 이용하여 구한 droplet 이 하강하는 시간과 image pro 를 이용하여 구한 하강 거리를 이용하여 droplet 의 하강 속도를 측정하였다. 그림 3.2는 소니 베가스로 얻어진 실험을 통한 droplet 의 거동을 나타냈다.



**Table 3.1 Comparison of properties between experiment and actual process.**

		Actual process	Silicone Oil I	Silicone Oil II	Silicone Oil III
System		Steel/Slag	Water / Silicone Oil I	Water / Silicone Oil II	Water / Silicone Oil III
Working temperature(K)		1873	298	298	298
Material properties	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7000 3500	977 932	997 960	997 962
	Density ratio	2	1.070	1.039	1.036
	Viscosity [pa·s]	$5.1 \times 10^{-3} / 0.1 \sim 1.0$	$8.9 \times 10^{-4} / 9.30 \times 10^{-3}$	$8.9 \times 10^{-4} / 4.79 \times 10^{-2}$	$8.9 \times 10^{-4} / 9.60 \times 10^{-2}$
	Viscosity ratio	0.051~0.0051	0.096	0.018	0.009

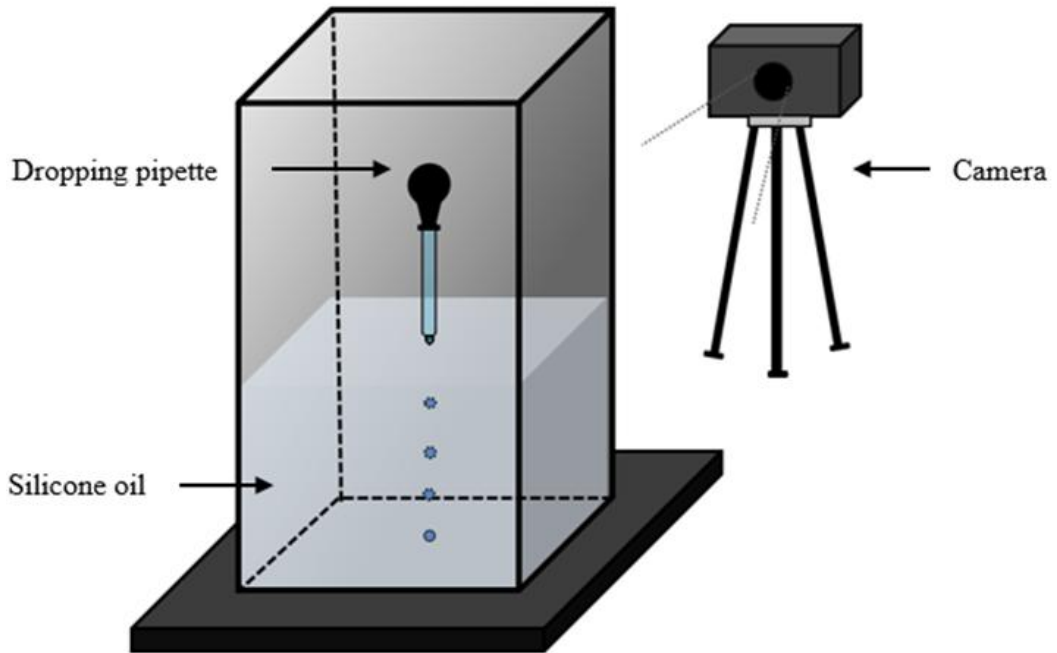


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental method in static state.

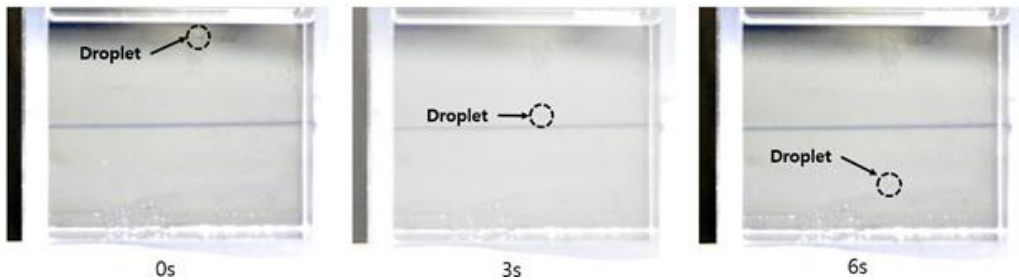


Fig. 3.2 Behavior of Descending in static state in Silicone Oil III. (Droplet size = 4.62 mm)

## 제 2 절 입자 영상 유속계

### 1. 입자 영상 유속계(Particle image velocimetry, PIV) 원리

PIV는 유체 내에 관측할 수 있는 입자에 레이저를 주사하여 CCD 카메라 등 영상매체에를 통해 얻은 이미지를 미소 시간간격 으로 나누어 입자들의 평균 변위를 구하여 속도를 측정하는 방법이다. 입자가 그리는 궤적은 직선성과 등간격성이 보장되어야 한다. 그림 3.3은 PIV의 기본원리도이며 이를 수식으로 나타내면 식과 같다.

$$u = \lim_{t_1 \rightarrow t_2} \frac{dx}{t_2 - t_1} \quad (2.1)$$

$$v = \lim_{t_1 \rightarrow t_2} \frac{dy}{t_2 - t_1} \quad (2.2)$$

여기서 t1은 첫 번째 레이저가 주사된 시간이고, t2는 두 번째 레이저가 주사된 시간이다. dx와 dy는 각각 x축 방향과 y축 방향의 변위이다.

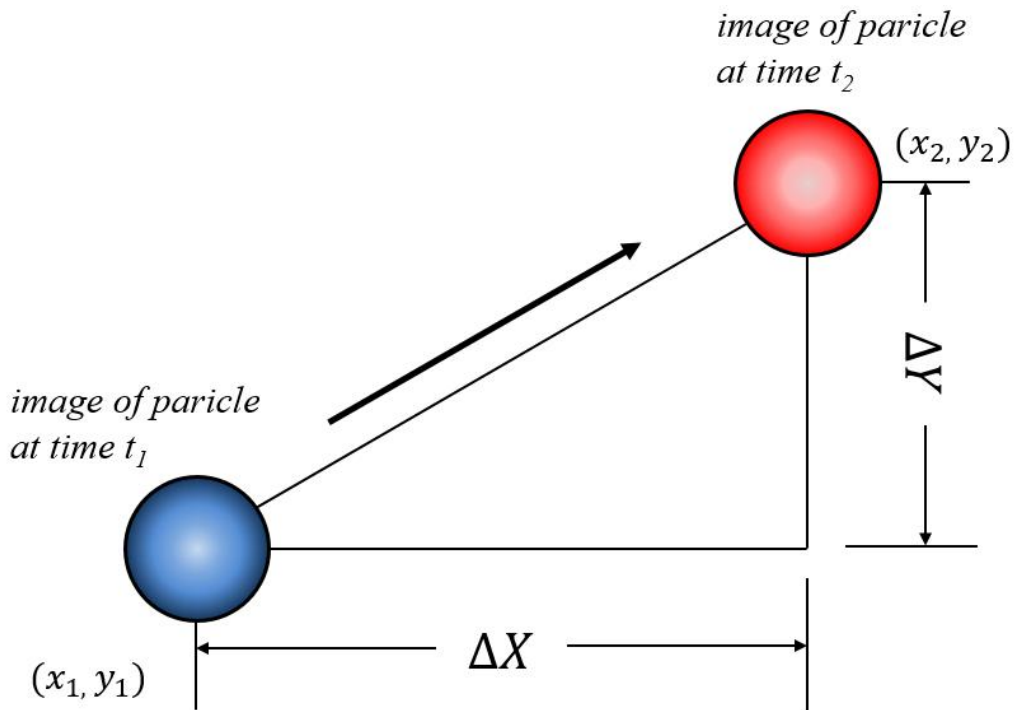


Fig. 3.3 Basic principle of PIV.

## 2. 입자 영상 유속계(Particle image velocimetry, PIV) 실험

입자 영상 유속계(Particle image velocimetry, 이하 PIV)는 육안으로 관찰하기 어려운 유체의 흐름에 추적 가능한 입자를 넣고 레이저를 주사하여 고속카메라를 통해 순간 또는 유동장을 가시화하는 장치이다. 본 실험에서는 폴리카보네이트 박스에 실리콘 오일 내에 추적 가능한 입자의 종류 중 하나인 FPP(형광물질)를 섞고 박스 하부에 수중 펌프를 설치하여 흐름을 생성하였다. Nd:YAG 레이저를 유체 내에 주사하여 유체의 흐름을 관찰하였다. 이 연구에서는 2000 fps 및 최대 프레임 속도 16000 fps에서 1280 × 1024 픽셀의 이미지를 캡처할 수 있는 고속카메라(FASTCAM Mini UX50)를 이용하여 이미지를 캡처하였다. 캡처한 이미지는 매트랩에서 PIV 분석을 위한 오픈소스를 사용했다. [27, 28] 실험은 암실에서 진행하였다. 그림 3.4 은 본 실험의 개략도이다.

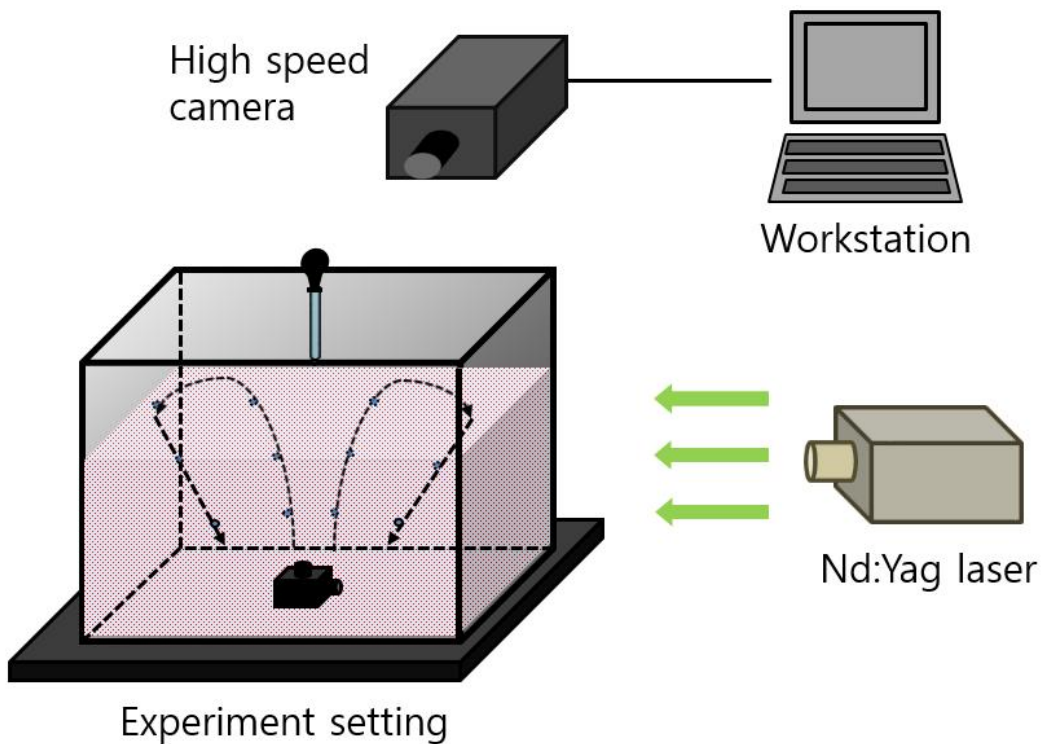


Fig. 3.4 Schematic diagram of PIV.

## 제 3 절 유동 하강 속도

### 1. 유동 하강 속도 실험

이전 실험에서는 유동이 없는 상태에서 하강 속도를 측정하여 실험을 진행하였다. 하지만 실제 제강 공정에서는 하부 취련에 의하여 용강 및 슬래그에 유동이 일어난다. 이 현상을 해석하기 위하여 폴리카보네이트 용기 하부에 수중 펌프를 설치하여 유동을 상부로 흐르는 유동을 만들어 주었다. 입수구 구경 7.8 mm, 출수구 구경 5.8 mm, 350L/H의 유량을 가지는 수중 펌프를 이용하였다. 폴리카보네이트 용기는 이전 실험과 같은 크기인 가로 150 mm, 세로 150 mm, 높이 300 mm로 실험을 진행하였다. 수중펌프 폴리카보네이트 중앙에 고정된 후 실리콘 오일Ⅲ을 채워 넣고 기존에 수중펌프 내에 들어 있는 공기를 제거하기 위하여 약 5분 동안 수중 펌프를 작동시킨 후 공기 방울이 실리콘 오일에서 빠져나가기 위하여 약 3시간 동안 방치 후 실험을 진행하였다. 유동이 생성되면 실리콘 오일 기둥이 생성되기 때문에 비유동 실험보다 높은 200 mm 높이로 폴리카보네이트 용기에 실리콘 오일Ⅲ을 채운 후 출수구에 스포이트를 이용하여 증류수를 떨어뜨려 실험을 진행하였다. 이 실험 역시 스포이트로 떨어뜨리는 증류수의 양을 조절하여 droplet의 크기를 조절하였다. 실험의 개략도는 그림 3.5에 나타내었다. 위 실험 역시 이전 실험과 같은 거리에 카메라를 설치 후 동영상 촬영하였다.

### 2. 유동 속도 분석

속도 분석 또한 이전 실험과 같이 얻어진 영상을 이미지 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. 위 실험은 droplet이 하부까지 하강하지 않고 수중 펌프에 의하여 흐름을 타고 이동하기 때문에 droplet이 상승하는 구간을 제외하고 하강하는 구간을 소니 베가스 프로그램을 이용하여 1/30초 단위로 시간을 측정하였다. 생성된 유동에 의하여 droplet은 포물선을 그리며 하강하기 때문에 직선으로 떨어지는 구간을 image pro 프로그램을 이용하여 픽셀 단위로 길이를 측정하였다. 그림 3.6은 소니 베가스로 얻어진 실험을 통한 droplet의 거동을 나타냈다.

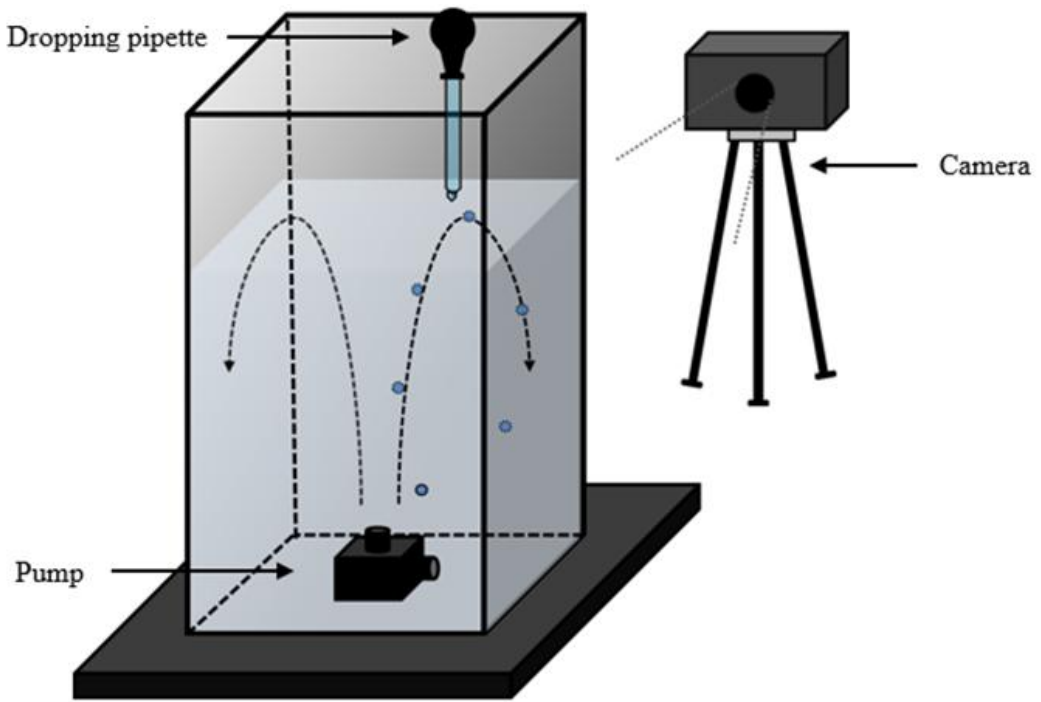


Fig. 3.5 Schematic diagram of experimental method in static state. (Descending droplet)

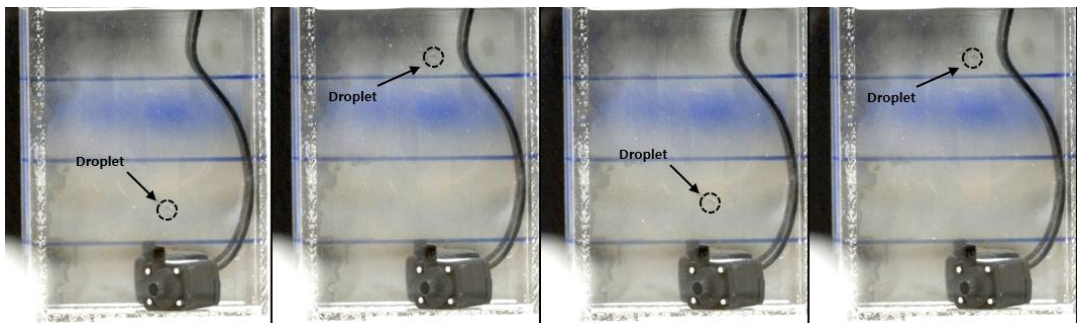


Fig. 3.6 Behavior of Descending in flow state in Silicone Oil III. (Droplet size = 7.11 mm)

## 제 4 절 Droplet의 포물선 운동

### 1. 포물선 하강 운동 실험

유동이 있는 상태에서 droplet은 노즐에서부터 상승 후 포물선 운동을 하며 하강하게 된다. 짧은 구간의 하강운동은 3.3 절에서 다루었지만 본 실험에서는 포물선 운동을 고려하여 실험을 진행하였다. 위 실험과 같은 소재의 가로 300 mm, 세로 150 mm, 높이 300 mm 용기를 제작하여 실험을 진행하였다. 이전 실험과 같이 용기 하부에 수중펌프를 설치하여 흐름을 생성하였다. 그림 3.7은 본 실험의 개략도이다. 용기 벽으로부터 중앙까지의 거리를  $R$ , 용기 벽으로부터 수중 펌프 출수구까지의 거리를  $r$ 로 표현하였다. 수중펌프의 위치를 다르게 하여 실험을 진행하였고 거리를  $r/R$ 로 표시하였다. 실험은 유동 하강 실험과 같은 방법으로 폴리카보네이트 용기에 200 mm 높이로 실리콘 오일을 채운 후 스포이트를 이용하여 증류수를 떨어뜨렸다. 같은 거리에 카메라를 설치하고 동영상을 촬영하였다.

### 2. 포물선 하강 운동 분석

본 실험은 두 가지 수중 펌프 위치에 따른 droplet의 하강 속도 및 그 각도에 대하여 측정하였다. 그림 3.8은 포물선 운동을 하는 droplet의 궤적을 나타낸 그림이다. 포물선 하강 운동하는 구역을 Zone 1, Zone 2로 나누어 각 구역의 하강 속도 및 각도를 측정하였다. 각도는 상용 프로그램을 이용하여 이미지에서 각도를 측정하였으며 하강 속도는 이전과 같은 방법을 이용하여 1/30 초 단위로 이미지를 분석하여 그 속도를 측정하였다.



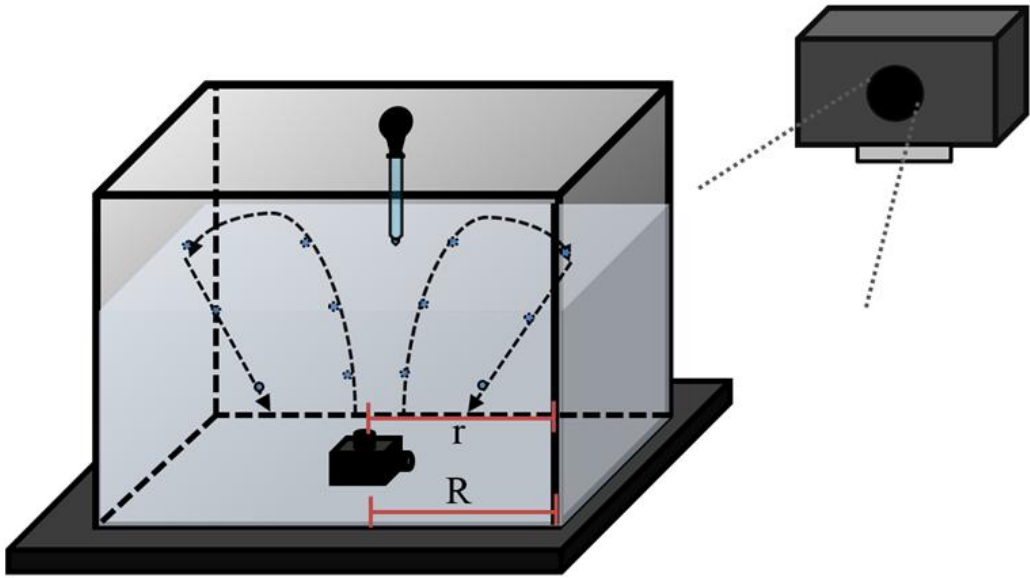


Fig 3.7 A schematic diagram of experimental method about  $r/R$ .

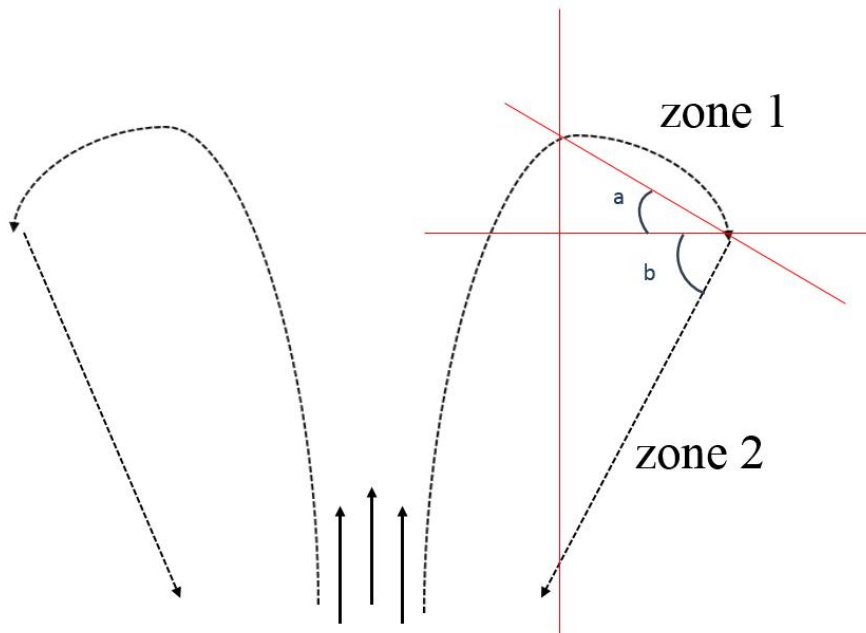


Fig 3.8 Calculation method applying angle.

## 제 5 절 유동 상승 운동

### 1. Droplet의 상승 운동

위 실험을 응용하여 droplet의 상승 운동을 측정하였다. 그림 3.9는 droplet의 상승 운동을 나타내는 모식도이다. 가로 150 mm, 세로 150 mm, 높이 300 mm의 폴리카보네이트 용기 하부에 수중 펌프를 설치하고 증류수를 떨어뜨려 그 상승 속도를 측정하였다. 실리콘 오일 I 과 실리콘 오일 II를 200 mm 높이로 채운 후 실험을 진행하였다. 실험은 출수구 바로 윗부분에 떨어뜨려 같은 조건으로 실험을 진행하였다. 표 1의 물성과 같은 실리콘 오일을 사용하였으며 droplet의 크기를 조절하기 위하여 투입하는 증류수의 양을 조절하였다. 카메라를 이용하여 droplet의 거동을 촬영하였고 폴리카보네이트 용기와 카메라와의 거리는 항상 일정하였다.

### 2. Droplet의 상승 운동 해석

영상에 의하여 얻어진 droplet의 거동을 1/30 초 단위로 소니 베가스 프로그램을 이용하여 편집하였다. 편집하여 얻어진 사진을 픽셀 단위로 나누어 그 거리를 측정하였다. Droplet을 떨어뜨린 부분으로부터 상부 계면까지의 거리를 소니 베가스 프로그램으로 얻어진 시간으로 나누어 속도를 측정하였다.

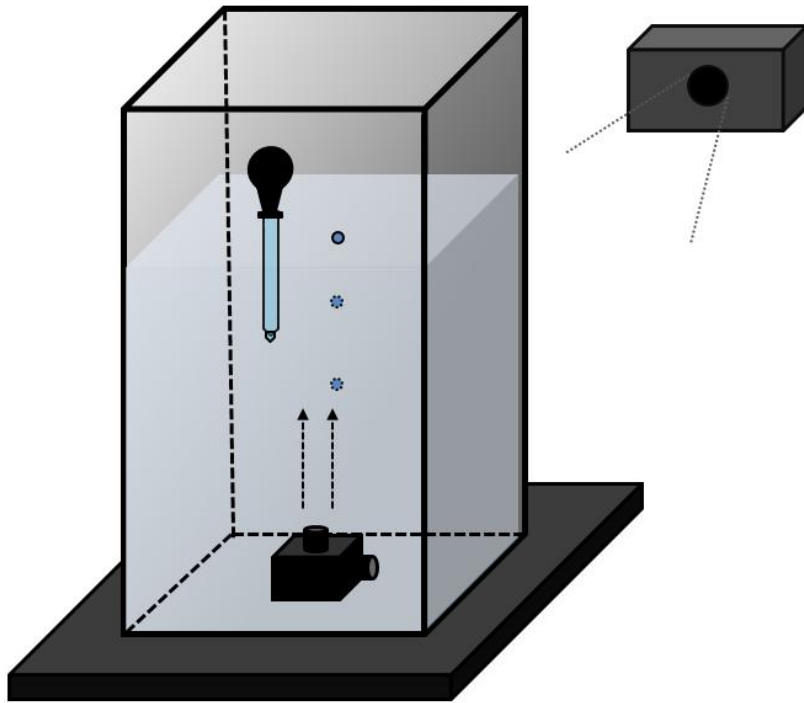


Fig 3.9 A schematic diagram of experimental method in flow state.  
(Ascending droplet)

## 제 4장 결과 및 고찰

### 제 1 절 비 유동 하강 속도

#### 1. Droplet의 크기에 따른 하강속도 비교

본 실험에서는 실리콘 오일 I, II, III을 이용하여 점도 및 droplet 크기에 따른 droplet의 하강 속도를 측정하였다. Droplet의 크기는 0.5 mm 간격으로 오차범위를 설정하여 측정하였다. 그림 4.1은 실리콘 오일 I 일 때 droplet의 크기에 따른 하강 속도 및 레이놀즈수를 비교한 그래프이다. 물방울의 크기 범위는 2~8 mm 사이에서 실험을 진행하였다. 실험 결과는 검은색 사각형 표식으로 나타내었고 레이놀즈수는 검은색 원형 표식으로 나타내었으며 시뮬레이션 값은 점선으로 나타내었다. droplet의 크기가 증가함에 따라 하강 속도가 증가하였고 레이놀즈수 역시 droplet의 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 또한 시뮬레이션과 실험 결과는 일치하였다. 그림 4.2는 실리콘 오일 II일 때 droplet의 크기에 따른 하강 속도 및 레이놀즈수를 비교한 그래프이다. 그림 4.1과 마찬가지로 시뮬레이션 값과 실험 결과는 일치하였고 droplet의 크기가 증가함에 따라 하강 속도 및 레이놀즈수가 증가하였다. droplet의 크기가 5 mm 이상부터는 시뮬레이션의 y절편이 변화하는 것을 확인하였다. 이는 레이놀즈수가 1보다 커지는 지점으로 위 모델에서 설명된 항력계수가  $24/N_{Re}$ 에서  $18.5/(N_{Re})^{0.6}$ 으로 바뀌기 때문이다. 그림 4.3은 실리콘 오일 III일 때 droplet의 크기에 따른 하강 속도 및 레이놀즈수를 비교한 그래프이다. 마찬가지로 droplet의 크기가 커짐에 따라 하강 속도와 레이놀즈수가 증가하였으며 시뮬레이션 값과 실험결과가 일치하였다. 또한 droplet의 크기가 8 mm보다 커지는 지점부터 y절편이 증가하였으며 이 역시 레이놀즈수가 1보다 커지면서 항력 계수식이 변화하였다.

## 2. 점도에 따른 하강속도 비교

그림 4.4는 실리콘 오일 I, II, III의 실험 결과와 시뮬레이션 값을 비교한 그래프이다. 표 1에 나타낸 바와 같이 실리콘 오일의 점도는  $I < II < III$  이다. 실험 결과와 시뮬레이션 값은 일치하였으며 실리콘 오일의 점도가 높으면 droplet의 하강 속도가 감소하는 것으로 나타났다. 용강/슬래그의 점도 비를 증류수/실리콘 오일의 점도 비와 비교하였을 때 실리콘 오일 II, III가 유사하였다. 따라서 실리콘 오일 II, III의 데이터가 실제 공정의 하강 속도에 근접할 것이라고 예상된다.

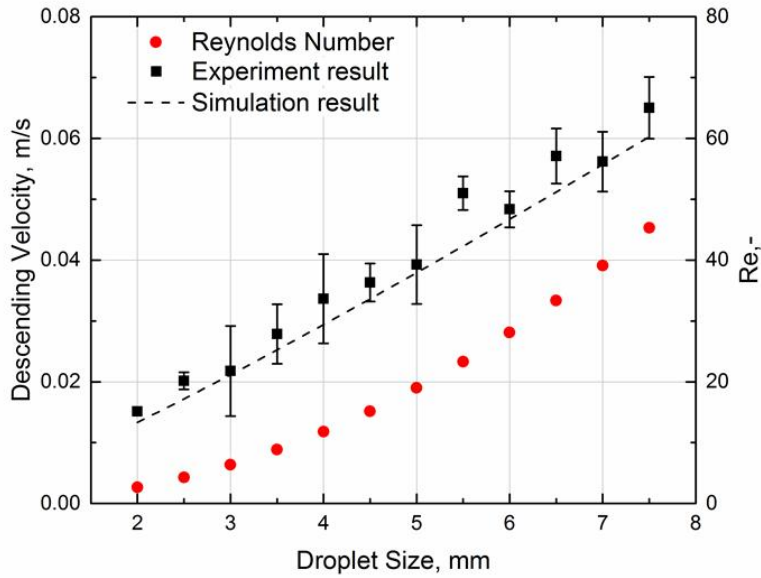


Fig. 4.1 Comparison of descending velocity and reynolds number of static state experiment and simulation in Silicone Oil I .

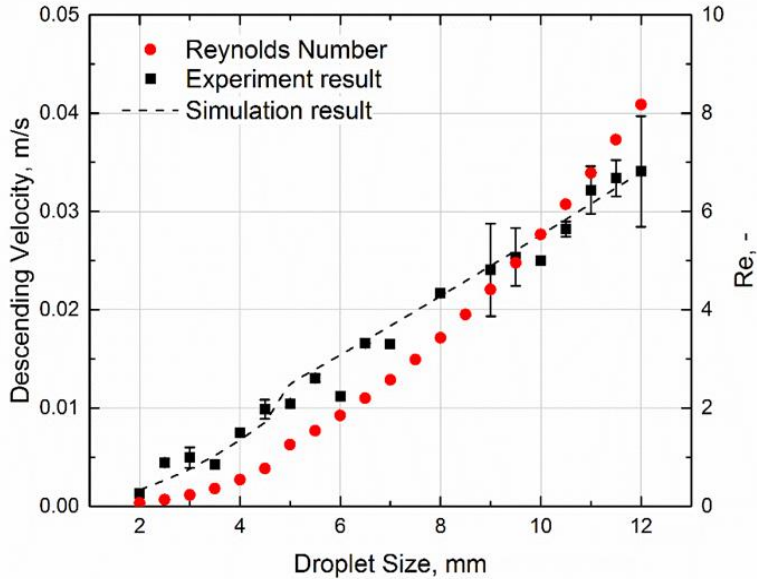


Fig. 4.2 Comparison of descending velocity and reynolds number of static state experiment and simulation in Silicone Oil II .

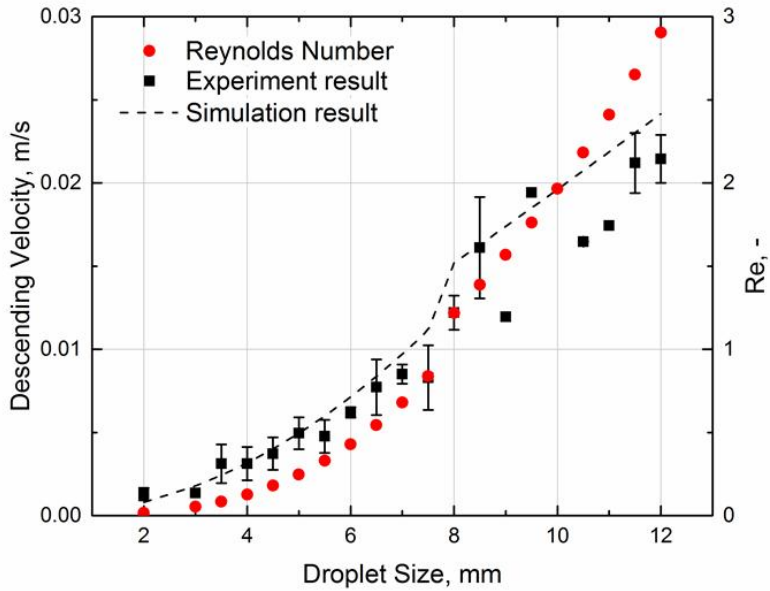


Fig. 4.3 Comparison of descending velocity and Reynolds number of static state experiment and simulation in Silicone Oil III.

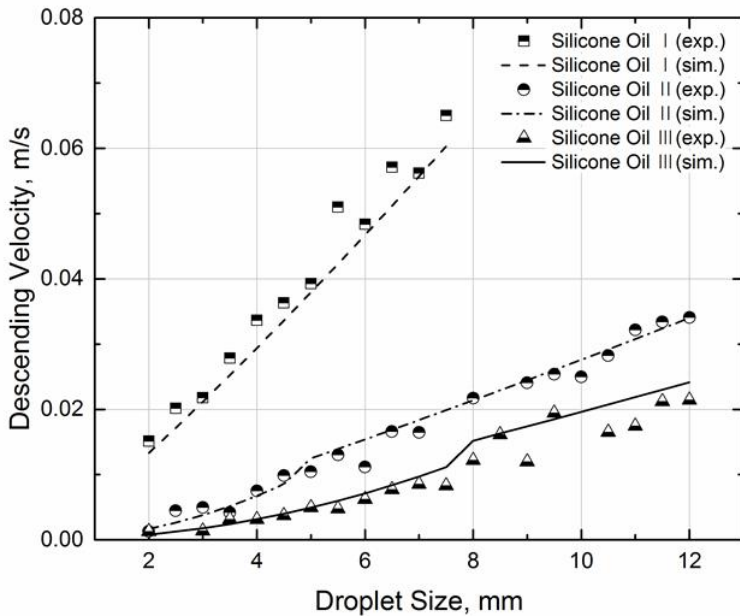


Fig. 4.4 Comparison of descending velocity of Silicone Oil I, II, III.

## 제 2 절 입자 영상 유속계

### 1. 3차원 PIV 데이터

그림 4.5는 PIV 실험으로 얻은 유동의 흐름을 3차원으로 표현한 그래프이다. x축과 y축은 각각 x 픽셀 좌표, y 픽셀 좌표이며 노란색에 가까울수록 유속이 빠르고 파란색에 가까울수록 유속이 느리다. 흰색 화살표 방향을 타고 droplet이 이동하며 사각형으로 표시한 부분은 droplet이 하강하는 구역이다. 수중 펌프의 출수구에서 유량이 가장 빠른 것으로 나타났다. 또한 droplet의 하강 구역은 그 유속이 거의 일정한 것으로 나타났다. Droplet은 항상 일정한 흐름을 타고 이동하였다. 실험 결과 값은 pixel/s로 나오기 때문에 실제 박스의 크기와 픽셀값을 비교하여 m/s 단위로 변환하여 유속을 얻었다.

### 2. Droplet 하강 영역의 유속

그림 4.5에서 나타난 바와 같이 유체의 유속은 그 위치에 따라 다르다. 이 중 droplet의 하강 속도를 알아보기 위하여 하강 영역의 유속을 측정하였다. 그림 4.5의 사각형 영역이 하강 영역으로 이 영역의 평균속도를 하강 영역의 유속으로 나타내었다. 그림 4.6은 하강 영역의 유속을 x 좌표 및 y 좌표에 따라 나타낸 그래프이다. 이 영역의 유속은 대체로 비슷하였고 평균 유속은 0.0125 m/s이다.



### 3. 포물선 운동에서 droplet의 유속

그림 4.7과 그림 4.8은 각각  $r/R = 0.46$ 과  $r/R = 1$ 에서 포물선 운동을 하는 droplet의 거동을 PIV를 통해 얻은 3차원 그래프이다. 이전 PIV 그래프와 같이 x축, 축이 각각 x축 픽셀 좌표 및 y축 픽셀 좌표이며, 유속은 배경색으로 구분하였으며, 파란색은 속도가 느리고, 노란색일수록 속도가 빠르다. 실험 결과로 나온 유속을 pixel/s에서 m/s로 변환하여 계산하였다. 그림 4.7에서 Zone 1의 유속은 0.014889 m/s이며, Zone 2의 유속은 0.006127 m/s이다. 그림 4.8에서 Zone 1의 유속은 0.022878 m/s 이며 Zone 2의 유속은 0.007151 m/s이다.  $r/R = 0.46$ 일 때의 Zone 1의 유속은  $r/R = 1$ 일 때의 Zone 1의 유속보다 높은 것을 확인 할 수 있다.  $r/R = 0.46$ 은 상대적으로  $r/R = 1$ 보다 벽으로부터 거리가 멀기 때문에 벽의 영향을 덜 받고 반대로  $r/R = 1$ 은 벽의 영향을 받아 하강 속도가 더 빠르다.

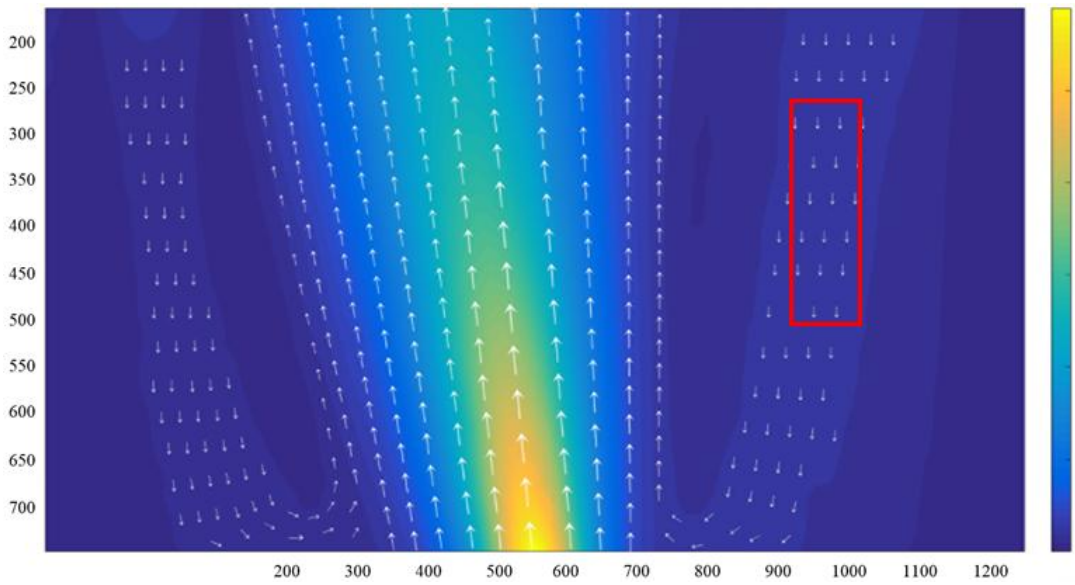


Fig. 4.5 Direction and velocity of flow using PIV in descending droplet

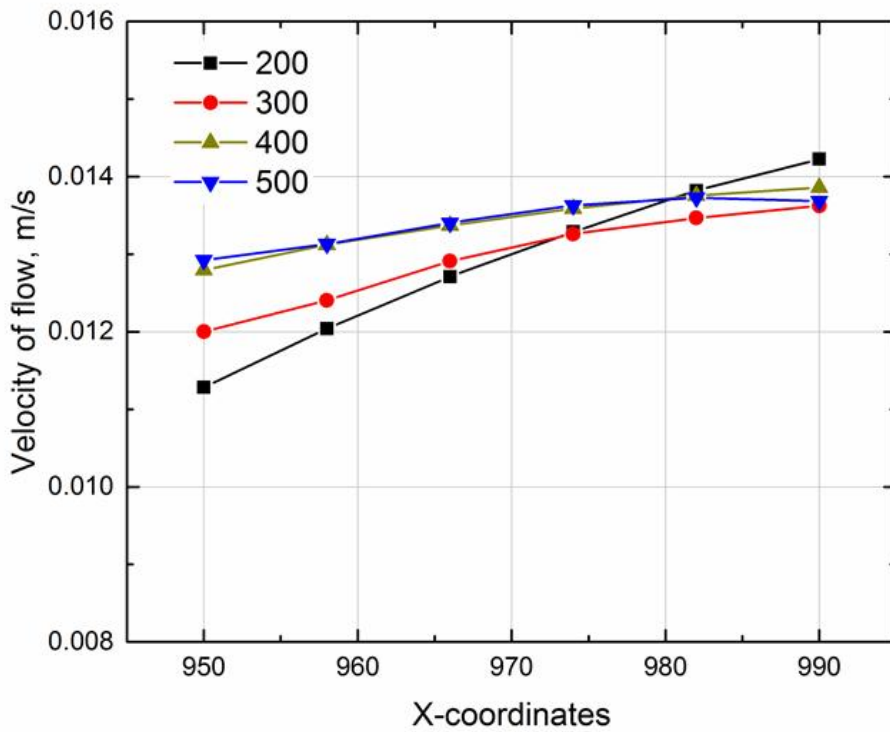


Fig. 4.6 Velocity of flow by coordinates in descending area.

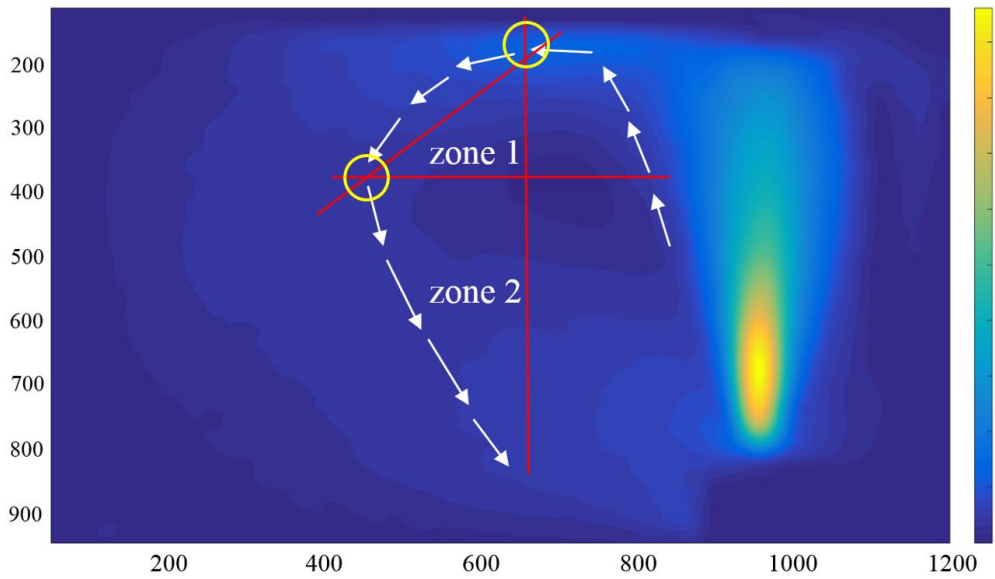


Fig. 4.7 Direction and velocity of flow in  $r/R = 0.46$  using PIV.

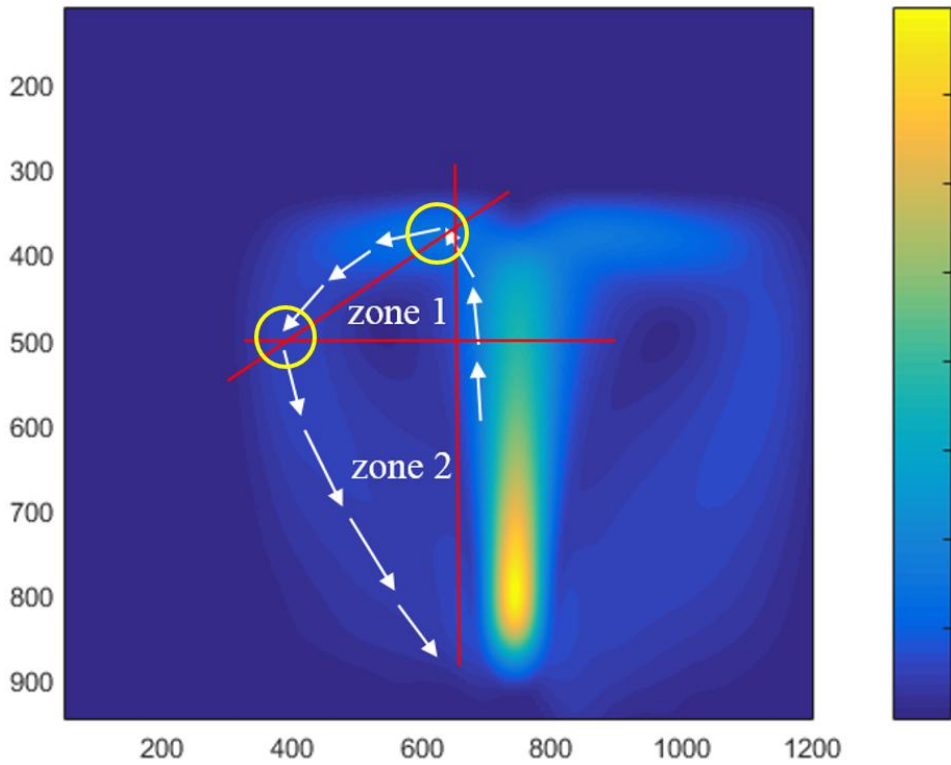


Fig. 4.8 Direction and velocity of flow in  $r/R = 1$  using PIV.

## 제 3 절 유동 하강 속도

### 1. 하강 속도 측정

본 실험은 수중 펌프에 의한 흐름의 생성으로 인하여 droplet의 하강이 1회가 아닌 반복적으로 측정되었다. 따라서 droplet의 크기에 따른 하강 속도를 비유동 하강 속도보다 더 많은 결과 값을 얻을 수 있었다. 그림 4.9는 droplet의 크기에 따른 하강 속도를 각 droplet의 크기별로 10회 실험하여 비교한 그래프이다. 크기별 10회의 데이터가 거의 변하지 않았으며 이는 droplet이 일정한 흐름을 타고 반복적으로 움직인다는 것으로 나타난다. 또한 비유동 하강 속도와 마찬가지로 droplet의 크기가 증가함에 따라 하강 속도가 증가하는 것으로 나타났다.

### 2. 시뮬레이션 값과 비교

제1절에서 언급한 비유동 상태의 실험에서는 유동이 없는 상태이기 때문에 유속이 없는 상태로 제2장에서 언급한 시뮬레이션 모델의 항인  $u_{dr,0}$ 을 고려하지 않았다. 하지만 본 실험에서는 유동 상태에서 droplet이 하강하는 영역의 하강 속도를 측정하였다. 비유동 실험과는 다르게 유체 내에 흐름이 생기면서 구역마다 그 유속이 다르다. 따라서 시뮬레이션 모델에 PIV 실험에서 얻어진 하강하는 영역의 유속을 적용하여 실험 결과와 비교하였다. 그림 4.10은 비유동 하강속도와 유동 하강 속도를 비교한 그래프이다. 유동 하강 속도의 경우 그림 4.6을 통하여 얻은 유속 0.0125 m/s를 시뮬레이션에 적용했다. 모델 설명에  $u_{dr,0}$ 로 표현된 상대 속도에 유체의 유속을 적용해 계산하였다. 시뮬레이션 모델과 실험 결과는 유사하였다. 수중 펌프에 의한 유동의 생성으로 인하여 유동 상태의 하강 속도는 비유동 상태의 하강 속도보다 빠르다. 또한 실제공정의 물성치를 적용한 시뮬레이션 값과 비교하였다. 실제공정은 수 모델에 사용된 재료보다 높은 밀도와 점도를 가지기 때문에 직접적인 비교는 힘들지만, 실제 공정에서의 흐름의 유속을 알 수 있다면 droplet의 하강 속도의 예측이 가능할 것으로 예상된다.

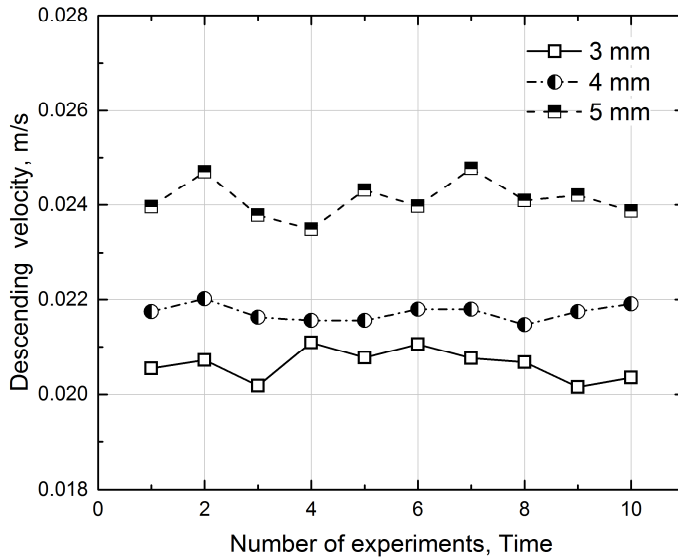


Fig. 4.9 Descending velocity of experiment in Silicone Oil III in flow.

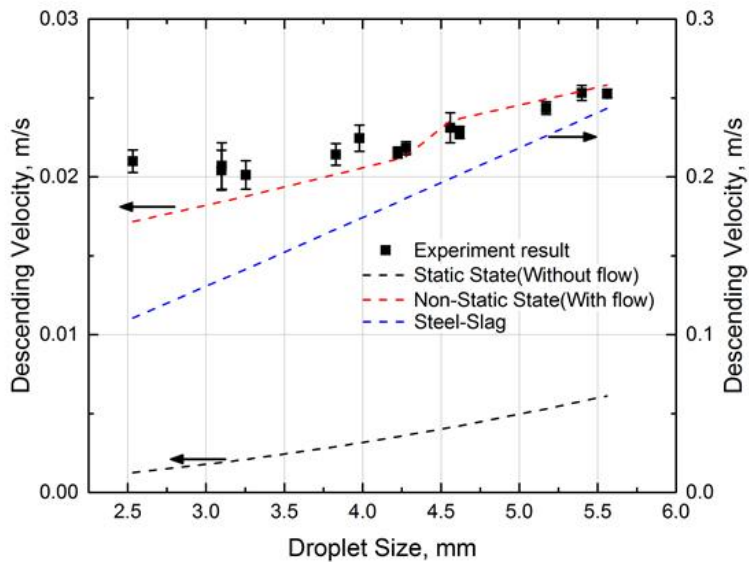


Fig. 4.10 Comparison of descending velocity of experiment and simulation in Silicone Oil III and Actual process.

## 제 4 절 Droplet의 포물선 운동

### 1. 하강 각도 측정

본 실험에서 상부 포물선 하강 운동 및 하부 포물선 하강 운동 구역의 각도를 측정하였다. 각 실험의 각도는 droplet의 포물선 운동이 가장 높은 상승 부분을 기준으로 수직인 직선을 그리고 Zone 1과 Zone 2를 droplet의 좌, 우 운동 방향이 바뀌는 지점에 수평인 직선을 그려 그 각도를 측정하였다. 그림 4.11은  $r/R = 0.46$ 일 때, Zone 1 과 Zone 2의 각도를 비교한 그래프이다. Droplet의 크기에 따라 각도를 라디안으로 표시하였다. Zone 1에서 droplet은 계면과 부딪힌 후 하강 운동을 하게 된다. 이때, droplet의 크기가 작으면 질량이 낮아 하강하는 각도가 완만하고 크기가 크면 질량이 커 하강 각도가 증가한다. 따라서 droplet의 크기가 증가함에 따라 각도가 증가한다. Zone 2에서 작은 droplet은 수중 펌프의 입수구의 영향을 받아 각도가 작아진다. 큰 droplet은 상대적으로 질량이 크기 때문에 입수구의 영향을 덜 받고 떨어져 각도가 커진다. 구역별 각도를 추세선을 이용한 식을 도출하였으며 다음과 같다.

$$\text{Zone 1} : A_d = 0.054r_d + 0.449 \quad (4.1)$$

$$\text{Zone 2} : A_d = 0.071r_d + 0.771 \quad (4.2)$$

여기서  $A_d$ 는 droplet의 각도이며  $r_d$ 는 droplet의 반경이다.

그림 4.12는  $r/R = 1$ 일 때, Zone 1과 Zone 2의 각도를 비교한 그래프이다. 마찬가지로 Zone 1에서 droplet 크기가 작으면 질량이 낮아 하강각도가 완만하며 반대로 크기가 크면 질량이 커 하강 각도가 증가한다. 하지만 Zone 2에서 그림 4.11의 Zone 1과는 반대로 droplet의 크기가 작으면 각도가 크고 droplet의 크기가 크면 각도가 감소하였는데  $r/R$  이 작을 때 Zone 2에서는 droplet의 크기가 증가함에 따라 각도가 증가하였지만, Zone 1에서는 반대로 감소하였다. 이 이유는 Zone 1에서 하강할 때에 벽에 영향을 받으면서 그림 4.12보다 더 높은 지점에서 Zone가 형성되었을 것이라 예상된다.

$$\text{Zone 1} : A_d = 0.033r_d + 0.744 \quad (4.3)$$

$$\text{Zone 2} : A_d = 0.06r_d + 0.858 \quad (4.4)$$

## 2. 시뮬레이션 값과 비교

본 실험에서는 유동이 있는 상태에서 포물선운동에 따라 그 하강 속도를 측정하였다. 이전 직선 하강 속도에서는 각도를 고려하지 않았지만 본 실험에서는 추가로 각도를 측정하였고 그 결과를 시뮬레이션에 적용했다. 식 (2-6)의 초기 속도인  $u_{dr,0}$ 에 droplet의 각도인  $A_d$ 를 적용하여 계산하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$u_{dr} = \frac{e^{2t\sqrt{AB}}[A + \sqrt{AB} \cdot \text{Sin}A_d \cdot u_{dr,0}] + \sqrt{AB} \cdot \text{Sin}A_d \cdot u_{dr,0} - A}{e^{2t\sqrt{AB}}[\sqrt{AB} + B\text{Sin}A_d \cdot u_{dr,0}] + \sqrt{AB} - B\text{Sin}A_d \cdot u_{dr,0}} \quad (4.5)$$

그림 4.13은  $r/R = 0.46$ 에서 Zone 1과 Zone 2의 시뮬레이션 및 실험 결과를 비교한 그래프이다. Zone 1의 시뮬레이션 결과는 Zone 1의 실험 결과보다 하강 속도가 낮게 나타났다. Zone 2의 시뮬레이션과 실험결과는 유사하게 나타났다. 그림 4.14는  $r/R=1$ 에서 Zone 1과 Zone 2의 시뮬레이션 및 실험 결과를 비교한 그래프이다. Zone 1의 시뮬레이션 결과는 Zone 2의 실험 결과보다 하강속도가 높았으며 Zone 2에서는 두 결과가 비슷하였다. Zone 1에서는 외부와의 접촉하는 표면의 영향으로 인하여 시뮬레이션과 실험결과 다르게 나타났다.

또한, 식 (4.5)에 의하여 계산된 하강 속도에 실험에 의하여 얻어진 구역별 길이를 적용해 구한 체류시간과 실제 실험에 의하여 얻어진 체류 시간을 계산하였으며 계산된 체류 시간 식은 다음과 같다.

$$R = l/u_{dr} \quad (4.6)$$

여기서  $R$ 은 체류 시간이고,  $l$ 은 구역의 길이이며  $u_{dr}$ 은 하강 속도이다. 그림 4.15은  $r/R = 0.46$  구역별로 실험에 의하여 얻어진 체류시간과 시뮬레이션에 의하여 구해진 체류시간을 비교한 그래프이다. Zone 2의 체류시간은 시뮬레이션과 실험결과가

유사하였지만 Zone 1은 다르게 나타났다. 그림 4.16은  $r/R = 1$ 일 때, 구역별로 체류 시간을 비교한 그래프이다. 그림 4.15와 유사하게 Zone 2에서는 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 유사하였지만, Zone 1에서는 다르게 나타났다. 이 또한 외부와 접촉하는 표면의 영향으로 파악되었다. 위 실험을 토대로 포물선 운동을 하는 droplet은 외부와 접촉하는 표면의 영향도 고려하여야 한다.



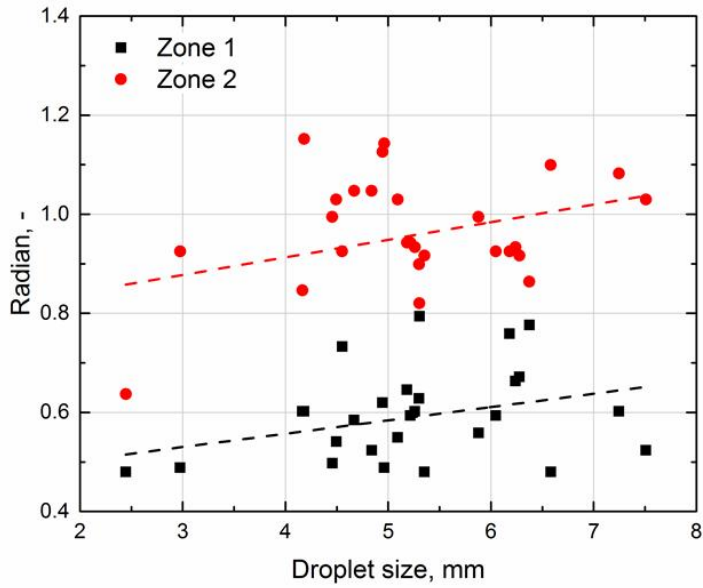


Fig. 4.11 Comparison of descending angle in  $r/R = 0.46$

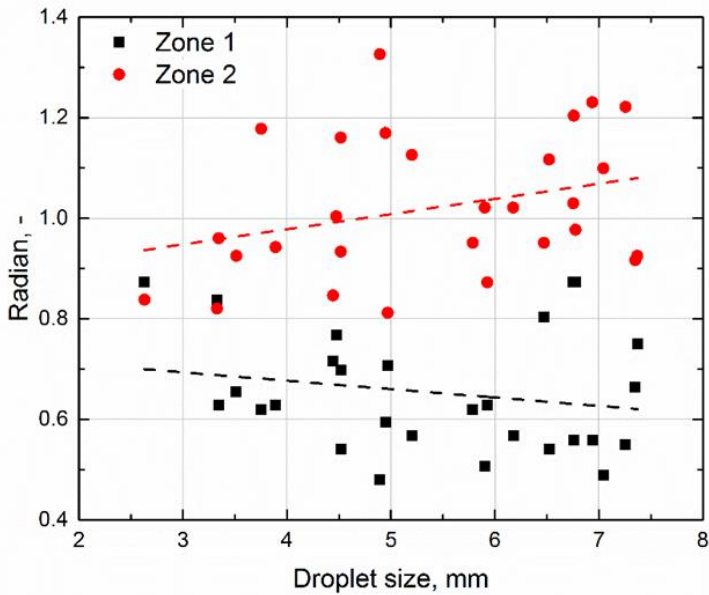


Fig. 4.12 Comparison of descending angle in  $r/R = 1$

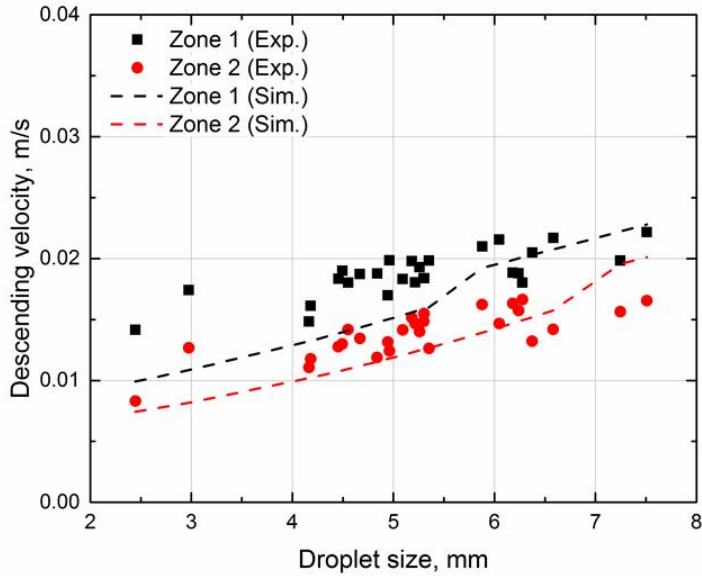


Fig. 4.13 Comparison the descending velocity by zone applying PIV data( $r/R = 0.46$ ).

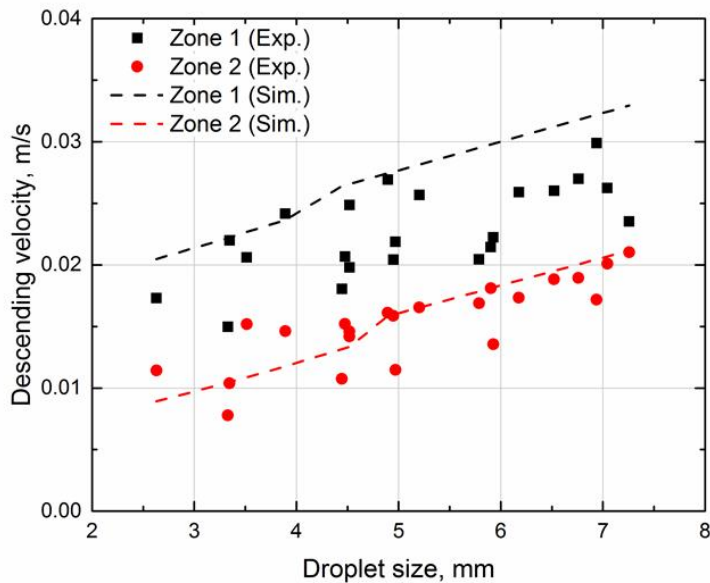


Fig. 4.14 Comparison the descending velocity by zone applying PIV data( $r/R = 1$ ).

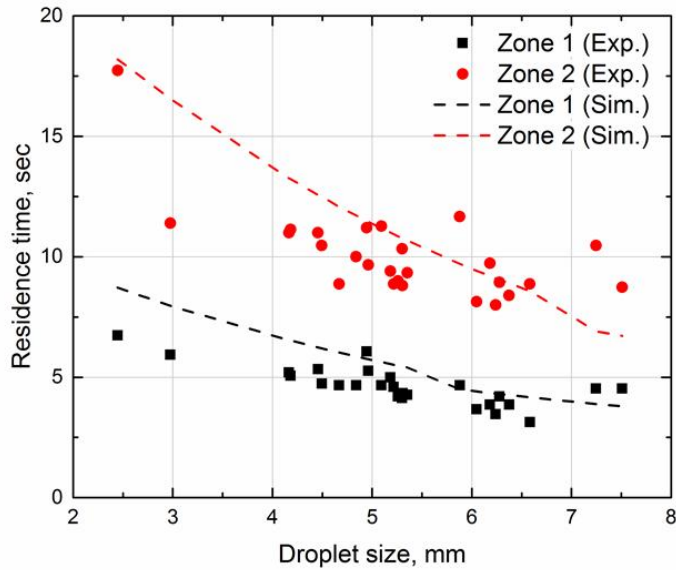


Fig. 4.15 Comparison the residence time by zone applying PIV data( $r/R = 0.46$ ).

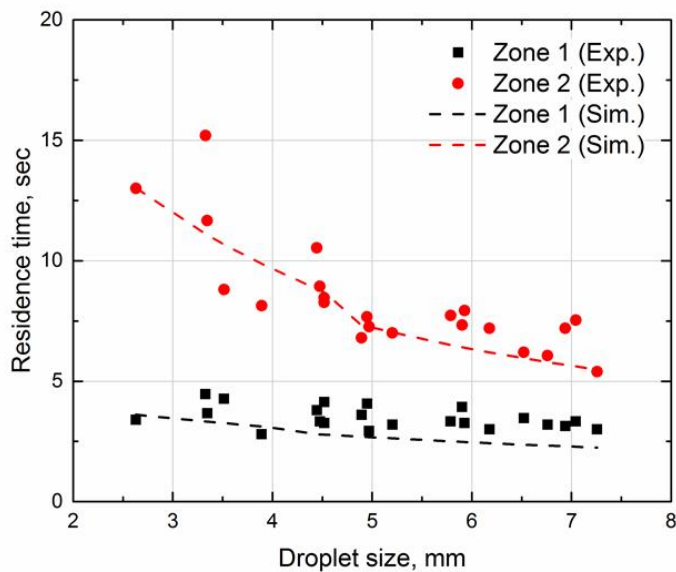


Fig. 4.16 Comparison the residence time by zone applying PIV data( $r/R = 1$ ).

## 제 5 절 유동 상승 운동

### 1. 상승 속도 측정

그림 4.17은 droplet 크기에 따라서 상승 속도를 점도에 따라 표현한 그래프이다. Droplet의 크기를 각각  $1\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$  로 정리하였다. 사각형 표식은 실리콘 오일 I의 상승 속도이고 원형 표식은 실리콘 오일 II의 상승 속도이다. 실리콘 오일의 점도가 낮으면 상승 속도가 빨랐으며 반대로 실리콘 오일의 점도가 높으면 상승 속도가 느렸다. 또한 실리콘 I 과 실리콘 오일 II 모두 droplet의 크기가 크면 하강 속도가 느렸다.

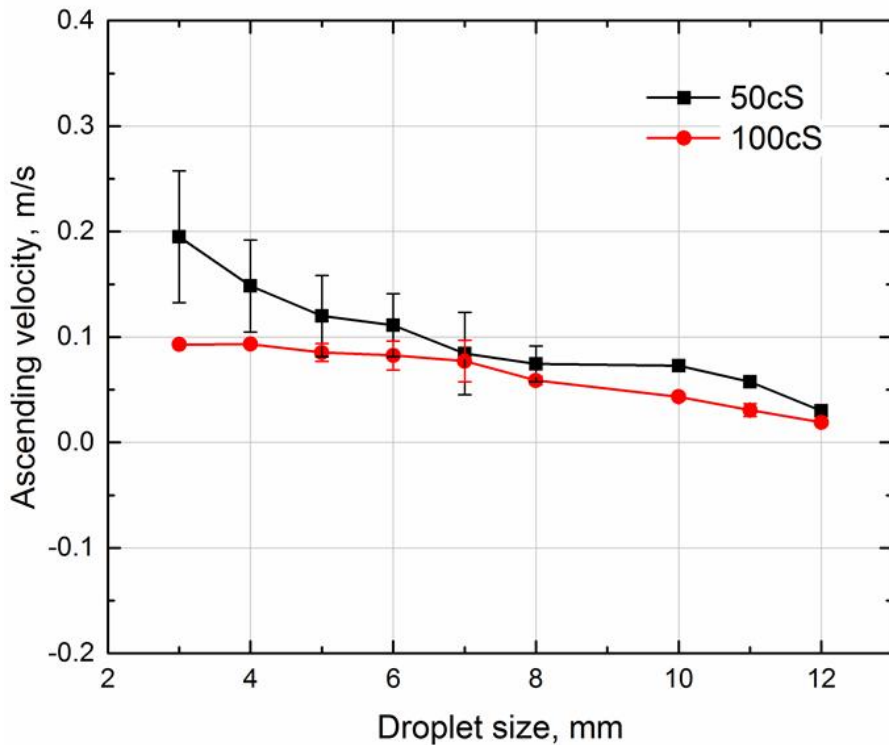


Fig. 4.17 Ascending velocity of flow in silicone oil

## 제 5장 결 론

본 연구에서는 고온 공정에서 관측할 수 없는 droplet의 하강속도를 알아보기 위하여 수 모델을 이용하여 실험을 진행하였다. 실리콘 오일을 슬래그, 증류수를 용강으로 가정하고 실험을 진행하였다. 비유동 실험의 경우 폴리카보네이트 용기에 실리콘 오일을 채운 후 증류수를 떨어뜨려 하강 속도를 측정하였고 시뮬레이션 모델과 비교하였다. 점도에 따른 영향을 알아보기 위하여 총 3가지 종류의 실리콘 오일을 이용하며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Droplet의 크기가 크면 하강 속도는 증가하였고, Droplet의 크기가 작으면 하강 속도가 감소하였다.

2) 실리콘 오일의 점도가 높으면 하강 속도는 감소하였고, 점도가 낮으면 하강 속도가 증가하였다. 이는 제강 공정에서 슬래그의 점도가 높으면 용강으로 이루어진 droplet의 하강 속도가 감소할 것으로 예상된다.

유동 상태의 실험을 진행하기 위하여 수중 펌프를 하부에 설치하여 실험을 진행하였다. 또한 유동에 의한 유체의 유속을 측정하기 위해 PIV 실험을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유동 상태와 비유동 상태는 그 하강 속도가 큰 차이가 있기 때문에 유체의 유속을 고려 하여야한다.

2) 유체의 유속을 시뮬레이션 모델의 상대 속도항에 적용하면 유동 상태에서도 droplet의 하강속도를 예측할 수 있다.

3) 포물선 운동을 하는 droplet은 하강 속도가 계면의 영향을 받으므로 계면의 영향을 고려한 시뮬레이션이 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] B. J. Monaghan, R. J. Pomfret, and K. S. Coley, Metallurgical and Materials Transactions B 29.1, 111-118 (1998).
- [2] J. Lehmann, and M. Nadif, Interactions between metal and slag melts: steel desulfurization, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 73.1, 493-511 (2011).
- [3] G. Reiter, and K. Schewerdtfeger, ISIJ Int. **Vol. 32**, 50 (1992).
- [4] G. Reiter, and K. Schewerdtfeger, ISIJ Int. **Vol. 32**, 57 (1992).
- [5] K. Beskow, P. Dayal, J. Bjorkvall, M. Nzotta, and D.Sichen, Ironmkg Steelmkg. **Vol. 33**, 74 (2006).
- [6] Z. Lin, and R. I. L. Guthrie, Metall. Mater. Trans B. **Vol. 25B**, 855 (1994).
- [7] S, Kobayashi, ISIJ Int. **Vol. 33**, 577 (1993).
- [8] M. Martin, M. Endueles, and M. Diaz, Can. J. Chem. Eng. **Vol. 82**, 249 - 55 (2004).
- [9] M. Iguchi, K. Takahashi, H. Kawabata, K. Sasaki, S. Yokoyama, and H. Kiuchi, ISIJ Int. **Vol. 38**, 1080-85 (1998).
- [10] Q. L. He, and N. Standish, ISIJ Int. **Vol. 30**, 356 - 61 (1990).
- [11] Z. Lin, and R. I. L. Guthrie, Metall. Mater. Trans B. **Vol. 25B**, 855-64 (1994).
- [12] H. Yoshida, J. Liu, S. J. Kim, X. Gao, S. Ueda, and S. Kitamura, ISIJ Int. **Vol. 56**, 1902-09 (2016).
- [13] A. I. V. Dana, M. M. Carmen, B. Liviu, A. Claudiu, B. Anca, and C.

- [14] Nicoleta, Proc. 7th Int. Conf. Interdisciplinarity in Engineering, Elsevier, Amsterdam, 615 (2013).
- [15] Z. Han, and L. Holappa, ISIJ Int. **Vol. 43**, 292 - 97 (2003).
- [16] Z. Han, and L. Holappa, ISIJ Int. **Vol. 43**, 1698-1704 (2003)
- [17] Z. Han, and L. Holappa, Metall. Mater. Trans. B. **Vol. 34B**, 525 - 32 (2003).
- [18] G. Brooks, Geoffrey, Y. Pan and K. Coley, Metallurgical and Materials Transactions B. **36.4**, 525-535 (2005).
- [19] G. Brooks, M. A. Rhamdhani, K. Coley and Y. Pan, Metallurgical and Materials Transactions B. **40(3)**, 353-362 (2009).
- [20] K. Coley, F. Ji, G. Brooks, M. A. Rhamdhani, and Y. Pan, Researchbank. Swinburne. Edu. Au. **65**, 127-140 (2009).
- [21] D. Y. Song, N. Maruoka, G. S. Gupta, H. Shibata, S. Kitamura, and S. Kamble, Metall. Mater. Trans. B. **Vol. 43B**, 973-983 (2012).
- [22] D. Y. Song, G. S. Gupta, N. Maruoka, H. Shibata, S. Kitamura, and V. Rudolph, LIM Int. **Vol.70**, 2027-38 (2017).
- [23] N. Maruoka, D.Y. Song, G. S. Gupta, H. Shibata, and S. Kitamura, J. JSEM. 14 , s200 (2014).
- [24] A. Slaouti and J. H. Gerrard, Journal of Fluid Mechanics. **112**, 297-314 (1981).
- [25] Williamson and Charles HK, Journal of Fluid Mechanics. **206**, 579-627 (1989).
- [26] Williamson and Charles HK, Annual review of fluid mechanics. **28.1**, 477-539 (1996).

[27] W. Thielicke and E. J. Stamhuis, *Journal of Open Research Software* 2 (2014).

[28] Thielicke, W., and E. J. Stamhuis. "PIVlab-Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB (version: 1.35)." *J. Open Res. Software* 2.1 e30 (2014).