

# 수중 고온 단일 기포의 열전달 해석 연구

## (A Study on the Heat Transfer Analysis of High-Temperature Single Bubble in Water)

윤 석 태<sup>1)\*</sup>  
(SeokTae Yoon)

**요 약** 수중에서 발생한 기포는 주변 유체의 밀도와 압력 차이에 의해 상승하는 부력을 받는다. 또한 주변 유체와의 점성, 표면장력, 상승 속도 그리고 크기 차이에 따라 기포의 거동, 형상, 열교환 과정 등이 달라진다. 본 연구에서는 원기둥 수조 내 상승하는 고온 단일 기포의 속도 그리고 열전달 해석에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 이론적 식을 통해 기포의 속도 그리고 온도 등을 계산하여 수치 해석 결과와 비교하기 위한 자료를 설정하였다. 그리고 상용 프로그램으로 수치 해석을 수행하였으며, 격자의 변화에 따른 수치 해석 결과의 안정성을 격자 수렴성 지수 계산을 통해 확인하였다. 수치 해석 결과 단일 기포의 상승 속도와 온도는 최소 격자의 크기가 기포 지름의 1/160이 될 때 수렴성을 보였으며, 온도 감소는 0.05초 이내에 주변 유체와 동일한 수준으로 감소하는 것을 확인하였다.

**핵심주제어:** 단일 기포, 열전달, 시뮬레이션, 전산유체역학, 격자 수렴 지수

**Abstract** Bubbles generated in water receive an upward buoyant force due to the density and pressure difference of the surrounding fluid. Additionally, the behavior, shape, and heat exchange process of bubbles vary depending on the viscosity, surface tension, rising speed, and size difference with the surrounding fluid. In this study, we modeled speed, and heat transfer of a high-temperature single bubble rising in a cylindrical water tank. For this purpose, velocity, and temperature of the bubbles were calculated using theoretical equations, to be compared with numerical simulation results. The numerical analysis was performed using a commercial software, and the stability of the numerical analysis with mesh size was confirmed through calculation of the grid convergence index. The numerical analysis of the rising speed and temperature of a single bubble showed the values to converge when the minimum cell size was 1/160 of the bubble diameter, and the temperature decrease was confirmed to be the same as that of the surrounding fluid within 0.05 seconds.

**Keywords:** Computational fluid dynamics, Grid Convergence Index, Heat transfer, Single bubble, Simulation

\* Corresponding Author: yst31@deu.ac.kr  
Manuscript received October 31, 2023 / revised November 13, 2023 / accepted November 17, 2023  
1) 동의대학교 함정적외선신호연구소, 제1저자 및 교신저자

### 1. 서 론

산업 분야에서 밀도가 서로 다른 유체의 작용

에 관한 문제는 빈번히 발생한다. 일반적으로 유체의 압력, 속도 그리고 온도변화에 기인한 다상유동, 고속 회전체 주변에 발생하는 공동현상 그리고 선박의 마찰저항 감소를 위한 미세기포(Paik et al., 2015) 등이 있다.

수중에서 상승하는 기포의 속도와 형상 추정 에 관한 문제는 전산유체역학 분야에 대표적인 해석사례이다. 따라서, 2차원에서 상승하는 기포의 형상 및 속도 해석에 관한 문제(Ryu et al., 2010; Islam et al., 2015) 이외에도 3차원을 고려한 연구도 활발히 발표되고 있다(Robinson et al., 2004; Zhou et al., 2022).

또한, 수중 기포의 형상은 표면장력에 매우 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Clift et al., 2005). 이에 따라 표면장력을 고려하여 수조 내에서 절단되는 기포의 전산 해석도 소개되었다(Samiei et al., 2011). 그리고 최근 들어 전산 해석 소프트웨어의 발달로 열교환을 고려한 기포 문제(Larimi et al., 2018; Paramanatham, 2018; Yi et al., 2019)도 연구되고 있지만, 기포의 온도 감소에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 원기둥 수조 내 상승하는 고온 단일 기포의 거동, 형상, 속도 그리고 열전달에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 유동 영역의 격자와 시간 간격에 영향을 받는다. 따라서, 격자와 시간 간격 변화에 따른 해석 결과의 민감도와 수렴성을 격자 수렴성 지수(Grid Convergence Index, GCI)로 확인하였다.

그리고 수렴된 해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 선행연구에서 알려진 경험 식으로 추정된 단일 기포의 상승 속도와 형상 결과를 상대 비교하였다. 또한, 시뮬레이션으로 도출된 단일 기포의 온도 감소 결과는 열전달 및 열량 공식을 통해 계산한 이론적인 식과 비교하여 수치 해석 결과의 신뢰성을 확인하였다.

## 2. 이론적 추정

### 2.1 상승 속도 및 형상 추정

수중 기포는 액체와 기체 두 상(phase)의 밀

도 차이에 의해 수면으로 상승하는 힘을 받고, 크기에 따라 작용하는 중력, 부력, 전단력 그리고 표면장력이 달라진다. 그 결과 서로 다른 크기로 나누어져 고유 형상과 동적 특성을 보인다. 상승하는 기포에 관해서는 오랜 기간 다양한 연구가 수행되었으며(Luz et al., 2010), 상승 기포의 형상은 Fig. 1과 같이 구, 타원 그리고 구형 캡(cap) 세 가지의 영역으로 분류된다.

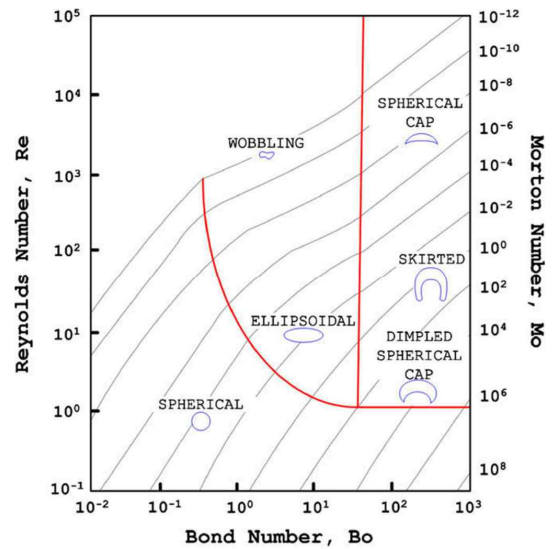


Fig. 1 Shape regime map

기포의 형상은 무차원수에 따라 분류되며 관계식은 다음 식(1), (2), (3)과 같다.

$$Mo = \frac{g\mu^4(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2\sigma^3} \quad (1)$$

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_g)L^2}{\sigma} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho_l VL}{\mu_l} \quad (3)$$

여기서,  $Mo$ 는 유체의 점성과 표면장력의 비율인 모튼 수(morton number),  $Bo$ 는 중력과 표면장력의 비율인 본 수(bond number) 그리고  $Re$ 는 관성력과 점성력의 비율인 레이놀즈 수(reynolds number)이다. 그리고 관계식에서 사용된 변수로  $g$ 는 중력,  $\mu$ 는 점성계수,  $\rho_l$ 는 유

체의 밀도,  $\rho_g$ 는 가스의 밀도,  $\sigma$ 는 표면장력,  $L$ 은 특성 길이 그리고  $V$ 는 속도이다.

기포의 상승 속도와 형상을 추정하기 위해 사용된 계수의 값과 단위를 Table 1에 정리하였다. 점성과 밀도는 모두 기준온도 20°C로 설정하였으며, 표면장력은 IAPWS(International Association for the Properties of Water and Steam)에서 제공하는 식(4)을 사용하였다.

Table 1 Properties of parameter

Parameter	Value	Unit
Gravity	9.81	$m/s^2$
Viscosity( $\mu$ )	Air	$1.813 \times 10^{-5}$
	Water	$1.001 \times 10^{-3}$
Density( $\rho$ )	Air	1.204
	Water	998.19
Surface tension( $\sigma$ )	0.0727	$N/m$

$$\sigma = 235.8 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1.256} \left[1 - 0.625 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)\right] \quad (4)$$

여기서,  $T$ 는 온도  $T_c$ 는 임계온도이며, 각각 20°C 그리고 374°C(절대온도 647.1K)를 사용했다.

또한, 식(3)을 계산하기 위해 선행연구에서 제시한 다음 식(5)을 사용하였다(Luz et al., 2010).

$$V = \sqrt{\frac{2.14\sigma}{\rho_l L_0} + 0.505g L_0} \quad (5)$$

여기서,  $L_0$ 는 특성 길이로 본 연구에서는 기포의 크기를 임의로 5mm로 설정하였다.

본 연구에서 설정한 계수와 선행연구를 통해 제시된 식을 계산하여 기포의 상승 속도와 형상을 추정하였다. 그 결과 기포의 상승 속도는 0.29m/s 그리고 형상은 완전한 구에서 타원 그리고 최종적으로 워블링(wobbling)으로 변할 것으로 예상하였다.

## 2.2 온도 감소 추정

열량 및 열전달 공식을 이용하여 수중 고온 단일 기포의 온도 감소를 계산하기 위해서는 적절한 가정이 필요하며, 본 연구에서는 다음과 같이 설정하였다.

첫째, 기포는 언제나 완전한 구의 형태를 유지한다. 둘째, 밀도와 부피는 이상기체상태방정식에 따라 변화한다. 셋째, 대류에 의한 영향은 무시한다. 넷째, 경계면을 통한 열에너지 전달은 기포 내의 전체 온도에 영향을 준다. 마지막으로 수조 내의 유체 온도는 항상 같은 온도를 유지한다.

이러한 가정은 이론해를 계산하기 위한 이상적인 조건으로 Fig. 2에 이에 대한 개념을 보였다.  $D$ 는 기포의 지름이고  $\Delta x$ 는 반지름으로 열전달 공식을 사용하기 위한 두께이다.

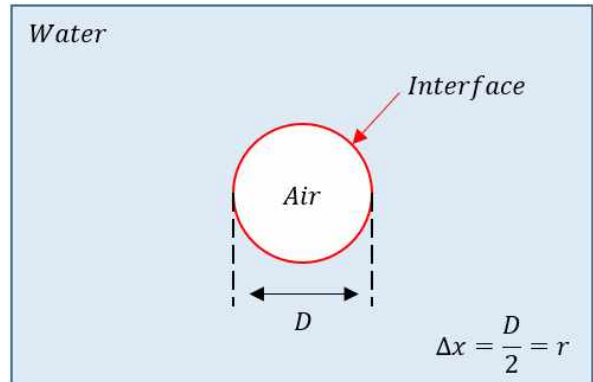


Fig. 2 Concept for theoretical solution

### 2.2.1 계산 공식

이론해를 계산하기 위해서는 본 연구에서 제시한 가정을 만족시키는 여러 공식이 필요하다. 먼저, 기포는 언제나 완전한 구의 형태를 유지하므로 구의 부피와 면적을 계산하는데 다음 식(6)과 식(7)을 사용하였다.

$$A_{sphere} = 4 \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi \quad (6)$$

$$V_{sphere} = \frac{4}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 \pi \quad (7)$$

여기서,  $A$ 는 면적,  $D$ 는 기포 직경,  $\pi$ 는 원주율 그리고  $V$ 는 부피이다. 기포 밀도는 이상기체상태 방정식에 따라 변화하며, 식은 다음(8)과 같다.

$$\rho = \frac{P_{atm}}{RT} \quad (8)$$

여기서,  $P_{atm}$ 은 표준대기압,  $R$ 은 기체 상수,  $T$ 는 절대온도이다. 마지막으로, 경계면을 통한 열에너지 양과 온도 감소를 계산하기 위한 공식은 다음 식(9)과 식(10)을 사용하였다.

$$Q_{conduction} = kA \frac{(T_{air} - T_{water})}{\Delta x} \quad (9)$$

$$\Delta T = \frac{Q_{conduction}t}{mC_p} \quad (10)$$

여기서,  $Q$ 는 열전도에 의한 열에너지,  $k$ 는 열전도율,  $T$ 는 온도,  $\Delta x$ 는 기포의 반지름,  $t$ 는 시간 간격,  $m$ 은 질량 그리고  $C_p$ 는 비열이다.

### 2.2.2 계산 알고리즘

수중 고온 단일 기포의 온도 변화량은 일련의 절차에 따라 계산할 수 있다. 가장 먼저 기포 크기와 온도 그리고 물의 온도를 설정해야 한다. 본 연구에서는 기포의 크기를 2~10mm까지 2mm 간격으로 설정하였으며, 기포의 온도와 물의 초기 온도를 각각 450℃ 그리고 20℃로 하였다.

계산 과정에 필요한 비열, 전도율, 밀도, 경계면적 그리고 부피는 기포의 온도에 따라 달라진다. 따라서 기포와 물의 초기 온도에 물성값을 설정한 후 경계면을 통한 열에너지 전달량을 식 4를 이용해 계산한다. 그리고 식 5를 이용해 일정 시간이 지난 뒤의 기포의 온도변화를 계산한다. 계산 결과는 수렴성을 확인하고 수렴되지 않으면 물성값을 업데이트한 후 반복 계산을 수행하였다.

## 3. 수치 해석

본 연구에서는 유동 해석 전용 프로그램인

STAR-CCM+ 16.04를 사용하였다. 그리고 해석을 위해 프로그램에서 제공하는 3차원 형상 정보 수정기능과 자동 격자 생성기능을 사용하여 해석모델을 3차원으로 구현하였다.

유동 해석의 지배방정식으로 사용한 연속방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식의 형태는 다음식 (11), (12), (13)과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \otimes \vec{v}) = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (12)$$

$$\rho \frac{dH}{dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (k \nabla T + \vec{\tau} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + q_H \quad (13)$$

### 3.1 형상 및 격자 조건

본 연구에서 고려한 해석 형상을 Fig. 3에 보였다. 수조 내의 고온 단일 기포는 부력과 전단

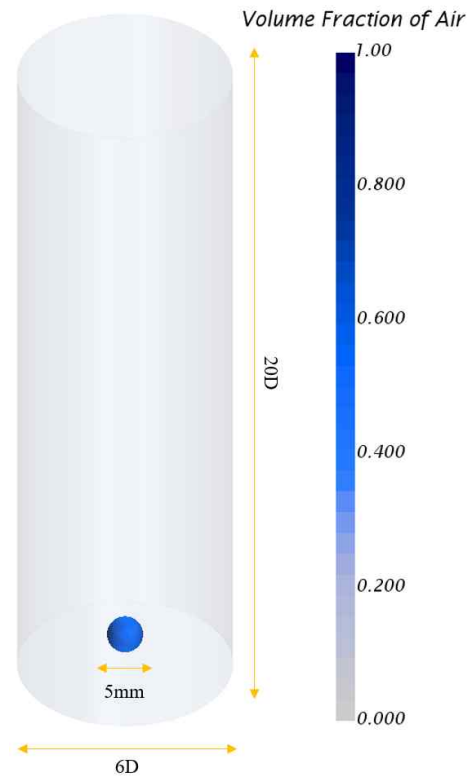


Fig. 3 Geometry of simulation

력에 의해 더 이상 나누어지지 않도록 5mm로 설정하였으며, 수조는 기포 크기에서 가로 6배 세로 20배가 되도록 설정하였다.

두 유체의 상호 작용에 관한 문제 해석은 경계면의 격자 조건에 영향을 받으며, 모든 유동 영역에 조밀한 크기의 격자가 생성되면 매우 많은 해석 시간이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 해석 프로그램에서 제공하는 AMR(Adaptive Mesh Refinement) 기능을 사용하여 격자를 구성하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

격자 조건에서 D는 기포의 크기로 5mm이며, 수준(level)이 올라갈수록 격자의 수가 증가하고 최소 격자의 크기가 작아지도록 하였다.

Table 2 Grid condition (unit of size : mm)

Level	Size	Number of Grid ( $\times 10^3$ )	Minimum Cell ( $\times 10^{-4}$ )
1	D/20	87	2500
2	D/40	126	1250
3	D/80	280	625
4	D/160	881	312.5
5	D/320	3278	156.25

### 3.2 시뮬레이션 해석 조건

수중 상승하는 기포를 해석하기 위해서는 유동 영역에 두 개 이상의 매질을 고려할 수 있도록 다상유동 모델을 사용해야 한다. 또한, 고온 기포가 주변 유체와 열교환을 하고 이에 따라 체적 변화를 고려할 수 있는 해석 조건이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 조건을 고려하기

Table 3 Physics condition for simulation

Space	Three Dimensional
Time	Implicit unsteady
Material	Eulerian Multiphase
Flow	Segregated flow
Equation of state	Ideal gas
Energy	Segregated energy
Viscous regime	Laminar
Other models	Gravity

위해 이상기체 상태 방정식과 열전달 모델을 고려하였으며, 이에 대한 조건을 Table 3에 정리하였다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 이론해 결과

열전달 및 열량 공식을 이용하여 5mm 크기의 단일 고온 기포의 이론적 온도 감소 결과를 Fig. 4에 보였다. 초기 기포의 온도를 450°C로 그리고 주변 유체의 온도를 20°C로 설정하였을 때 기포의 온도는 약 0.1초 만에 주변 유체의 온도와 수렴하였다.

또한 이론식을 바탕으로 기포의 크기를 5mm에서 50mm까지 점진적으로 증가시킨 경우에도 5초 이내에 주변 유체와 유사한 수준으로 온도가 감소하였다.

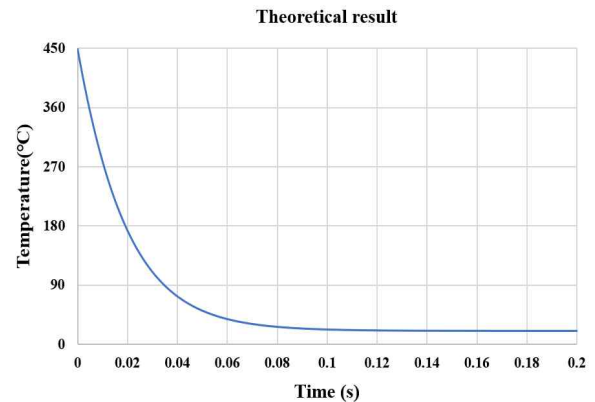


Fig. 4 Temperature result base on theory

### 4.2 수치 해석 결과

수치 해석 결과는 격자의 수에 매우 민감하게 변화하기 때문에 격자 수렴성 지수를 산출하여 해석 결과의 안정성과 민감도를 확인하였다. 본 연구에서는 낮은 차수에서 고차를 추정하는 Richardson Extrapolation 방법(Roache, 1994)을 활용하였으며, 속도와 온도 해석 결과에 대해 각각 추정을 수행하였다.

#### 4.2.1 속도 수렴성 결과

시뮬레이션에서 산출된 속도 결과를 사용하여 고차를 추정된 결과를 Fig. 5에 보였다. Table 2의 격자 조건을 참고하여 격자의 수가 수준 1에서 5로 증가할수록 기포의 상승 속도가 약 1.15 m/s 수준으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그리고 (3, 4, 5)의 결과를 사용하여 고차를 추정된 결과에서 수렴성을 보여 기포의 상승 속도는 D/160 수준에서 안정적인 값을 갖는 것으로 분석하였다.

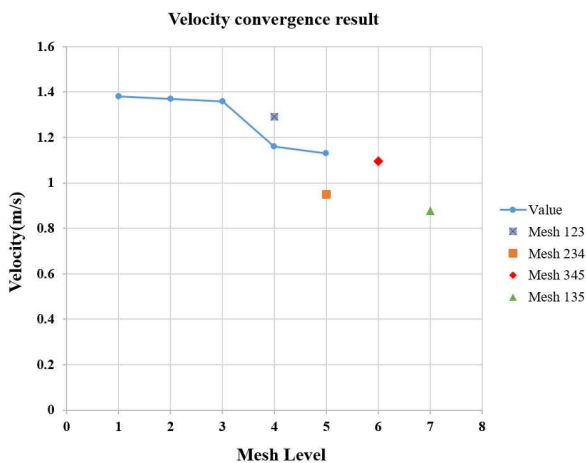


Fig. 5 Velocity convergence result

#### 4.2.2 온도 수렴성 결과

속도 수렴성과 마찬가지로 수치 해석을 통해 계산된 온도 결과를 사용해 고차를 추정된 결과를 Fig. 6에 보였다. 온도 결과 또한 격자의 수

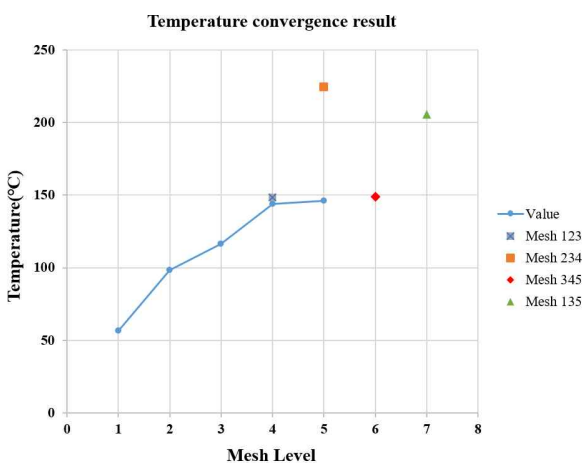


Fig. 6 Temperature convergence result

준이 1에서 5로 증가할수록 약 150°C로 수렴하는 것을 보였다. 그리고 (3, 4, 5)의 결과를 사용하여 고차를 추정된 결과도 수렴성을 보여 온도 또한 D/160에서 수렴하는 것을 알 수 있었다.

수치 해석을 통해 계산된 기포의 상승 속도와 온도를 고려해 식(1)에서 (3)의 값을 계산한 결과 기포의 형상은 시간이 변화에 따라 초기 완전한 구에서 wobbling으로 변하는 것을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 원형 수조 내 상승하는 고온 단일 기포의 거동, 형상, 속도 그리고 온도 감소에 관한 연구를 수행하였으며, 본 내용의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

첫째, 수조 내 상승하는 단일 기포의 속도와 형상을 선행연구를 통해 제시된 경험 식을 통해 추정하였으며, 상승 속도는 0.29m/s 그리고 형상은 wobbling으로 변할 것으로 예상하였다.

둘째, 고온 단일 기포의 온도 감소 경향을 이론적으로 추정하기 위해 이상적인 가정을 제시하였다. 그리고 열전달 및 열량 공식으로 기포의 크기가 5mm일 때 약 0.1초 이내에 주변 유체의 온도와 유사한 수준으로 감소하는 것을 확인하였다.

셋째, 수치 해석 결과는 격자 조건에 매우 큰 영향을 받기 때문에 격자의 수준을 5개로 설정하였으며, 상승하는 고온 단일 기포의 열전달에 의한 부피 변화 및 다상유동을 고려한 해석 조건을 설정하였다.

넷째, 수치 해석 결과의 안정성과 민감도를 확인하기 위해 격자 수렴성 지수를 활용하였으며, 속도와 온도 해석 결과 모두 D/160에서 수렴성을 보였다.

향후 연구에서는 본 연구의 결과를 활용하여 수중 운동체에서 배출되는 다량의 고온 기포를 고려한 시뮬레이션을 수행할 예정이며, 더 나아가 수면으로 배출되는 기체의 온도, 수면의 열분포 항적 그리고 피격 성능 추정에 관한 연구를 수행할 예정이다.



## References

- A. B. Luz, T. H. Lee (2010). Single bubble rising dynamics for moderate Reynolds number using lattice Boltzmann method, *Computers and Fluids*, 39.
- A. J. Robinson, R. L. Judd(2004). The dynamics of spherical bubble growth, *Journal of Heat and Mass Transfer*, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.023>
- B. G. Paik, G. T. Yim, K. S. Kim, K. Y. Kim, Y. C. Kim (2015). Visualization of Microbubbles Affecting Drag Reduction in Turbulent Boundary Layer, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(4), <https://dx.doi.org/10.3744/STAK.2015.52.4.356>
- Ehsan Samiei, Mehrzad Shams, Reza Ebrahimi(2011). A novel numerical scheme for the investigation of surface tension effects on growth and collapse stages of cavitation bubbles, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 30, 41-50, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2010.09.002>
- M. M. Larimi, A. Ramiar (2018). Two-dimensional bubble rising through quiescent and non-quiescent fluid : influence on heat transfer and flow behavior, *International Journal of Thermal Sciences*, 131, 58-71, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.031>
- M. T. Islam, P. Ganesan, J. N. Sahu, M. N. Uddin, A. Mannan (2015). A Single Air Bubble Rise in Water : A CFD study, *Mechanical Engineering Research Journal*, 9, 1-6.
- P. J. Roache(1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies, *Journal of Fluids Engineering*, 116, <https://doi.org/10.1115/1.2910291>
- R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber(2005). *Bubbles, Drops and Particles*, Academic press.
- S. S Paramanantham, C. T. Ha, W. G. Park (2018). Numerical investigation of single and multiple bubble condensing behaviors in subcooled flow boiling based on homogeneous mixture model, *International Journal of Mechanical Sciences*, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.040>
- S. Y. Ryu, C. T. Park, S. Y. Han, S. H. Ko (2010). Two-dimensional Numerical Simulation of the Rising Bubble Flows Using the Two Phase Lattice Boltzmann Method, *International journal of fluid machinery and systems*, 13(4), 31-36, <https://doi.org/10.5293/KFMA.2010.13.4.031>
- T. H. Yi, Z. S. Lei, J. F. Zhao (2019). Numerical investigation of bubble dynamics and heat transfer in subcooling pool boiling under low gravity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 1176-1186, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.096>
- Z. Zhou, X. Cheng, K. Peng, L. Zhang, X. Shao (2022). Numerical study on the deformation of a gas bubble in uniform flow, *Ocean Engineering*, 254, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111164>.



**윤 석 태 (SeokTae Yoon)**

- 정회원
- 동의대학교 조선해양공학과 공학사
- 동의대학교 조선해양공학과 공학석사
- 부산대학교 조선해양공학과

공학박사

- (현재) 동의대학교 부설 함정적외선신호연구소 연구교수
- 관심분야: 열유체, 전산유체역학, 함정특수성능