

# 수직 기포류 수치해석을 위한 2유체 모델 검증

김명호\* · 김병재\*†

## Validation of the Two-fluid Model for Vertical Bubbly Flows

Myung Ho Kim\* and Byoung Jae Kim†

**Abstract** The two-fluid model is widely used for practical applications involving multi-phase flows in chemical reactor, nuclear reactor, desalination systems, boilers, and internal combustion engine. There are several modeling terms in the two-fluid model, which must be determined properly. This study suggests the best models for turbulent vertical bubbly flow.

**Key Words** : Bubbly flow(기포류), Two-fluid model(2유체 모델)

### 1. 서론

기포류는 자연 현상이나 공학적인 문제에서 자주 일어나는 기체-액체 2상유동이다<sup>(1)</sup>. 2상유동 수치해석은 크게 1유체(one-fluid) 모델을 이용하는 방법과 2유체(two-fluid) 모델을 이용하는 방법이 있는데, 두 방법은 격자와 계면의 상대적인 크기에 의해 결정된다. 한 격자 내에 많은 기포가 있는 경우에는 2유체 모델을 사용한다.

2유체 모델은 기본적으로 시간 또는 공간 평균 방법에 기초를 두고 있다. 따라서 다수의 모델링 항이 존재하며, 각 모델링 항의 정확도를 개선하기 위해 많은 연구들이 수행되어 왔다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 수직 난류 기포류를 해석하기 위한 최적의 2유체 모델과 값을 제시하고자 한다. 이

를 통해 얻어진 결과는 향후 복잡한 2상유동 해석에 사용될 예정이다.

### 2. 수치해석 방법

#### 2.1 2상-유동 모델

상변화가 존재하지 않는 2상유동에 대한 2유체 운동량 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\alpha_k \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k + \boldsymbol{\tau}_k^{Re})] + \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + \mathbf{M}_{ik} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}_{ik}$ 는 기체와 액체 사이의 운동량 전달 항으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}_{ik} = \mathbf{f}_D + \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_{WL} + \mathbf{f}_{TD} + \mathbf{f}_{VM} \quad (2)$$

$\mathbf{f}_D, \mathbf{f}_L, \mathbf{f}_{WL}, \mathbf{f}_{TD}, \mathbf{f}_{VM}$ 는 각각 계면마찰 (interfacial

† School of Mechanical Engineering,  
Chungnam National University  
E-mail: bjkim@cnu.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering,  
Chungnam National University

drag), 양력(lift), 벽면윤활(wall lubrication), 난류분산(turbulent dispersion), 가상질량(virtual mass)에 의한 힘을 나타낸다.

본 연구에서는 Grace 모델<sup>(3)</sup>을 사용하여 계면마찰을 계산하였다. 이 모델은 크기가 큰 기포의 형상이 시간에 따라 변할 때 추천되는 모델이다. 또한 Tomiyama 모델<sup>(4)</sup>을 사용하여 기포에 작용하는 양력을 계산하였다. 이 모델은 양력의 크기와 방향이 기포 직경에 따라 변하는 특징이 있다. 벽 근처 기포에 작용하는 벽면 윤활력을 계산하기 위해 Antal 모델<sup>(5)</sup>을 사용하였다. 본 연구에서는 이 모델의 계수 값으로 Colombo et al. (6)이 제안한 값 ( $C_{w,1} = -0.055$ ,  $C_{w,2} = 0.09$ )을 사용하였다. 기포에 작용하는 난류분산 힘은 Burns 모델<sup>(7)</sup>을 통해 계산하였다.

액체에 대한 난류유동은  $k-\varepsilon$  모델을 사용하였으며, 벽면 조건으로 벽 함수(wall function)을 주었다. 또한, 기포 기인 난류유동 (bubble-induced turbulent)을 고려하기 위해 Sato 모델<sup>(8)</sup>을 사용하였다. 상기 언급한 각 모델의 자세한 사항은 해당 문헌을 통해 알 수 있다.

## 2.2 유동 조건

선택한 모델의 타당성을 검증하기 위해 수직 원형관과 사각채널에서의 기포류를 모의하였다. 원형관의 경우에는 총 6 가지 경우에 대한 실험을 모의하였다. Table. 1과 Table. 2는 Wang과 Yao (9), Fu (10), Hibiki et al. (11), Lucas et al. (12)의 실험 유동 조건을 보여준다. 여기서  $j_w$ ,  $j_a$ ,  $\alpha_g$ ,  $d_b$ 는 각각 물의 겉보기속도, 공기의 겉보기속도, 평균 기포율, 기포크기이다.

Wang과 Yao (9)은 직경 57.15 mm, 길이 3 m의 수직 원형관에서 기포류 실험을 수행하였으며, 이 실험에서는 기포가 벽면에 밀집하는 wall peaking 현상이 나타난다. Fu (10), Hibiki et al.(11), Lucas et al. (12)는 각각 직경 48.3 mm, 50.8 mm, 51.2 mm에 길이 2.922 m, 3 m, 3.38 m의 수직 원형관에서 실험을 수행하였다. Fu (10) 실험에서는 기포가 유로 중앙에 밀집하는 core peaking 현상이 나타난다.

**Table 1.** Flow conditions (Wang과 Yao (9))

Case	$j_w$ [m/s]	$j_a$ [m/s]	$\alpha_g$	$d_b$ [m]
W1	0.71	0.1	0.1	0.003
W2	0.94	0.4	0.202	0.003
W3	0.43	0.4	0.383	0.003

**Table 2.** Flow conditions

(Fu (10), Hibiki et al. (11), Lucas et al. (12))

Case	$j_w$ [m/s]	$j_a$ [m/s]	$\alpha_g$	$d_b$ [m]
Fu	2.607	1.275	0.257	0.0093
Hibiki	0.491	0.0556	0.1	0.0025
Lucas	0.405	0.0111	0.0189	0.0045

Table. 3은 Krepper et al. (13)이 수행한 사각채널에서의 수직 기포류 유동조건을 보여준다. 사각채널의 가로, 세로, 높이는 각각 0.1 m, 0.02 m, 1.0 m이다.

**Table 3.** Flow conditions (Krepper et al. (13))

$j_w$ [m/s]	$j_a$ [m/s]	$\alpha_g$	$d_b$ [m]
0	0.01	0.05	0.003

## 3. 결과

### 3.1 수직 원형관

Figs. 1 ~ 3은 각각 W1, W2, W3에 대한 유로 출구에서 수치해석 기포율 분포와 실험 기포율 분포를 비교한 그림이다. 동그라미 기호는 실험결과이고 실선을 수치해석 결과를 나타낸다.  $x$  축은  $r/R$  로, 유로 중심부터 반경 방향 거리( $r$ )를 유로 반경( $R$ )으로 나눈 값이다. 세 경우 모두 wall peaking 현상이 잘 모의하고 있다.

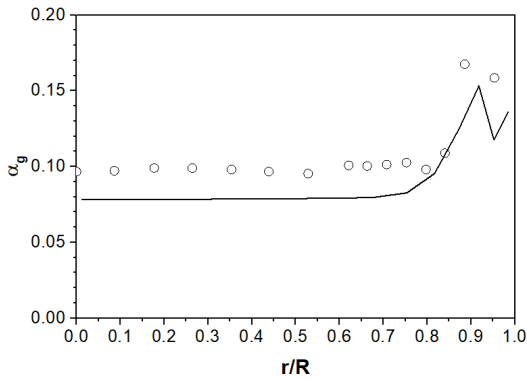


Fig. 1. Comparison of void fraction profiles for W1

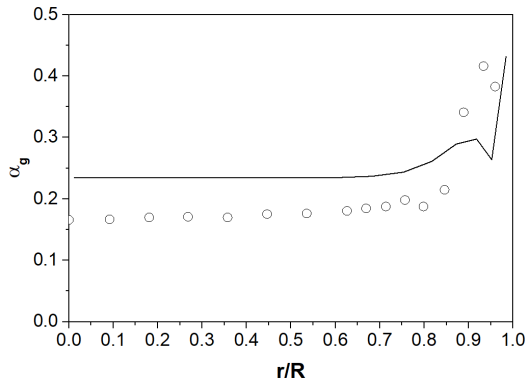


Fig. 2. Comparison of void fraction profiles for W2

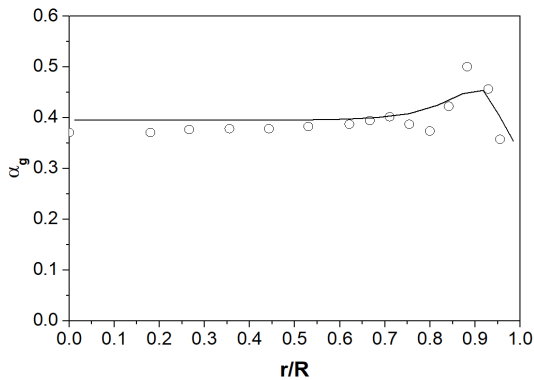


Fig. 3. Comparison of void fraction profiles for W3

Fig. 4은 Fu 실험 데이터에 대하여 수치해석 결과를 비교한 그림이다. 큰 기포 직경으로 인한 core peaking 현상이 수치해석으로 잘 예측되고 있다. 이는 기포 크기에 따라 기포에 작용하는 양력 방향을 결정할 수 있는 Tomiyama 모델(4)을 사용하

였기 때문이다. Fig. 5와 6은 각각 Hibiki와 Lucas 실험 데이터에 관한 것으로, 수치해석과 실험이 잘 일치함을 볼 수 있다.

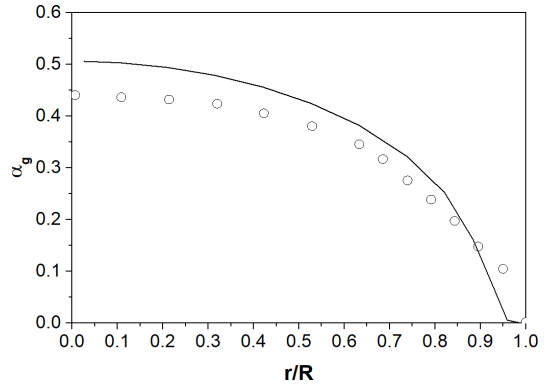


Fig. 4. Comparison of void fraction profiles for Fu

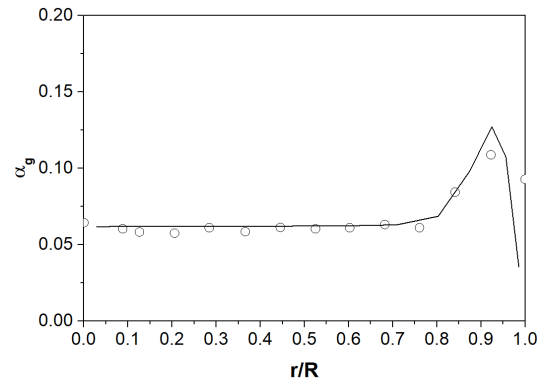


Fig. 5. Comparison of void fraction profiles for Hibiki.

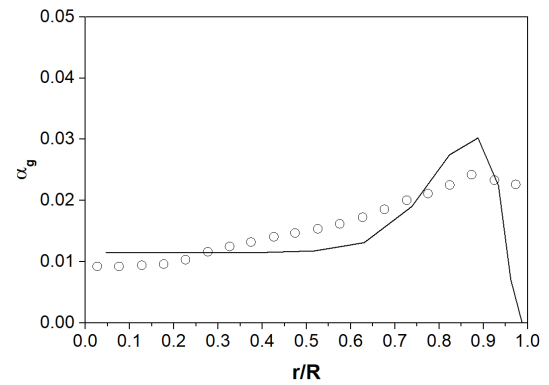


Fig. 6. Comparison of void fraction profiles for Lucas.

### 3.2 수직 사각채널

Krepper et al. (13)은 에 물을 채운 후 채널의 하부 중앙 0.02 m x 0.01 m 면적에서 공기를 분사하였고, 유동가시화와 wire-mesh를 통해 기포거동을 측정하였다. 흥미로운 것은 기포기둥(bubble column)이 주기적으로 움직인다는 것인데, 그 이유는 공기를 채널의 하부 전체에서 분사하지 않고 일부에서 분사하였기 때문이다.

Fig. 7은  $j_w = 0$  m/s이고  $j_g = 10$  mm/s 일 때 수치 해석 결과로, 유로 중앙 단면에서 시간에 따른 기포율 분포를 보여준다. 보는 바와 같이 기포 기둥이 시간에 따라 주기적으로 움직이는 현상이 잘 관찰되고 있다. Fig. 8은 0.63 m 높이 위치 단면에서 시간 평균 기포율 분포를 보여준다. Fig. 9는 Fig. 8의 각  $x$  위치에서  $y$  방향 기포율을 평균한 값을  $x$  방향에 따라 그린 결과이다. 보는 바와 같이 실험과 수치해석이 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

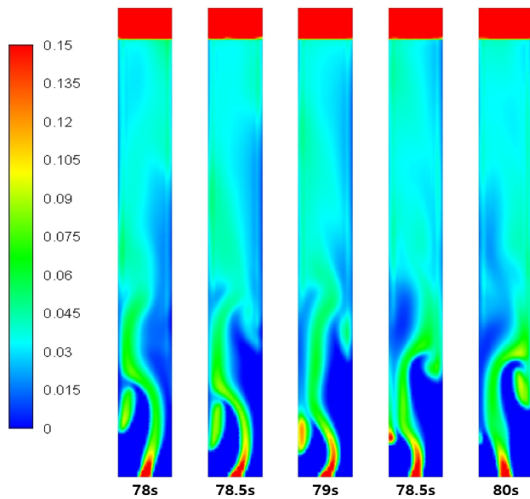


Fig. 7. Instantaneous void fraction distribution in the middle-plane of the rectangular channel.

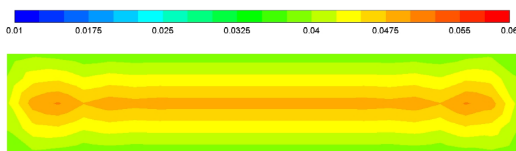


Fig. 8. Time-averaged void fraction at a height of 0.63 m.

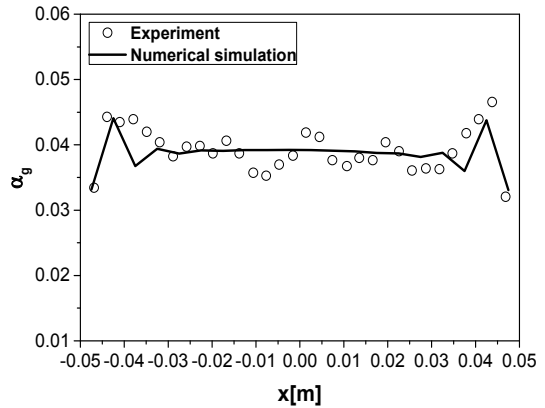


Fig. 9. Line-time-averaged void fraction profiles at a height of 0.63 m

### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 수직 난류 기포류 유동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 2유체 모델을 요약하면 아래와 같다.

- 계면마찰 : Grace et al. (3)
- 양력 : Takamasa and Tomiyama (4)
- 벽면윤활 : Antal et al. (5)
- 난류분산 : Burns et al. (7)
- 기포 기인 난류유동: Sato과 Sekoguchi (8)

원형관과 사각채널 내 수직 난류 기포류를 모의한 결과, 수치해석과 실험이 일치하였다. 본 연구를 통해 제시된 최적의 모델 셋은 향후 복잡한 유로에서의 2상유동을 예측하는데 사용될 예정이다.

### 후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(No. NRF-2018M2A8A4023314)

### REFERENCE

1) Ishii, M. and Mishima, K. 1984, "Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations", Nuclear Engineering and Design, Vol. 82, pp. 107-126.

- 2) Kim, J. W., Kim, D. J., Park, H. M., and Lee, J. H., 2015, "Modeling of interfacial momentum exchange for wall-bounded bubbly flows", NURETH-16, Chicago, IL, August 30-September 4.
- 3) Grace, Clift and Weber., 1978, "Bubbles, Drops, and Particles, Technical Report," Academic Press.
- 4) Takamasa, T. and Tomiyama, A., 1999, "Three-Dimensional Gas-Liquid Two-Phase Bubbly Flow in a C-Shaped Tube," Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). San Francisco, CA.
- 5) Antal, S. P., Lahey, R. T., and Flaherty, J. E., 1991, "Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 7, pp. 635-652.
- 6) Colombo, M. and Fairweather, M., 2015, "Multiphase turbulence in bubbly flows: RANS simulations," International Journal of Multiphase Flow, Vol.77., pp.222-243.
- 7) Burns, A. D. B., Frank, T., Hamill, I., and Shi, J.-M., 2004, "The Favre Averaged Drag Model for Turbulent Dispersion in Eulerian Multi-Phase Flows," Fifth International Conference on Multiphase Flow, ICMF, Yokohama, Japan.
- 8) Sato, Y. and Sekoguchi, K., 1975, "Liquid Velocity Distribution in Two-Phase Bubbly Flow," International Journal of Multiphase Flow, Vol.2, pp.79.
- 9) Wang, Q. and Yao, W., 2016, "Computation and validation of the interphase force models for bubbly flow," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 98, pp.799-813.
- 10) Fu, X., 2001, "Interfacial area measurement and transport modeling in air-water two-phase flow (Ph.D. Thesis)," Purdue University.
- 11) Hibiki, T., Ishii, M., and Xiao, Z., 2001, "Axial interfacial area transport of vertical bubbly flows," International Journal of Heat Mass Transfer, Vol.44 No.10, pp.1869-1888.
- 12) Lucas, D., Krepper, E., and Prasser, H. M., 2005, "Development of co-current air-water flow in a vertical pipe," International Journal of Multiphase Flow, Vol.31, pp. 1304-1328.
- 13) Krepper, E. and Prasser, H. M., 2000, "Measurements and CFX-Simulations of a bubbly flow in a vertical pipe," Adv. Fluid Mech., Vol. 26, pp. 23-32.