

## CFD 코드의 기포류 유동 예측을 위한 기포크기모델 평가

박진영 · 윤병조<sup>†</sup>

부산대학교 기계공학부 원자력시스템 전공

(2015년 12월 1일 접수, 2016년 1월 22일 수정, 2016년 1월 29일 채택)

### Evaluation of Bubble Size Models for the Prediction of Bubbly Flow with CFD Code

Jin-yeong Bak, Byong-jo Yun<sup>†</sup>

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 1 December 2015, Revised 22 January 2016, Accepted 29 January 2016)

#### 요 약

기포크기는 다차원 이상유동에서 정확한 기포거동의 예측을 위해 중요한 인자이다. 현재 CFD 코드인 STAR CCM+에서는 유동채널에서 기포크기예측을 위해 역학적인 기포크기모델인  $S_{\gamma}$  모델을 제공하고 있다. 기포크기 예측을 위한 또 다른 모델로써 고압조건의 과냉 비등 실험인 DEBORA 실험을 바탕으로 개발된 Yun 모델이 있다. 본 연구에서는 상용 CFD 코드인 STAR CCM+ ver. 10.02를 이용하여 물-공기 이상유동에 대한 수치해석을 통해  $S_{\gamma}$  모델과 Yun 모델의 성능을 확인하고 평가하였다. 이를 위해 두 모델은 수직관에서의 물-공기 실험인 DEDALE 실험과 Hibiki 등의 실험에 대하여 평가되었다. 해석 결과  $S_{\gamma}$  모델은 이상유동 인자들을 합리적으로 예측하였으며, Yun 모델은 저압조건의 물-공기 유동에는 적합하지 않음을 확인하였다.

**주요어** : 이상유동, 물-공기 유동, 기포류 유동, 기포크기모델

**Abstract** - Bubble size is a key parameter for an accurate prediction of bubble behaviours in the multi-dimensional two-phase flow. In the current STAR CCM+ CFD code, a mechanistic bubble size model  $S_{\gamma}$  is available for the prediction of bubble size in the flow channel. As another model, Yun model is developed based on DEBORA that is subcooled boiling data in high pressure. In this study, numerical simulation for the gas-liquid two-phase flow was conducted to validate and confirm the performance of  $S_{\gamma}$  model and Yun model, using the commercial CFD code STAR CCM+ ver. 10.02. For this, local bubble models was evaluated against the air-water data from DEDALE experiments (1995) and Hibiki et al. (2001) in the vertical pipe. All numerical results of  $S_{\gamma}$  model predicted reasonably the two-phase flow parameters and Yun model is needed to be improved for the prediction of air-water flow under low pressure condition.

**Key words** : two-phase flow, air-water flow, bubbly flow, bubble size model

## 1. 서 론

기포류 유동은 원자력분야, 화학분야, 바이오 및 석

유화학 공정 등에서 흔히 발견된다. 원자력발전소(NPP)의 운전과 안전에 대한 다차원 이상유동 해석을 위해 CMFD (computational multi fluid dynamics) 코드의 활용이 증가하고 있다. 기포류 유동에 대한 정확한 해석은 원자력 발전소의 작동과 안전 그리고 개발을 위해 중요하다. 또한 피동 격납용기 냉각계통과 같은 첨단 안전 계통들의 개발이 증가함에 따라 원자

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.

School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63 gil, Geumjeong-gu, Busan 609-73  
Tel : 051-510-2484 E-mail : bjjun@pusan.ac.kr

력 발전소에서 다차원 이상유동 해석에 대한 필요성도 증가하고 있다. 현재 사용되고 있는 1차원 최적 안전 해석 코드들은 다차원 이상유동 예측에 취약하다. 최근에는 1차원 최적 안전 해석코드의 이러한 약점을 극복하기 위해 CMFD 코드의 활용이 증가하고 있는 추세이다.

다차원 이상유동 해석 시에 기포 거동과 기포 크기의 예측은 많은 이상유동 인자들 중에서도 매우 중요하다. 유동 관 내부의 기포 크기를 정확하게 예측하기 위하여 계면 면적 밀도(interfacial area concentration)와 기포 수 밀도(bubble number density)와 같은 역학적인 모델링이 시도되었다. Yao와 Morel [1], Yeoh와 Tu [2]는 각각 CFD 코드에 IAC 수송 방정식과 기포 수 밀도 방정식을 적용하였다. 최근에는 Lo와 Zhang [3]이 물-공기 유동에서의 기포크기 뿐만 아니라 기름-물 유동에서의 액적 크기 예측을 위해 일반화된  $S_{\gamma}$  모델을 CFD 코드에 적용하였다. 기포 크기의 예측을 위해 역학적인 모델링 이외에도 Yun [4]은 실험데이터 피팅을 이용하여 고압조건의 과냉 비등 실험을 바탕으로 기포 크기 예측을 위한 상관식을 개발하였다.

본 연구에서는 물-공기 유동에서  $S_{\gamma}$  모델의 성능을 확인하고 검증하기 위해 상용 CFD코드인 STAR CCM+ ver. 10.02를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석에는 수직원형관의 상향류 물-공기 유동 데이터인 DEDALE [1]과 Hibiki 등 [5]의 실험이 사용되었다. 추가적으로 고압조건의 과냉 비등 실험을 바탕으로 개발된 Yun [4]의 모델을 물-공기 유동데이터에 적용하여 평가해보았다.

## 2. 실험 데이터

CFD 코드를 이용하여 기포크기모델을 평가하기 위해 DEDALE [1]과 Hibiki 등 [5]의 실험에 대한 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 두 실험 데이터는 모두 수직 원형관에서의 상향류 물-공기 유동조건이다.

DEDALE은 1995년에 EDF(Electricity of France)에서 대기압조건의 단열 수직 원형관에서 수행된 상향 물-공기 유동 실험으로 높이가 6m이고 내경이 38.1mm인 시험부를 사용하였다. 공기는 내경 0.6mm를 가지는 80개의 동일한 크기의 구멍으로 물과 함께 주입된다. 이상유동 인자들은 시험부 입구로부터 서로 다른 세 위치( $z/D = 8, 55, 155$ )에서 측정되었다.

**Table 1.** Inlet condition of DEDALE experiments

Parameter	DEDALE 1101	DEDALE 1103
$J_g$ (m/s)	0.0588	0.1851
$J_l$ (m/s)	0.877	0.877
$\alpha$	0.048	0.152
$a_i$ ( $m^{-1}$ )	97	269

**Table 2.** Flow conditions and measured void fraction of Hibiki et al.'s experiments ( $z/D = 53.5$ )

Case	$J_g$ (m/s)	$J_l$ (m/s)	$\alpha$
1	0.321	0.986	0.231
2	0.518	5	0.106
3	0.624	2.01	0.228
4	0.471	2.01	0.183

Hibiki 등은 높이가 3.06m이고 내경이 50.8mm인 수직 원형관에서 대기압 조건의 물-공기 실험을 수행하였다. 이상유동 인자들의 측정은 축 방향으로 두 위치( $z/D = 6.0, 53.5$ )에서 이루어졌으며 관 입구에서 초기 기포직경은 약 3mm 이다.

본 연구에서는 DEDALE 실험의 두 가지 경우와 Hibiki 등의 실험의 네 가지 경우를 선택하여 수치해석을 통해 기포류 유동에서  $S_{\gamma}$  모델과 수정된 기포크기 상관식을 평가하였다. 표 1과 2는 각 실험에 대한 유동조건과 측정된 이상유동 변수들을 보여준다.

## 3. 기포 크기 모델

본 연구에서는  $S_{\gamma}$  기포 크기 모델과 Yun 모델을 두 가지 물-공기 유동 실험에 대해 평가하였다.

### 3-1. $S_{\gamma}$ 기포크기 모델

최근에는 Lo와 Zhang[3] 그리고 Yun 등[6]은 각각 물-공기 유동과 물-증기 유동의 기포크기를 예측하기 위해 일반화된  $S_{\gamma}$  모델을 적용하였다. 본 연구에서는 일반화된  $S_{\gamma}$  모델은 보다 광범위한 물-공기 데이터의 기포 크기 예측을 위해 적용되었다.

$S_{\gamma}$  모델은 다음과 같이 기포 및 액적의 크기 분포에 대한 일반적인 변수들로 정의된다.

$$S_\gamma = nM_\gamma = n \int_0^\infty d^\gamma P(d) d(d) \quad (1)$$

여기서  $n$  은 수 밀도(number density)이고,  $M_\gamma$  는  $\gamma$  차 모멘텀이고,  $d$  는 기포 크기이고,  $P(d)$  는 로그 정규분포로 가정된 기포 크기 분포이다.

모델에서 0차 모멘텀( $S_0$ )은 기포 개수 밀도( $n = S_0$ ), 2차 모멘텀( $S_2$ )은 계면 면적 밀도( $a_i = \pi S_2$ ), 3차 모멘텀( $S_3$ )은 기포울( $\alpha = \pi S_3/6$ )과 관련된다. 이러한 관계로부터 평균 직경(Sauter mean diameter)는 다음과 같이 계산된다.

$$d_{sm} = d_{32} = \frac{S_3}{S_2} = \frac{6\alpha}{\pi S_2} \quad (2)$$

위와 같은 정의에 따라 일반화된  $S_\gamma$  수송방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial S_\gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (S_\gamma u_d) = s_{br} + s_{cl} \quad (3)$$

여기서  $u_d$  는 분산상(dispersed phase)의 속도이고,  $s_{br}$  과  $s_{cl}$  은 각각 분열와 합체에 대한 항이다. 분열 항( $s_{br}$ )은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$s_{br} = \int_0^\infty K_{br}(d) \Delta S_\gamma^{br} n P(d) d(d) \quad (4)$$

여기서  $K_{br}$  은 기포가 분열하는 정도인 분열률이고,  $\Delta S_\gamma^{br}$  은 크기가  $d$  인 하나의 기포가 분열했을 때  $S_\gamma$  의 변화량이다. 하나의 기포는 동일한 크기의 두 개의 기포로 분열한다고 가정하고, 분열율( $K_{br}$ )은 붕괴하는 시간( $\tau_{br}$ ) 의 역수와 같다. 따라서 분열 항은 다음과 같다.

$$s_{br} = \int_0^\infty \frac{d^\gamma (2^{\frac{3-\gamma}{3}} - 1)}{\tau_{br}(d)} n P(d) d(d) \quad (5)$$

분열은 기포가 임계직경인  $d_{cr}$  보다 클 경우에만 발생한다. 분열 항은 점성력과 관성력 항의 합으로 식 (6)와 같이 정의된다.

$$s_{br} = s_{br,v} + s_{br,i} \quad (6)$$

점성력에 의한 분열은 층류와 난류 모두에서 식 (7) 과 같이 정의된 Kolmogorov 길이보다 작은 기포에서 확인된다.

$$L_k = \left( \nu_c^3 / \varepsilon \right)^{1/4} \quad (7)$$

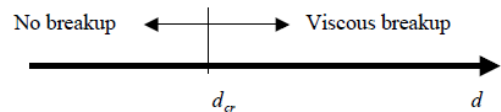
여기서  $\nu_c$  는 연속된 상(continuous phase)의 동점도 계수이고,  $\varepsilon$  은 연속된 상의 난류 운동에너지 소멸률(dissipation rate)이다. 점성력에 의한 분열과는 달리 관성력에 의한 분열은 Kolmogorov 길이보다 큰 기포에서 고려된다. 그림 1에는 분열 양식을 도식화하였다.

식 (3)에서 합체 항인  $s_{cl}$  은 다음과 같이 정의된다.

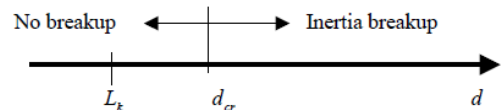
$$s_{cl} = \int_0^\infty \int_0^\infty K_{cl} \Delta S_\gamma^{cl}(d, d') n^2 P(d, d') d(d, d') \quad (8)$$

여기서  $K_{cl}$  은 크기가  $d$  와  $d'$  인 기포가 합쳐질 확률이고,  $\Delta S_\gamma^{cl}(d, d')$  는 크기가  $d, d'$  인 기포가 합쳐질 때  $S_\gamma$  의 변화량이다. 기포가 합쳐질 때 기포의 체적이 보존된다는 가정과 기포 크기가 등가 평균 직경

Laminar flow:



Turbulent flow:



Turbulent flow:

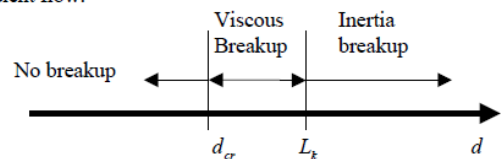


Fig. 1. Breakup regime of  $S_\gamma$  model

**Table 3.** Summary of modeling for breakup source term

Viscous regime
$d_{cr} = \frac{2\sigma\Omega_{cr}}{\mu_c\dot{\gamma}}$ , $\Omega = \frac{\mu_c d}{2\sigma}\dot{\gamma}$ : capillary number
$\Omega_{cr} = \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2}(\log \lambda)^2 - 2\frac{c_4}{c_3}\log \lambda - \frac{1}{c_3}\right) + \left(\frac{c_2}{c_3}\log \lambda + \frac{c_5}{c_3}\right) - \frac{c_2}{c_3}\log \lambda - \frac{c_5}{c_3} - 1}$
$\lambda = \mu_d/\mu_c$ , $c_1$ to $c_5$ : fitting constants
$\dot{\gamma}$ : shear rate calculated from local velocity gradient for laminar flow
$\dot{\gamma} = \sqrt{(\varepsilon\rho_c/\mu_c)}$ : Kolomogov shear rate for turbulent flow
Breakup occurs when $\Omega \geq \Omega_{cr}$
$\tau_{br} = \frac{\mu_c d}{\sigma} f_\tau(\lambda)$ , $f_\tau(\lambda) = p_0 + p_1 \log(\lambda) + p_2 (\log(\lambda))^2$
$p_0, p_1, p_2$ : empirical constants
Inertial regime
$d_{cr} = (1 + C_\alpha \alpha_d) \left( \frac{2\sigma\Omega_{cr}}{\mu_c\dot{\gamma}} \right)^{3/5} \varepsilon^{-0.4}$
$C_\alpha$ (dispersed concentration factor) = 4.6
$We = \frac{\rho_c u_f^2 d}{\sigma}$ , $We_{cr} = 0.31$
Breakup occurs when $We \geq We_{cr}$
$\tau_{br} = 2\pi k_{br} \sqrt{\frac{(3\rho_d + 2\rho_c)}{192\sigma}}$ , $k_{br} = 0.2$

( $d_{eq}$ )과 같은 일정한 분포를 가진다는 가정으로부터 합체 항은 식(9)와 같이 정의된다.

$$s_{cl} = (2^{\gamma/3} - 2) \left( \frac{6\alpha_d}{\pi} \right)^2 k_{coll} u_{rel} P_{cl}(d_{eq}) d_{eq}^{\gamma-4} \quad (9)$$

여기서  $k_{coll}$  은 기포가 합쳐지는 정도인 합체율,  $P_{cl}$  은 기포가 합쳐질 확률,  $u_{rel}$  은 등가 평균 직경( $d_{eq}$ ) 범위에서 상의 속도차이다. 분열과 합체 항의 점성력과 관성력 양식에 따라 모델링된 개별 인자들을 표 4와 5에 요약하여 나타내었다.

### 3-2. Yun 모델 [6]

Yun et al. 모델은 고압조건의 과냉비등 유동 실험인 DEBORA를 바탕으로 개발된 기포크기 예측 모델

**Table 4.** Summary of modeling for coalescence source term

Viscous regime
$k_{coll} = (8\pi/3)^{0.5}$ , $u_{rel} = \dot{\gamma}d$
$P_{cl} = \exp(-t_d/t_i)$ , $t_i = 1/\dot{\gamma}$
$t_d = \frac{\pi\mu_d\sqrt{F_i}}{2h_{cr}} \left( \frac{d_{eq}}{4\pi\sigma} \right)^{1.5}$ : partial mobile interface
$F_i = \frac{3\pi}{2}\mu_c\dot{\gamma}d_{eq}^2$ : interaction force during the collision
$h_{cr} = \left( \frac{A_H d_{eq}}{24\pi\sigma} \right)^{1/3}$ : critical film thickness
$A_H = 5 \times 10^{-21}$ : Hamaker constant
Inertial regime
$k_{coll} = (2\pi/15)^{0.5}$ , $u_{rel} = (\varepsilon_c d_{eq})^{1/3}$
$P_{cl} = \frac{\Phi_{max}}{\pi} \left( 1 - \frac{k_{cl,2}^2 (We - We_0)^2}{\Phi_{max}} \right)^{1/2}$ , $\Phi_{max} = \frac{2h_0^2 \rho_c \sigma}{We_0 \mu_d^2 d}$
$k_{cl} \approx 12.7$
$We_0 = 0.8We_{cr}$ , $h_0 = 8.3h_{cr}$

이며 다음과 같은 형태를 가진다.

$$d_{sm} = 39.32\alpha^{0.36} N_{Reb}^{-0.696} N_\rho^{0.571} Lo \quad (10)$$

여기서 레이놀즈 수( $N_{Reb}$ ), 밀도비( $N_\rho$ ), 라플라스 길이 척도( $Lo$ )는 각각 식 (11), (12), (13)과 같이 정의된다.

$$N_{Reb} = \frac{\varepsilon^{1/3} Lo^{4/3}}{\nu_f} \quad (11)$$

$$N_\rho = \frac{\rho_f}{\rho_g} \quad (12)$$

$$Lo = \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (13)$$

여기서 하첨자  $f$  와  $g$  는 각각 액상과 기상,  $\sigma$  는 표면장력,  $g$  는 중력가속도,  $\Delta\rho$  는 상의 밀도차를 의미한다.

### 4. 수치 해석

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 STAR CCM+ ver. 10.02를 사용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 해석에는 기포류 유동의 모의를 위해 오일러리안 방정식에 근거한 2-유체 해석 방법론을 적용하였으며, 난류모델로서 k-ε 모델, 계면 운동량 전달 모델로서 항력, 양력, 벽면 유힬력, 난류 분산력, 가상 질량력을 사용하였다. 본 해석에서는 Troshko와 Hassan [7]의 2상유동 난류모델과 Antal 등 [8]의 벽면 유힬력 모델, Bozzano와 Dente [9]의 항력 계수 모델을 사용하였다. 이 중 계면 유힬력은 기포가 벽면에 접근하는 것을 방해하는 힘으로 벽면 근처의 기포몰이 클 때 중요하다. 그러므로 계면 유힬력은 벽면근처의 기포몰이 높은 DEDALE 실험데이터에만 적용하였다.

### 5. 해석 결과

$S_\gamma$  모델과 Yun 모델을 적용하여 기포크기와 기포몰과 같은 이상유동 인자들을 실험데이터와 비교하였다. 그림 2에서  $S_\gamma$  모델이 DEDALE 실험의 기포몰 분포를 합리적으로 예측하고 있음을 보여준다. 그림 3에서 해석결과가 실험데이터의 기포크기 분포와 비슷하나 DEDALE 1101의 경우  $S_\gamma$  모델이 기포크기를 높게 예측함을 알 수 있다. 그림 4와 5는  $S_\gamma$  모델을 이용하여 Hibiki 등의 실험을 예측한 결과이다. 기포몰의 경우 분포를 잘 예측하고 있으나, 기포 크기의

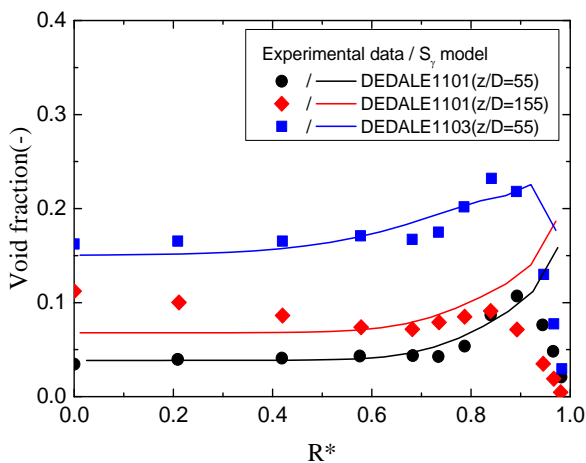


Fig. 2. Comparison of the void fraction prediction with the DEDALE experiment

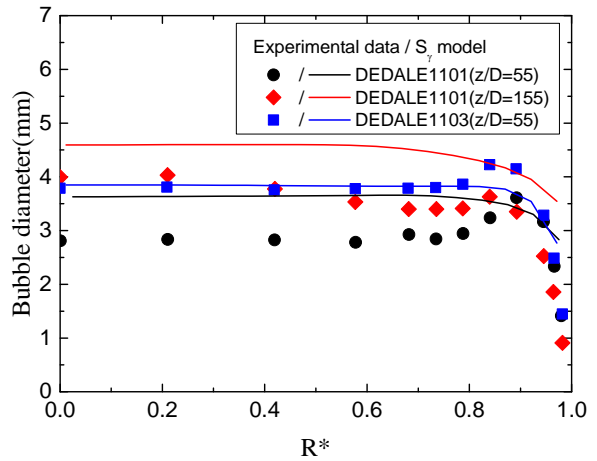


Fig. 3. Comparison of the bubble diameter prediction with the DEDALE experiment

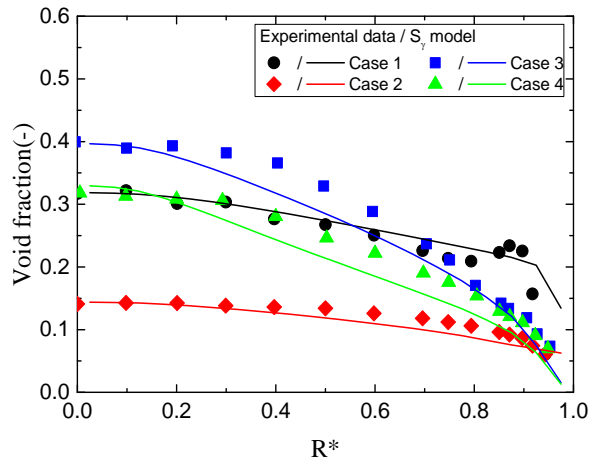


Fig. 4. Comparison of the void fraction prediction with the Hibiki et al.'s experiment

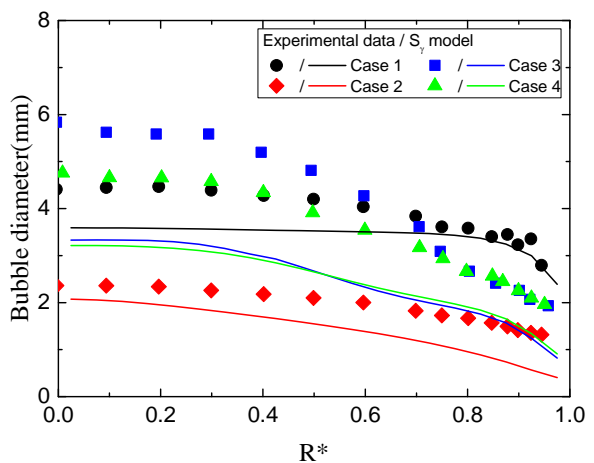


Fig. 5. Comparison of the bubble diameter prediction with the Hibiki et al.'s experiment

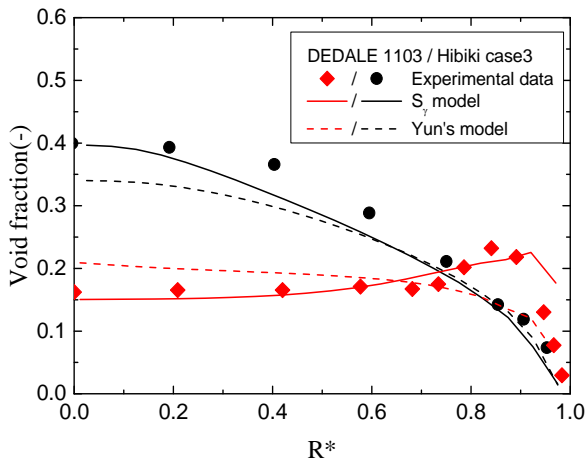


Fig. 6. Comparison of the void fraction prediction with the DEBORA experiment

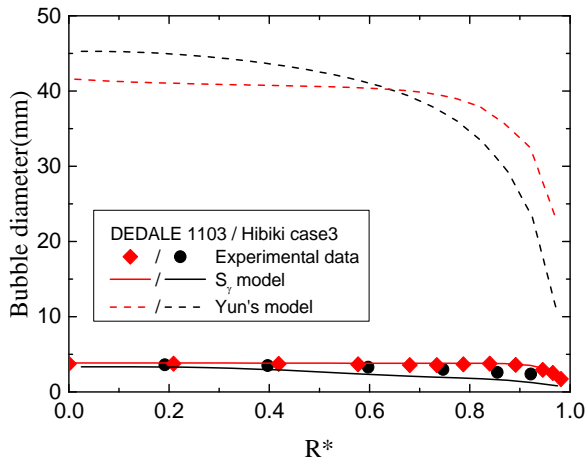


Fig. 7. Comparison of the bubble diameter prediction with the DEBORA experiment

경우 배관의 중심부의 크기가 큰 기포를 예측하지 못하는 경향을 보였다. 이는  $S_\gamma$  모델이 기포류 유동에 적합한 모델이므로 크기가 큰 기포를 잘 예측하지 못한 것으로 판단된다. 또한 그림 3에서 DEDALE 실험의 기포크기를 높게 예측한 것과는 달리 그림 5에서  $S_\gamma$  모델은 Hibiki 실험 데이터와 경향성은 비슷하지만 실험보다 낮게 예측한 것은 두 실험에서 사용된 시험부의 형상과 입구 공기분사 방법이 다르기 때문으로 판단된다.

추가적으로 Yun 모델을 물-공기 유동에 대하여 평가하였다. 그림 6과 7은 DEDALE와 Hibiki 등의 실험에 대한  $S_\gamma$  모델과 Yun 모델의 기포율과 기포크기 예측능력을 비교한 결과이다. 기포율의 경우 두 모델

모두 합리적으로 예측한 반면 기포크기의 경우 고압 조건의 과냉비등 유동에 적합한 상관식인 Yun 모델은 저압조건의 물-공기 유동의 기포크기를 매우 크게 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Yun 모델은 저압 조건의 물-공기 유동의 예측에는 적합하지 않다.

## 6. 결론

본 연구에서는 물-공기 유동에서  $S_\gamma$  모델과 Yun 모델의 성능을 평가하기 위하여 상용 CFD 코드인 STAR CCM+ ver. 10.02를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 해석 결과,  $S_\gamma$  모델과 수정된 기포크기 상관식은 기포 크기를 합리적으로 예측하였으며, 수정된 기포크기 상관식이  $S_\gamma$  모델 보다 더 좋은 성능을 보였다. 또한 해석 결과로부터 고압 조건의 과냉비등 유동조건에서 개발된 Yun 모델은 저압조건의 물-공기 유동에는 적합하지 않음을 확인하였다. 향후 Yun 모델을 수정하여 저압 조건의 물-공기 유동 뿐만 아니라 고압 조건의 과냉 비등 유동에서도 사용가능한 새로운 기포크기 상관식을 개발할 예정이다. 더 나아가서 기포크기 모델들을 이용하여 연구용 원자로의 관형핵연료와 같은 좁은 사각유로에서의 비등현상을 예측할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음

## References

1. Yao W. and Morel C., Volumetric interfacial area prediction in upward bubbly two-phase flow, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47(2), 307-328, 2004,
2. Yeoh G. H. and Tu J. Y., A unified model considering force balances for departing vapour bubbles and population balance in subcooled boiling flow, *Nuclear Engineering and Design*, 235(10), 1251-1265, 2005
3. Lo S. and Zhang D.H., Modelling of break-up and coalescence in bubbly two-phase flows, *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 1(1),

- 23-28, 2009
4. Yun B. J., Development of advanced analysis technology for the core-catcher component against severe accident, Final Report (2012M5A4A1047940), Pusan national univ., 2013
  5. Hibiki T., Ishii M. and Xiao Z., Axial interfacial area transport of vertical bubbly flows, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 44(10), 1869-1888, 2001
  6. Yun, B. J., Splawski, A., Lo, S. and Song, C. H., Prediction of a subcooled boiling flow with advanced two-phase flow models, *Nuclear engineering and design*, 253, 351-359, 2012
  7. Troshko A. A. and Hassan Y. A., A two-equation turbulence model of turbulent bubbly flows, *International Journal of Multiphase Flow*, 27(11), 1965-2000, 2001
  8. Antal S.P. and Lahey Jr. R.T., Flaherty J.E., Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, 17(5), 635-652, 1991
  9. Bozzano G. and Dente M., Shape and terminal velocity of single bubble motion: a novel approach, *Computer and Chemical Engineering*, 25(4), 571-576, 2001