

## 기포 저감 장치의 기포입자 유동특성에 따른 수치해석에 관한 연구

문현식<sup>1</sup>, 유영철<sup>1</sup>, 박성영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 일반대학원 기계공학과, <sup>2</sup>공주대학교 기계자동차공학부

### Numerical Study on the Flow Characteristics of Bubble Particles in Bubble Reduction Device

Hyun-Sik Mun<sup>1</sup>, Young-Cheol Yoo<sup>1</sup>, Sung-Young Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

<sup>2</sup>Div. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

**요약** 기포 저감 장치는 기름의 정량 공급과 관련된 문제 해결의 목적을 둔 장치이다. 따라서 본 연구에서는 기포 저감 장치의 작동 중 기포 입자의 크기별 유동특성을 확인하고자 수치해석을 진행하였다. 기초해석을 진행한 결과, 기포의 상승과 하강이 가장 활발하게 나타나는 영역을 발견하였고, 그 지점을 중심으로 수치적 계산을 수행하였다. 수치적 계산에 앞서 각 변수들 간의 동차성을 확보하기 위하여 무차원 유도를 수행하였다. 무차원 유도를 수행한 데이터를 바탕으로 각 입자의 크기별, 유체의 속도별 25개의 변수 조건을 설정하여 별도의 계산을 통해 기포 상승과 하강의 대한 수식을 도출하였다. 각 변수별로 항력과 부력의 비를 계산하여 기포에 작용하는 항력이 부력보다 큰 경우 기포가 하강하며 기포는 저감되지 않는다고 판단하였고, 부력이 항력보다 큰 경우 기포는 상승하며 기포가 저감된다고 판단하였다. 수치 계산 데이터를 바탕으로 유동 해석을 진행하였다. 유동 해석을 통하여 기포의 상승과 하강을 확인하였고, 수치 계산의 결과와도 일치하는 것을 확인하였다.

**Abstract** Bubble reduction devices are intended to solve problems related to the quantitative supply of oil. Therefore, in this study, numerical analysis was conducted to verify the flow characteristics of bubble particles during the operation of a bubble reduction device. As a result of the basic analysis, the area where the rise and fall of bubbles were most active was found, and numerical calculations were performed focusing on the points. Before the numerical calculations, a non-dimensional derivation was performed to secure homogeneity among the variables. Based on the data obtained from non-dimension derivation, 25 variable conditions for each particle size and fluid velocity were set. Through separate calculations, the equation for bubble rise and fall was derived. By calculating the ratio of drag and buoyancy for each variable, if the drag force acting on the bubble was greater than buoyancy, the bubble falls, and bubbles are not reduced. If the buoyancy is larger than drag, the bubble rises, and the bubble is reduced. Through the analysis, the rise and fall of the bubble were confirmed, and the results were consistent with the separate numerical calculations.

**Keywords** : Bubble Particles, Bubble Reduction Device, Buoyancy Force, Drag Force, Two-Phase Flow

\*Corresponding Author : Sung-Young Park(Kongju National Univ.)

email: sungyoung@kongju.ac.kr

Received June 25, 2020

Accepted October 5, 2020

Revised September 14, 2020

Published October 31, 2020

## 1. 서론

유체 내에서 움직이는 입자/기포 문제는 많은 자연계나 공학현상에서 빈번하게 관찰된다. 유체 내 입자/기포는 항력에 따라 거동이 달라진다. 그러므로 입자/기포에 대한 항력을 정확히 이해하는 것은 오랫동안 중요한 유체역학적 문제 중 하나로 다루어져 왔다. 항력계수는 유체의 속도, 밀도 등의 영향을 받게 되는데, 이러한 유동의 특성에 따라 항력계수가 달라지며 따라서 유동저항도 증가하거나 감소하게 된다[1-3].

유체 내 난류 기포 유동 즉, 2상 유동 현상은 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 자유 표면 모델링 기법 (Volume of fluid)와 레벨 설정 방법(Level set method) 등을 이용한 인터페이스 트래킹 해석은 많은 시간이 필요하기 때문에 2상 유동 모델을 이용한 방법이 주로 사용된다. 단상 유동에 비해 2상 유동 해석에는 질량, 운동량 및 에너지 교환과 관련된 두 상간의 상호작용에 대한 모델링이 필요하다. 또한, 2상 기포류 유동은 액체와 기체가 공존하는 유동으로 다양한 산업의 유체시스템에서 공통적으로 나타난다. 2상 기포류 유동 내 기포는 액체상과 상호작용하며 유동 특성을 바꾸는 역할을 하기 때문에, 매우 복잡하게 거동하는 기포를 추적하며 기포와 주위 액체상과의 상호작용에 대한 연구가 필요하다[4-7].

기포가 유동장에 미치는 통계적 영향이 광범위하게 연구되었음에도 기포자체의 거동에 관한 연구는 미비했다. 이는 기포 표면의 변형과 궤적의 불안정성, 그리고 수많은 기포가 존재하는 유동장에서 각 기포를 추적하며 기포의 거동을 측정하기가 어렵기 때문이다[8]. 따라서 본 연구에서는 기름 운송용 탱크로리와 주유소 저장탱크 사이에 기름 공급 시 유입되는 기포를 저감시키는 장비를 설계함에 있어, 성능에 가장 민감한 영향을 미치는 부위에 대한 분석을 수행하고자 하였다. 이를 통하여 향후 장비 설계를 위한 기초데이터를 확보하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 연구방법

#### 2.1.1 유동특성 분석

Fig. 1.은 본 연구에서 사용된 기포 저감 장치를 보여주고 있다. 기포 저감 장치는 기름의 정량 공급과 관련된 문제 해결의 목적을 둔 장치이다. 장치는 기름 공급 라인

중에 설치하여 한 저장장소에서 다른 저장장소로 이송 과정에서 발생하는 기포를 저감하는 것이다.



Fig. 1. Bubble reduction device

Fig. 2.는 기포 저감 장치의 작동원리를 보여주고 있다. 기본적인 장치의 원리는 유체 이송 중 난류를 방지하기 위해 내부 부품인 블레이드를 따라 표면 흐름으로 분산시키고, 내측 벽면을 타고 흐르도록 하여 기포 발생을 억제하며, 모든 과정을 거치고 포집된 기포는 내부 압력이 일정 수준을 넘어서면 상부로 배출시키는 기능을 갖춘 장치이다.

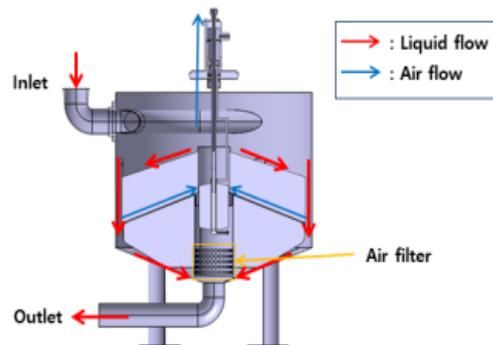


Fig. 2. Principle of mechanical motion

기초연구로 기포 저감 장치의 유동해석을 진행하였다. 유동해석은 장치의 역설계를 통해 유동영역을 추출한 후 해석을 진행하였으며, 유동 분포 경향을 확인하였다. Fig. 3.은 기포 저감 장치의 3D 모델을 보여주고 있다.

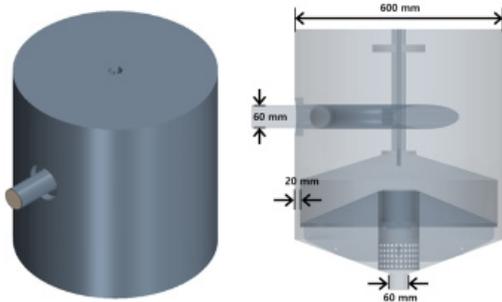


Fig. 3. 3D model of bubble reduction device

유동해석은 상용 소프트웨어인 STAR CCM+<sup>9)</sup>을 사용하였다. 해석은 약 543만개의 Trim 유동계산 격자와 0.005 m<sup>3</sup>/s의 작동유량 조건으로 해석을 진행하였다. Fig. 4.는 유동해석결과를 보여주고 있다. 해석은 기포 저감 효율이 내측 벽면을 타고 흘러내려가는 부분에서 가장 활발하게 나타난다고 판단하여 Fig. 4.의 A영역 유동을 중점적으로 확인하였다. 해석결과 벽면을 타고 내려가는 부분의 유속은 약 0.19 m/s를 나타냈다. 본 연구에서는 기초해석의 결과를 바탕으로, 기포 크기에 따라 해당 영역 내에서의 움직임을 확인하고자 하였다.

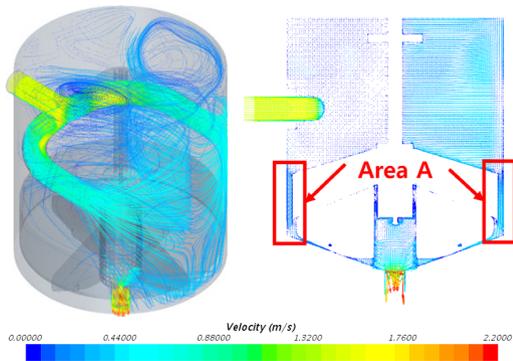


Fig. 4. Basic analysis result

### 2.1.2 측면 유동영역 폭 설계를 위한 무차원수 유도

기포 저감 장치에서 가장 중요한 설계부 중 하나는 A 영역이다. 그 이유는 중력방향으로 흐르는 유체와 중력반대 방향으로 상승하려는 기포가 상승하여 제거될 것인지 아니면 하강하여 기포가 배출될 것인지를 결정하는 최소 유동영역이기 때문이다. 따라서 이 유동영역 폭(A 영역)을 일반적으로 결정할 수 있는 무차원 수를 제안하고, 그 의미를 분석하고자 한다.

우선, 부력을 중속변수들로 표현하면 다음과 같다.

$$F_B = f(d, l, V, \mu, \rho) \quad (1)$$

여기서, 부력은  $F_B = \rho g V$ 로 정의되고,  $d$ 는 기포직경,  $l$ 은 유동영역 폭,  $V$ 는 유동속도,  $\mu$ 는 점성,  $\rho$ 는 유체밀도를 의미한다. 이 변수들을 무차원화하면 다음과 같은 무차원식을 얻을 수 있다.

$$\frac{F_B}{F_D} = f_1\left(\frac{l}{d}, Re\right) \quad (2)$$

여기서,  $F_D = \rho V^2 d^2$ 으로 기포의 항력을 나타내고,  $Re$ 는 레이놀즈수를 나타낸다. 이 식을 Fig. 5에 나타낸, 기포의 크기와 속도별 항력 계산결과 그래프에 적용하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{F_B}{F_D} = \frac{C_1}{(l/d)^3 Re^2} \quad (3)$$

여기서  $C_1$ 은 상수이다. 식(3)을 본 연구의 범위에 해당되는  $Re$  수 범위에서 도시화하면 Fig.5와 같다. Fig. 5에서 부력과 항력의 비가 1보다 크면 기포가 상승하여 제거되고, 1보다 작으면 하부로 유입된다고 했을 때, 기포의 제거는  $Re$  수와 A영역의 유동영역 폭  $l$ 에 직접적으로 영향을 받고, 계산될 수 있음을 알 수 있다.

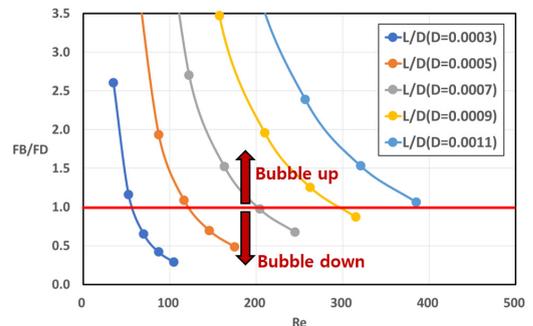


Fig. 5.  $F_B/F_D$  calculation using Eq.(3)

## 2.2 무차원 수식의 검증

### 2.2.1 무차원 수식 검증을 위한 해석방법

무차원화에서 도출한 수식의 타당성을 검증하기 위해 해석을 진행하였다. Fig. 5.의 그래프에서 기포의 하강이 가장 뚜렷하게 나타난 기포 직경 10 mm, 속도 2.5 m/s의 조건과 상승이 가장 잘 나타난 기포 직경 30 mm, 속도 0.5 m/s의 조건 2가지 경우에 대하여 해석을 진행하였다. 해석은 상용 소프트웨어인 STAR CCM+를 사용하

였다. 해석은 기포의 상승 또는 하강이 가장 활발히 일어난다고 판단한 Fig. 4.의 영역 A부분을 중점적으로 해석하였다. 영역 A의 간격과 높이를 측정하여 해당 부분의 3D 모델링을 진행하였다. STAR CCM+ 내의 계산격자 생성 기능을 사용하여 정사각형 계산격자(Trim mesh)를 생성하였다. 계산격자는 약 40만개로 생성되었다. 해석조건은 비정상상태의 난류 유동으로 가정하였으며, 난류모델은 k-epsilon 난류 모델을 사용하였다. 입구 속도 조건은 0.5 m/s와 2.5 m/s로 설정하였으며, 작동유체의 물성치는 Table 1.과 같다. 또한, 이상 유동 수치해석을 위해 STAR CCM+의 Point injector 기능을 사용하여 기포입자를 주입하였다. 이때 기포입자는 각 10 mm, 30 mm로 설정하였다. Fig. 6.은 계산격자 및 해석 조건을 보여주고 있다.

Table 1. Analysis property value

Properties	Value
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	997.561
Dynamic viscosity [Pa·s]	8.8871E-4
Specific heat [J/kg·K]	4181.72

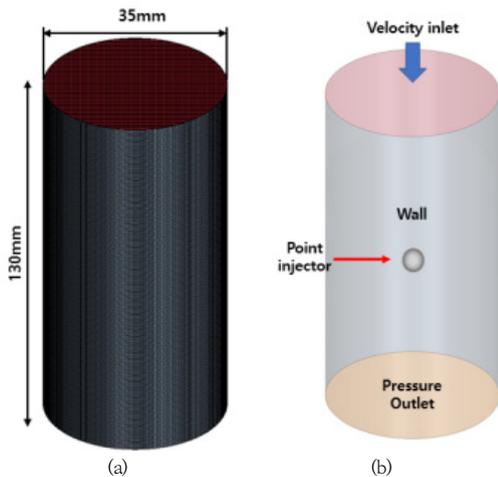


Fig. 6. Pre-processing  
(a) Computational mesh (b) Boundary condition

### 2.2.2 무차원 수식 검증을 위한 해석결과

본 연구에서는 기포입자의 크기와 작용하는 유체의 속도에 따른 기포입자의 움직임을 관찰하였다. Fig. 7.은 기포입자의 움직임을 보여주고 있다. 해석결과 Fig. 7.(a)에서, 10 mm의 기포는 유동방향과 동일한 방향으로 하강

하였다. 이때의 유동 조건을 식(3)에 적용하면  $F_B/F_D = 0.14$ 의 값으로 1보다 작아 하강함을 알 수 있다. 따라서 이러한 조건이라면, 기포는 분리되지 않고 배출구를 따라서 이동하게 된다.

Fig. 7.(b)에서 30 mm의 기포는 상승하였다. 이때의 유동 조건을 식(3)에 적용하면  $F_B/F_D = 10.32$ 의 값으로 1보다 크므로 기포가 상승하여 포집됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 조건에서, 기포는 분리되어 배출되지 않는다.

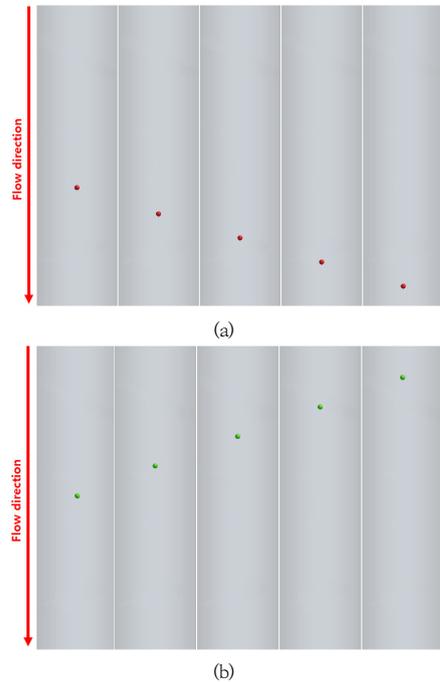


Fig. 7. Analysis result  
(a) Bubble drop (d = 10 mm)  
(b) Bubble rise (d = 30 mm)

## 3. 결론

본 연구에서는 기포 저감 장치의 기포입자 유동특성을 확인하기 위해 계산 및 수치해석을 진행하였다. 계산 및 해석을 통한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기포 저감 장치의 유동특성을 확인하기 위하여 기초 유동해석을 진행하였으며, 내부부품과 벽면 사이의 간격에서 기포의 상승과 하강이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인하였다.
2. 기포입자의 움직임을 파악하기 위하여 수치 계산을 진행하였으며, 부력과 항력, 기포입자의 크기, 유동

영역 폭을 변수로 설정하여 각 변수 간 동차성을 확보하기 위해 무차원화를 하였다. 계산을 통해 변수 간의 관계를 파악하였으며, 기포입자의 상승과 하강 관계식을 도출하였다.

3. 기포입자의 상승과 하강 관계식 검증을 위하여 이상유동 유동해석을 진행하였다. 기포의 상승과 하강이 뚜렷하게 나타나는 두 개의 케이스에 대하여 해석을 진행하였다. 해석결과 계산식에서 확인하였던 상승, 하강 조건을 만족하는 결과를 도출하였다.

4. 본 연구에서 제안한 무차원 식

$$\left(\frac{F_B}{F_D} = \frac{C_1}{(l/d)^3 Re^2}\right)$$

은 향후 기포 저감 장치를 설계 및 제작함에 있어 다양한 형태로 활용이 가능할 것으로 사료된다. 특히, 기포제거장치에서 가장 민감한 성능 설계요소인 최소 유동영역 폭을 결정하는 기초자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Y. E. Lim, J. W. Kim, "Numerical investigation of drag characteristics of spherical particles/bubbles under non-isothermal conditions", Proceedings of Korean Society of Computational Fluid Engineering, pp.45-46, Jul. 2016.
- [2] J. W. Kim, D. J. Kim, "Numerical simulation of turbulent bubbly flows in a vertical pipe using two-fluid models", The Korean Society of Mechanical Engineers Spring conference, pp.206-208, Nov. 2015.
- [3] H. H. Park, Y. E. Yoo, S. H. Chang, "Magnetic capture of particles in rounded pinch-off channel for bubble reduction", Proceedings of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, pp.56-56, Oct. 2015.
- [4] J. B. Lee, H. M. Park, "Bubble and particle mixing behaviors in a gas-solid fluidized-bed", The Korean Society of Mechanical Engineers Spring conference, pp.317-319, Dec. 2018.
- [5] M. H. Kim, B. J. Kim, "Validation of the two-fluid model for vertical bubbly flows", Proceedings of The Korean Society of Visualization, pp.91-92, Apr. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.54071/KSV.2018.16.1.037>
- [6] Y. W. Lee, H. M. Park, "Bubble detection in two-phase bubbly flow with deep learning algorithm", The Korean Society of Mechanical Engineers Spring conference, pp.1093-1097, Dec. 2018.
- [7] H. D. Seo, K. C. Kim, "Direct numerical simulation on turbulent bubbly flow", Proceedings of The Korean Society of Visualization, pp.35-36, Nov. 2018.

- [8] K. Y. Kim, H. C. Choi, "Lagrangian characteristics of bubbles in a turbulent pipe flow", The Korean Society of Mechanical Engineers Spring conference, pp.320-322, Dec. 2018.
- [9] CD-Adapco, "Star-CCM+ ver. 13.04 User Guide", 2018
- [10] M. C. Potter, D. C. Wiggert, "SI Mechanics of Fluids", Cengage Learning, 4th edition, p.225-229, ISBN-13:978-89-6421-234-9
- [11] J. W. Kim, W. H. Lee, H. D. Lee, J. H. Jung, I. J. Hwang, "A numerical study on the behavior of micro bubble in the induced gas flotation", The Society of Convergence Knowledge Transactions Vol. 5, No. 2, pp.113-119, Jul. 2017.

박 성 영(Sung-Young Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부, 정교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

문 현 식(Hyun-Sik Mun)

[준회원]



- 2018년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2020년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

유 영 철(Young-Cheol Yoo)

[준회원]



- 2012년 2월 : 한밭대학교 기계공학과 학사 (공학사)
- 2014년 2월 : 한밭대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 박사과정

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발