

열분배모형을 이용한 수직유로에서의 저압 미포화비등 해석

이 바 로* · 이 연 건**

* 제주대학교 에너지공학과

Numerical Study of Low-pressure Subcooled Flow Boiling in Vertical Channels Using the Heat Partitioning Model

Ba-Ro Lee* and Yeon-Gun Lee**

* Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju Nat'l Univ.

(Received February 21, 2016 ; Revised April 28, 2016 ; Accepted May 3, 2016)

Key Words: Heat Partitioning Model(열분배모형), Low-pressure Subcooled Boiling(저압 미포화비등), CUPID Code(CUPID 코드), K-factor(K-인자)

초록: 벽면비등 모델로 열분배모형을 채택하는 CFD 스케일의 전산해석코드는 저압 조건에서 미포화비등 발생 시 2상유동 변수의 해석 정확도가 낮은 것으로 알려졌다. 본 연구에서는 열분배모형을 기반으로 벽면비등 현상을 예측하는 열수력 기기해석코드인 CUPID 코드를 이용하여 수직상향류 미포화비등 실험을 해석하였다. 10 bar 이상의 고압 조건에서는 CUPID 코드의 기포율 예측 정확도가 높았으나, 대기압 주변의 저압 조건에서는 기포율 분포에 대한 해석결과가 실험결과와 큰 차이를 보였다. 따라서 열분배모형 내 주요 인자에 사용되는 부모모델에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 저압 조건 미포화비등 예측에 적합한 최적 부모모델 조합을 선정하였다. 또한, 열분배모형 내 주요 인자 중 하나인 K-인자가 기포율에 미치는 영향을 평가하였다.

Abstract: Most CFD codes, that mainly adopt the heat partitioning model as the wall boiling model, have shown low accuracies in predicting the two-phase flow parameters of subcooled boiling phenomena under low pressure conditions. In this study, a number of subcooled boiling experiments in vertical channels were analyzed using a thermal-hydraulic component code, CUPID. The prediction of the void fraction distribution using the CUPID code agreed well with experimental data at high-pressure conditions; whereas at low-pressure conditions, the predicted void fraction deviated considerably from measured ones. Sensitivity tests were performed on the submodels for major parameters in the heat partitioning model to find the optimized sets of empirical correlations suitable for low-pressure subcooled flow boiling. The effect of the K-factor on the void fraction distribution was also evaluated.

- 기호설명 -

A_{bub} : 상변화 열전달 면적비
 C_p : 정압비열(J/kg·K)
 d_{Bd} : 기포이탈직경(m)
 e : 내부에너지(J/kg)
 f : 기포이탈빈도(1/s)
 g : 중력가속도(m/s²)

G : 질량속(kg/m²·s)
 h : 대류열전달계수(W/m²·K)
 h_{fg} : 증발잠열(J/kg)
 I : 계면 열전달률(W/m³)
 Ja^* : 수정 Jacob 수
 k : 열전도도(W/m·K)
 K : K-인자(기포영향 보정계수)
 M : 계면 운동량 전달항(kg/m²s²)
 N'' : 핵생성위치밀도(1/m²)
 N_{np}^* : 수조비등 무차원 핵생성위치밀도

† Corresponding Author, yeongun2@jejunu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

P	: 압력(Pa)
q	: 벽면 열전달항(W/m ²)
q''	: 열속(W/m ²)
Q	: 단위체적 당 열원(W/m ³)
r	: 반경(m)
R_c^*	: 무차원 임계공동반경
t	: 시간(s)
T	: 온도(K)
u	: 속도(m/s)

그리스문자

α	: 기포율
Γ	: 상변화율(kg/m ³ ·s)
$\Delta\rho$: 액체와 기체의 밀도차(kg/m ³)
ΔT_s	: 미포화도(K)
θ	: 접촉각(rad)
ρ	: 밀도(kg/m ³)
ρ^*	: 무차원 밀도
σ	: 표면장력(N/m ²)
τ	: 전단응력(N/m ²)

상첨자

<i>mass</i>	: 상변화
<i>drag</i>	: 계면 견인력
<i>VM</i>	: 가상 질량
<i>non-drag</i>	: 비견인력

하첨자

<i>c</i>	: 대류
<i>e</i>	: 기화
<i>g</i>	: 기체
<i>i</i>	: 내부
<i>l</i>	: 액체
<i>o</i>	: 급랭
<i>sat</i>	: 포화
<i>w</i>	: 벽면

특성 및 압력강하 등에 영향을 미친다. 이러한 미포화비등 열전달 현상을 파악하기 위해 많은 실험 연구들이 수행되었으며,^(1~7) 다양한 기구학적 모델이 제시되었다.^(8~11) 미포화비등은 기포의 생성과 이탈, 기포의 횡방향 이동과 응축, 기포의 병합과 분해 등 복잡한 국소 현상을 동반한다.

미포화비등 현상의 물리모델을 적용한 열수력 전산해석코드들을 이용하여, 기존의 미포화비등 실험에 대한 다수의 해석 연구가 수행되었다.^(12~16) 원자로는 정상상태 시 약 15.5 MPa에서 운전되기 때문에, 기존의 미포화비등 모델 개발과 실험 검증은 대부분 고압 조건에 집중되었다. 이에 따라 열수력 해석코드들은 고압에서의 비등 현상에 대해 높은 정확도를 보이는 반면, 저압 조건에서의 미포화비등에 대한 예측능력 향상이 요구된다. 저압 미포화비등은 원전의 냉각재상실 사고 시 계통감압 및 재관수 현상, 연구용 원자로의 과도사건, 대형수로로 열을 전달하는 피동형 열교환기 등에서 발생할 수 있다. 저압에서는 고압 조건에 비해 기포의 직경이 커지며, 가열벽면에서 떨어져 나와 차가운 액체로 이동하는 거리가 길어지기 때문에 유동의 구조가 변화하게 된다. 따라서 저압 조건 미포화비등 현상에 대해 예측성능을 향상시키기 위해서는 물리모델의 평가 및 해석도구의 개선이 필요하다.

기존의 CFD 스케일의 전산해석코드들은 대부분 벽면비등 모델로서 열분배모델을 사용한다.^(17~19) 따라서 본 연구에서는 열분배모델 내 주요 인자에 사용되는 부모모델의 민감도 분석을 통하여 저압 조건에 적합한 부모모델 조합을 선정하고, 상대적으로 중요성이 덜 부각된 주요 인자인 K-인자가 기포율에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 한국원자력연구원(KAERI)에서 개발한 CUPID 코드를 사용하여 고압 및 저압조건에서 수행된 실험의 기포율 분포를 예측하고, 예측모델의 적합성을 평가하였다.

1. 서 론

미포화비등(Subcooled boiling)은 포화온도보다 낮은 온도의 유체가 포화온도보다 높은 온도를 가지는 표면에서 기화하는 현상이다. 원자력 계통에서 미포화비등 현상은 원자로의 설계 및 안전해석 관점에서 중요한 2상유동 현상이다. 비등 현상으로 발생한 기포의 거동은 시스템의 열전달

2. CUPID 코드 수치모델

사고 시 원자로 계통에서 발생하는 열수력 현상은 급격한 압력변화(0.1~20 MPa), 비등 및 응축에 의한 유체의 즉각적인 상변화 등을 특징으로 한다. 하지만 기존 1-D 기반 계통해석코드 및 상용 CFD 코드는 각각 다차원 현상과 급격한 과도상태 해석에 한계를 가지며, 이를 보완하기 위

해 2007년 한국원자력연구원에서 기기스케일 해석코드인 CUPID를 개발하였다.

2.1 CUPID 코드 지배방정식

CUPID 코드에서는 2상유동을 묘사하기 위하여 과도상태 2-유체 3-장(two-fluid three-field) 모델을 채택하였다. 3장 모델은 혼합 기체와 액체, 그리고 액적을 묘사하기 위한 것이다. 각각에 대한 질량, 운동량, 에너지 보존방정식은 아래와 같다.⁽¹⁹⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) = \Gamma_k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \vec{u}_k) \\ = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot (\alpha_k \vec{\tau}_k) + \alpha_k \rho_k \vec{g} \\ + \mathbf{M}_k^{mass} + \mathbf{M}_k^{drag} + \mathbf{M}_k^{non-drag} + \mathbf{M}_k^{VM} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k e_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \vec{u}_k) \\ = -P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} - P \nabla \cdot (\alpha_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \vec{q}_k) \\ + I_k + Q_k \end{aligned} \quad (3)$$

질량, 운동량 및 에너지 방정식의 상변화 항에는 열분배모형에서 도출하는 상변화 열전달률을 벽면 비등량으로 변환한 값을 적용한다. 또한, 열분배모형에서 얻은 각 상으로의 열전달률이 에너지 방정식의 확산항 및 생성항에 사용된다.

2.2 벽면비등 열분배모형

CUPID 코드에서는 비등 열전달 현상을 해석하기 위하여 Kurul and Podowski⁽²⁰⁾가 제안한 열분배모형을 사용한다. 열분배모형에서는 열원으로 작용하는 벽면으로부터의 총 열속을 식 (4)와 같이 크게 세 가지의 요소로 구분한다.

$$q''_w = q''_c + q''_e + q''_q \quad (4)$$

q''_c , q''_e , q''_q 은 각각 단상의 유체가 기포로 상변화되기 전까지 받는 열속, 유체가 지속적인 열속을 받아 상변화 후 생성된 기포가 열원인 벽면에서 떨어져 나가기 전까지 받는 열속, 기포가 이탈한 뒤 그 자리에 단상의 유체가 흘러들어와 받는 열속을 나타내며, 식 (5)~(7)과 같이 표현된다.⁽¹⁶⁾

$$q''_c = h_c(T_w - T_l)(1 - A_{bub}) \quad (5)$$

$$q''_e = N'' f \left(\frac{\pi}{6} d_{Bd}^3 \right) \rho_g h_{fg} \quad (6)$$

$$q''_q = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_l \rho_l C_{pl}} \sqrt{f} \right) A_{bub} (T_w - T_l) \quad (7)$$

A_{bub} 은 벽면에서 기포 발생에 영향을 미치는 면적비를 의미하며, 식 (8)과 같이 표현된다.

$$A_{bub} = \min \left[1, N'' K \left(\frac{\pi d_{Bd}^2}{4} \right) \right] \quad (8)$$

물성치를 제외하면 열분배모형 내 열속의 크기는 핵생성위치밀도, 기포이탈직경, 기포이탈빈도, 그리고 K-인자 등 네 가지 주요 인자에 의해 결정된다. Table 1에 CUPID 코드에서 채택하고 있는 주요 인자에 대한 기본 상관식을 정리하였다. 핵생성위치밀도와 기포이탈빈도는 Cole의 모델⁽²¹⁾을 사용하여 계산하며, 기포이탈직경은 Cole and Rohsenow의 모델⁽²²⁾을 통해 예측한다. K-인자는 Kurul and Podowski⁽²⁰⁾가 제안한 상수인 4를 적용한다.

벽면 이탈 후 유로에서의 기포 크기 예측에는 Hibiki 등⁽¹⁰⁾가 제안한 상관식이 기본 모델로 사용된다. 이는 계면면적밀도, 상 간의 운동량 및 에너지 전달항의 계산에 사용되어, 기포울의 공간 분포에 영향을 미친다.

2.3 고압 미포화비등 적용 결과

Table 1에 정리된 기본 부모모델 조합이 고압 조건 미포화비등 해석에 적합한지 검증하기 위해, 열수력 코드의 검증에 자주 인용되는 Christensen의 실험⁽¹⁾과 Bartolomey의 실험⁽²⁾을 해석하였다. Christensen 및 Bartolomey는 각각 채널 외부에서 열을 공급하여 시험부 내부의 축방향 기포울을 측정하는 실험을 수행하였다. 각 시험부의 기하학적 구조 및 실험 조건은 Table 2와 같으며, 각각 두 가지 실험 조건을 선정하여 해석하였다. 해석에 사용된 실험조건은 Table 3에 정리하였다.

결과를 제시하기에 앞서, 격자 민감도분석 테스트를 통해 계산에 사용된 격자를 최적화하였다. 이는 격자의 개수가 증가하더라도 해석결과에 큰 변동이 없는 최소한의 격자 개수를 얻기 위한 작업이다. 본 연구에서는 격자의 개수를 증가시키면서 단면 평균 기포울 변화가 10^{-4} 보다 작

Table 1 Submodel of major factors in heat partitioning model of CUPID code

Factor	Symbol	Unit	Author	Correlation
Nucleation site density	N''	$\#/m^2$	Cole ⁽²¹⁾	$N'' = [185(T_w - T_{sat})]^{1.805}$
Bubble departure diameter	d_{Bd}	mm	Cole and Rohsenow ⁽²²⁾	$d_{Bd} = 1.5 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} Ja^*{}^{5/4}$ $Ja^* = \rho_l C_{pl} T_{sat} / \rho_g h_{fg}$
Bubble departure frequency	f	1/sec	Cole ⁽²¹⁾	$f = \sqrt{\frac{4g\Delta\rho}{3d_{Bd}\rho_l}}$
K-factor	K	-	Kurul and Podowski ⁽²⁰⁾	4

Table 2 Geometry and conditions of Christensen's and Bartolomey's experiment

Publication	Geometry (mm)	Height (mm)	P (bar)	q'' (kW/m ²)	G (kg/m ² s)	ΔT_s (K)
Christensen ⁽¹⁾	Rectangle 11.1 × 44.4	1270	27.6 - 68.9	212.8 - 496.6	640.9 - 940.2	2.9 - 14.4
Bartolomey ⁽²⁾	Circle D: 24	2000	15 - 108.1	380 - 1130	900 - 2000	22.6 - 91.4

Table 3 Test conditions at high-pressure experiments

References	Case No.	P (bar)	q'' (kW/m ²)	G (kg/m ² s)	T_l (K)	ΔT_s (K)
(1)	1	27.6	212.8	646.9	493.7	8.7
	2	68.9	496.6	807.7	545.9	12.1
(2)	3	30	380	890	483.15	25.0
	4	45	380	890	504.15	24.0

아질 경우를 기준으로 격자의 개수를 선정하였다. 그 결과, Christensen의 실험 해석에는 25,600개(각 단면 당 사각격자 1024개, 축방향 격자 25개)의 격자가 사용되었으며, Bartolomey 실험의 경우 41,960개(각 단면 당 다면체격자 1049개, 축방향 격자 40개)로 격자를 구성하였다.

상기 실험들에서는 고압 조건에서 감마선 밀도계(gamma densitometer)를 적용하여 단면평균 기포율의 일차원 분포를 계측하였으므로 각 단면에서의 국소분포에 대한 정보가 부재하며, 따라서 CUPID 코드의 기포율 분포 해석결과를 직접적으로 비교하는 데에는 한계점이 있다. 그러나 열분배모델을 통해 예측한 기포 생성량이 단면평균 기포율 분포를 결정하게 되므로, CUPID 코드의 해석결과를 각 단면에 대해 면적평균하여 실험결과와 상호 비교함으로써 다차원 측정데이터가 부재한 고압 조건에서 제한적이거나 열분배모델의 정확성을 평가할 수 있다.

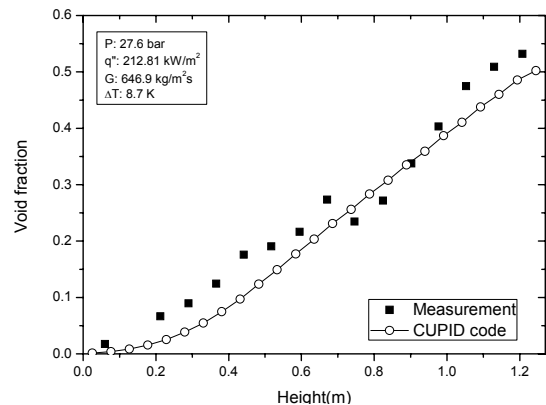


Fig. 1 Predicted void profile and Christensen's data for case 1

Figs. 1과 2는 Christensen의 실험에서 측정된 단면평균 기포율 데이터와 CUPID 코드로 예측한 기포율 분포를 비교한 그림이며, Figs. 3과 4는 Bartolomey의 실험과 해석 결과를 비교한 그림이다. 열분배모델을 이용한 코드의 예측 결과는 측

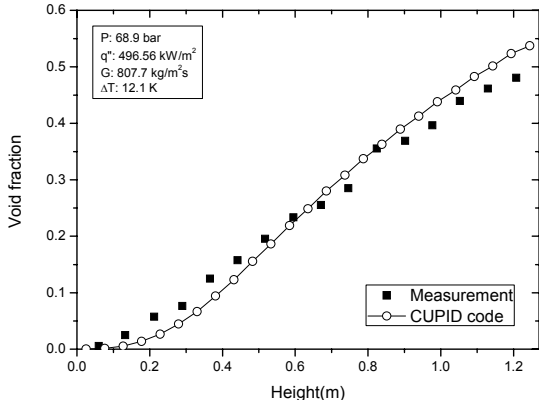


Fig. 2 Predicted void profile and Christensen's data for case 2

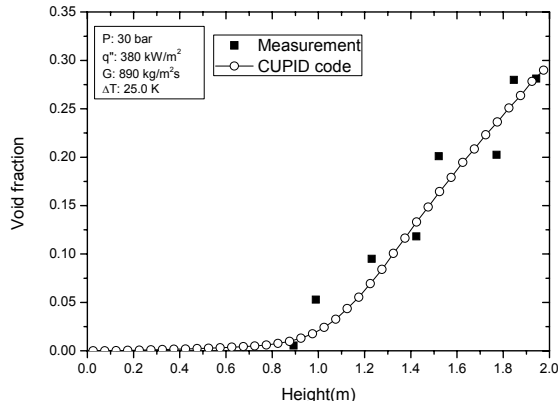


Fig. 3 Predicted void profile and Bartolomey's data for case 3

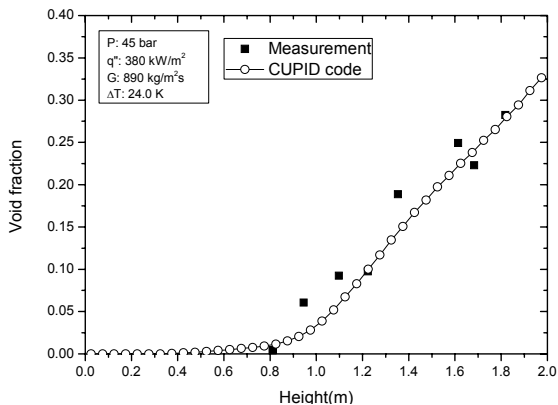


Fig. 4 Predicted void profile and Bartolomey's data for case 4

정된 기포율 분포와 잘 일치하고 있으며, 단면평균 기포율 오차는 각각 0.04와 0.025 이하로 나타났다. 실험에서 최대 기포율이 각각 약 0.5와 0.3 임을 감안한다면 높은 기포율 예측 정확도를 보였다. 따라서 높이에 따른 단면평균 기포율 예측

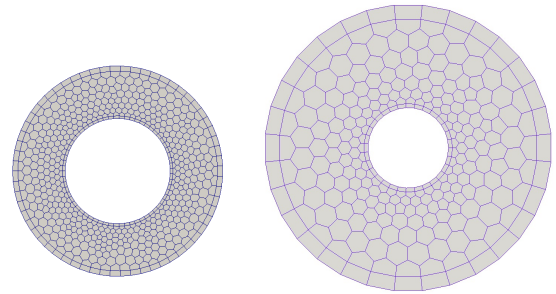


Fig. 5 Meshes for Zeitoun's tests (left) and SUBO tests (right)

에 대해 CUPID 코드 내 열분배모델의 기본 부모 모델 조합은 고압 조건 미포화비등 해석에 적합함을 확인하였다.

3. 저압 조건 미포화비등 해석

3.1 Zeitoun 및 SUBO 실험 해석

고압 조건 미포화비등 실험 해석에 높은 예측 정확도를 보여준 Table 1의 부모 모델 조합을 이용하여, 저압 조건 미포화비등 실험을 해석하였다. 본 연구에서는 저압 조건 미포화비등 실험을 대기압 주변의 실험으로 정의하였다. 저압 조건의 실험으로는 McMaster 대학의 Zeitoun⁽³⁾이 수행한 실험과 한국원자력연구원에서 수행한 SUBO⁽⁷⁾ 실험을 선정하여 CUPID 코드로 해석하였다. Zeitoun 및 SUBO 실험에서는 앞서 고압 조건의 실험과는 다르게 시험부 내부에 히터를 삽입하여 환형의 유로를 구성한다. Zeitoun의 실험에서는 높이에 따른 단면평균 기포율의 분포를 측정하였으며, SUBO 실험에서는 광섬유 센서를 사용하여 여섯 곳의 높이에서 반경 방향의 기포율을 측정함으로써 다차원 데이터를 수집하였다.

Zeitoun 및 SUBO 실험 내 시험부의 기하학적 구조 및 실험 조건은 Table 4에 정리하였다. Table 5는 코드 해석에 사용된 저압의 미포화비등 실험 조건을 나타낸다.

Fig. 5는 본 해석에 사용된 각 실험장치의 단면 격자를 보여준다. 격자최적화를 통해 Zeitoun의 실험 해석에는 6,580개(각 단면 당 다면체격자 658개, 축방향 격자 10개)의 격자를 사용하였고, SUBO 실험장치를 모의하기 위한 격자는 29,000개(각 단면 당 다면체격자 290개, 축방향 격자 100개)로 구성하였다.

Fig. 6과 7은 Zeitoun의 축방향 단면평균 기포

Table 4 Geometry and conditions of Zeitoun's and SUBO experiment

Publications	Geometry (mm)	Height (mm)	P (bar)	q'' (kW/m ²)	G (kg/m ² s)	ΔT_s (K)
Zeitoun ⁽³⁾	Annulus D_i : 12.7, D_o : 25.4	306	1.1 - 1.68	210.0 - 603.2	151 - 412	13.1 - 23.5
Yun et al. ⁽⁷⁾	Annulus D_i : 9.98, D_o : 35.5	3087	1.551 - 1.621	373.6 - 565.7	1113.8 - 2093.2	17.2 - 29.6

Table 5 Test conditions at low-pressure experiments (near atmospheric)

References	Case No.	P (bar)	q'' (kW/m ²)	G (kg/m ² s)	T_l (K)	ΔT_s (K)
(3)	5	1.23	478.5	283.1	358.97	19.7
	6	1.14	210	188.9	365.09	11.4
(7)	7	1.616	473.7	1124.7	374.65	17.8
	8	1.551	373.6	1122.9	374.25	17.2

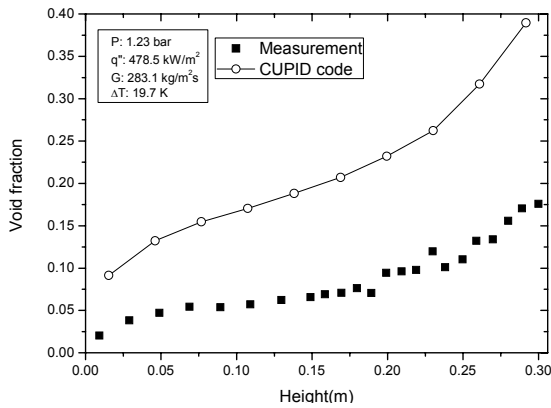


Fig. 6 Predicted void profile and Zeitoun's data for case 5

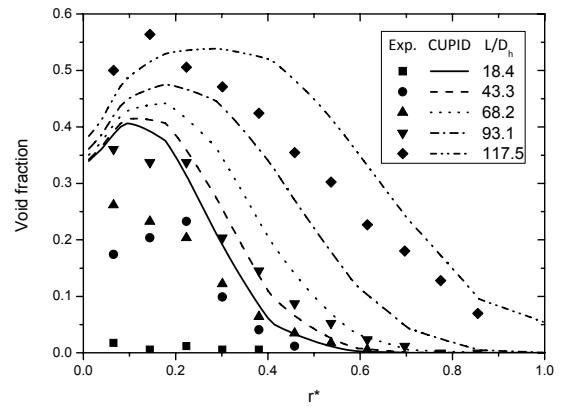


Fig. 8 Prediction of radial void fraction distribution in SUBO test for case 7

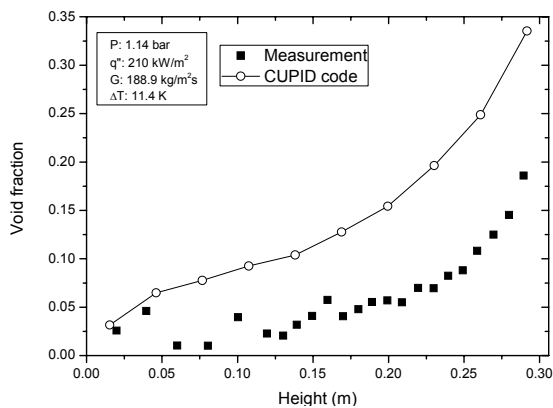


Fig. 7 Predicted void profile and Zeitoun's data for case 6

을 데이터와 CUPID 코드 해석 결과를 비교한 그림이다. 코드를 이용하여 예측한 기포율의 값이

실험 측정치보다 모든 높이에서 상당히 높은 경향을 보였다. 계산 결과와 실험 데이터의 평균 절대오차는 모든 경우에서 약 0.1 정도이며, 실험 데이터의 최대 기포율 값이 0.2 이하인 점을 감안한다면 상당히 큰 오차가 발생하였다.

SUBO 실험에서는 반경방향의 기포율을 측정하였기에 높이에 따른 반경방향의 기포율 분포를 비교하였다. Figs. 8과 9는 반경방향의 기포율을 비교한 그림이다. 반경방향 거리는 아래 식 (9)와 같이 정규화된 값으로 표현하였다.

$$r^* = \frac{(r - r_i)}{(r_o - r_i)} \quad (9)$$

Zeitoun 실험의 해석 결과와 마찬가지로, 열분배모형을 기반으로 하는 CUPID가 모든 지점에서

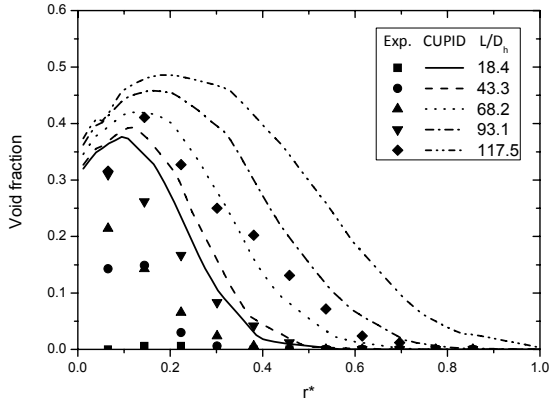


Fig. 9 Prediction of radial void fraction distribution in SUBO test for case 8

기포율을 높게 예측하였다. 이에 따라 축방향의 단면평균 기포율 분포 역시 큰 오차를 보이며, 특히 채널 하부에서 상부보다 큰 차이를 나타내었다. 즉, Table 1에 나타난 부모모델 조합을 이용한 열분배모형은 저압 조건의 실험 해석에서 기포율 예측 정확도가 현저히 감소하였다.

식 (6)에서 표현된 바와 같이, 벽면 비등량을 결정하는 상변화 열전달에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 기포이탈직경이다. CUPID 코드에서 기본 모델로 적용하고 있는 Cole and Rohsenow⁽²²⁾ 상관식은 낮은 압력범위에서 적용 가능한 것으로 알려져 있으나 타 상관식에 비해 Jakob 수에 대한 의존도가 크고, 실제보다 대기압에서 기포이탈직경을 크게 예측하는 것으로 판단된다. 또한, 핵생성위치밀도 계산에 사용된 Cole⁽²¹⁾의 상관식은 벽면 온도와 포화온도에 대한 함수로서 간단하게 적용가능하나, 고압 조건 비등현상에 주로 검증되었으며 저압에서는 일부 오차를 야기하였다.

이와 같이, 열분배모형 내 주요 인자의 계산에 사용하는 상관식에 따라 기포율 계산결과가 크게 달라질 수 있으며, Table 1의 부모모델 조합은 저압에서의 기포율 예측에 적합하지 않음을 확인하였다. 이에 열분배모형의 부모모델에 대한 민감도 분석을 통해 저압 미포화비등 해석에 적합한 부모모델 조합을 도출하였다.

3.2 부모모델의 민감도 분석

저압 조건 미포화비등 현상에 대한 기포율 예측의 정확도를 높이기 위해 열분배모형 내 주요 인자 계산에 사용되는 부모모델에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 핵생성위치밀도

Table 6 Submodels for major factors in the heat partition model of CUPID code

Major factor	Author
Nucleation site density	Cole ⁽²¹⁾
	Lemmert and Chwala ⁽²³⁾
	Hibiki ⁽²⁴⁾
	Kocamustafaogullari and Ishii ⁽²⁵⁾
Bubble departure diameter	Cole and Rohsenow ⁽²²⁾
	Fritz ⁽²⁶⁾
	Tolubinsky ⁽²⁷⁾
Bubble departure frequency	Cole ⁽²¹⁾

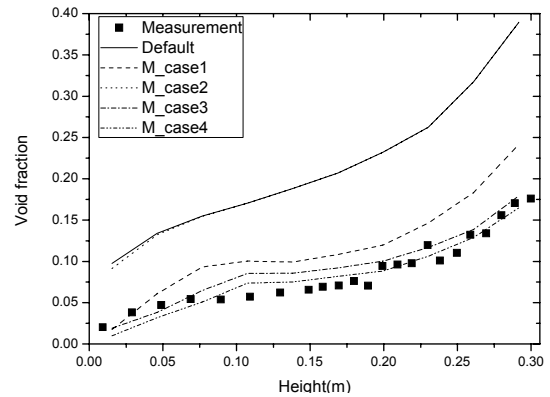


Fig. 10 Results of sensitivity analysis for case 5

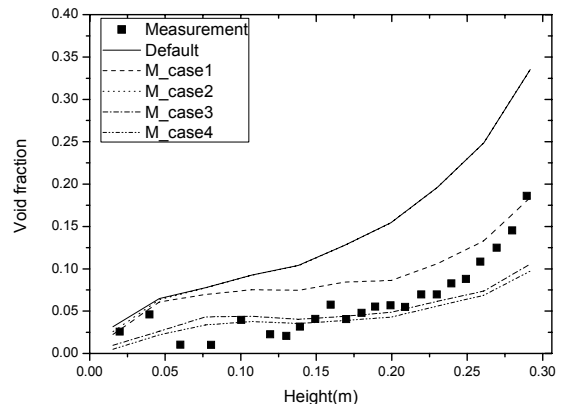


Fig. 11 Results of sensitivity analysis for case 6

와 기포이탈직경에 대해 수행하였으며, 기포이탈 빈도는 기본 모델 이외의 상관식을 CUPID 코드에서 지원하지 않기에 제외하였다. 핵생성위치밀도에는 네 가지의 모델, 기포이탈직경에 세 가지의 모델을 이용하여 총 12 케이스에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 이에 사용된 모델은 Table 6

Table 7 Submodels for major factors selected for sensitivity analysis

Name	Nucleation site density	Bubble departure diameter
Default	Cole	Cole and Rohsenow
M_case1	Cole	Tolubinsky
M_case2	Lemmert and Chwala	Cole and Rohsenow
M_case3	Hibiki	Tolubinsky
M_case4	Kocamustafaogullari and Ishii	Fritz

Table 8 Comparison of Avg. error and RMSE for void fraction

Name	Case5		Case6	
	Avg. error	RMSE	Avg. error	RMSE
Default	0.128	0.137	0.081	0.093
M_case1	0.035	0.039	0.028	0.034
M_case2	0.128	0.137	0.080	0.093
M_case3	0.012	0.015	0.024	0.035
M_case4	0.011	0.012	0.022	0.029

에 정리하였다.

최적 부모모델 조합을 도출하는 데에는 3.1장에서 해석에 사용된 Zeitoun의 실험 case 5와 case 6을 적용하였다. 총 12가지 케이스 중 Figs. 10과 11은 주요 인자의 예측에 사용되는 부모모델에 대해 CUPID 코드 내 기본 모델들을 적용한 경우보다 기포율을 낮게 예측한 네 가지 조합의 계산결과를 보여준다. 기존의 부모모델 조합은 저압 조건에서 실험 데이터보다 기포율을 높게 예측하므로, 이보다 기포율을 낮게 예측한 부모모델 조합에서 적합한 모델들을 선정할 수 있다. 기본 부모모델 조합보다 기포율을 낮게 예측한 4가지 조합에 사용된 부모모델들을 Table 7에 정리하였다.

Table 8은 민감도 분석 결과 CUPID 코드의 기포율 계산결과와 측정된 기포율의 평균 오차와 RMSE(Root mean square error)를 나타낸다. 분석결과 실험결과와 비교할 때 M_case4에 사용된 부모모델 조합을 적용하였을 경우에 저압에서의 기포율을 가장 잘 예측하고 있음을 보인다. 즉, 저압 조건에서는 핵생성위치밀도에 Kocamustafaogullari

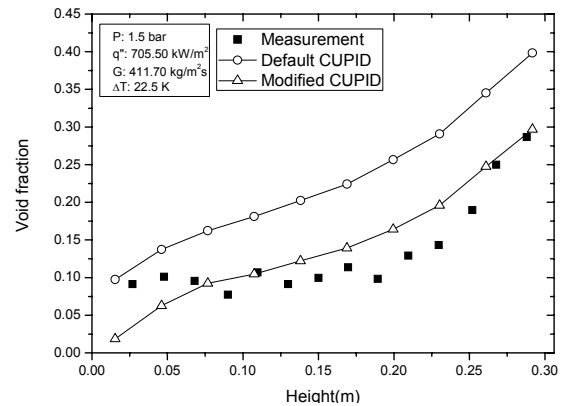


Fig. 12 Comparison of simulation results from the default and modified models for case 9

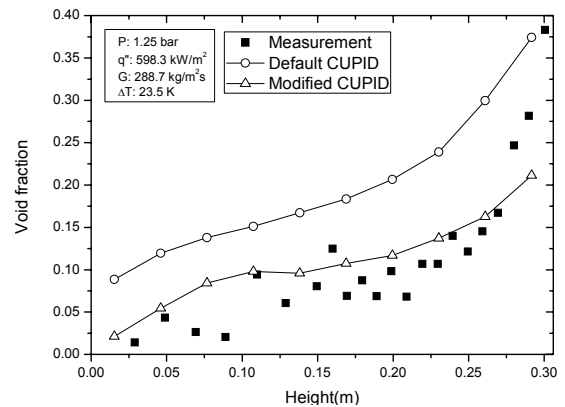


Fig. 13 Comparison of simulation results from the default and modified models for case 10

and Ishii⁽²⁵⁾ 모델, 기포이탈직경에 Fritz⁽²⁶⁾의 모델을 적용하였을 때 가장 기포율 분포의 예측 정확도가 높은 것으로 확인하였으며, 상기 부모모델을 Table 9에 정리하였다.

Fritz의 모델은 부력과 표면장력의 평형을 기반으로 유도되었으며, Kocamustafaogullari and Ishii 모델에서는 핵생성위치밀도의 계산을 위한 항으로서 Fritz의 기포이탈직경을 사용한다. 기포이탈빈도수 예측에는 공통적으로 사용되는 Cole의 모델을 고정한 상태에서, 상기 두 모델의 조합이 저압에서 기포율 분포를 실험결과와 가장 가깝게 예측하였다.

3.3 도출 부모모델 조합 적용결과

Figs. 12와 13은 민감도 분석을 통해 도출한 부모모델 조합을 적용하여 Zeitoun의 다른 실험을 해석한 결과이다. 실험조건은 Table 10에 정리하였다. CUPID 코드의 평균 기포율 오차가 약 0.1에

Table 9 An optimized set of submodels for low-pressure subcooled flow boiling (M_case4)

Factor	Symbol	Unit	Author	Correlation
Nucleation site density	N''	#/m ²	Kocamustafaogullari and Ishii ⁽²⁵⁾	$N'' = N_{np}^* / D_{Bd}^2$
				where
				$N_{np}^* = f(\rho^*) R_c^{*-4.4}$
				$\rho^* = \Delta\rho / \rho_g$
				$f(\rho^*) = 2.157 \times 10^{-7} \rho^{*-3.2} (1 + 0.0049\rho^*)^{4.13}$
				$R_c^* = \frac{\sigma D_{Bd} T_{sat}}{\rho_g h_{fg} (T_w - T_{sat})}$
				$D_{Bd} = 0.0012 \rho^{*0.9} D_{Bd.F}$
				$D_{Bd.F}$: Bubble departure diameter by Fritz ⁽²⁶⁾
Bubble departure diameter	d_{Bd}	mm	Fritz ⁽²⁶⁾	$d_{Bd} = 0.0208\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}}$
Bubble departure frequency	f	1/sec	Cole ⁽²¹⁾	$f = \sqrt{\frac{4g\Delta\rho}{3d_{Bd}\rho_l}}$
K-factor	K	-	Kurul and Podowski ⁽²⁰⁾	4

Table 10 Test conditions of Zeitoun's experiment for validation of new submodels

References	Case No.	P (bar)	q'' (kW/m ²)	G (kg/m ² s)	T_l (K)	ΔT_s (K)
(3)	9	1.5	705.50	411.70	362.02	22.5
	10	1.25	598.3	288.7	355.64	23.5

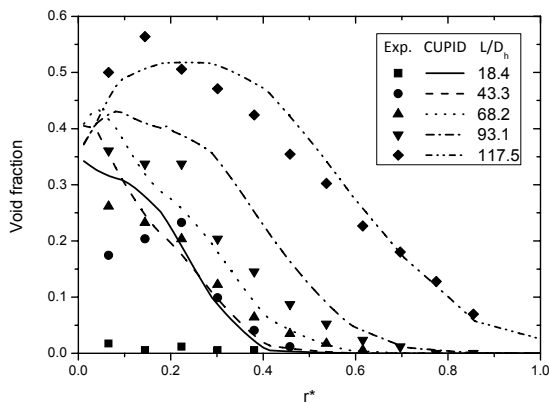


Fig. 14 Simulation results for radial void fraction distributions using the modified models for case 7

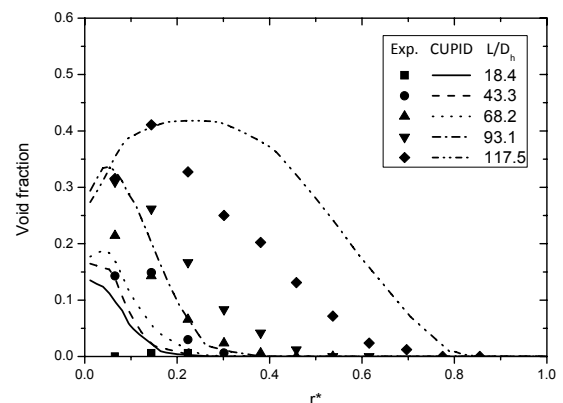


Fig. 15 Simulation results for radial void fraction distributions using the modified models for case 8

서 0.03 이하로 감소하며, 높이에 따른 경향성도 잘 반영하였다. 이는 민감도 분석을 통해 도출한 부모모델 조합을 이용함으로써 저압조건에서의 미포화비등에 대한 해석 정확도를 개선할 수 있음을 나타낸다.

Zeitoun의 실험해석을 통해 도출한 최적 부모모델 조합을 SUBO 실험의 해석에도 사용하여 적용성을 평가하였다. Figs. 14와 15는 SUBO 실험의 각 높이별로 반경방향 기포율 분포에 대해 실험 측정치와 코드의 재해석 결과를 비교한 그림이다.

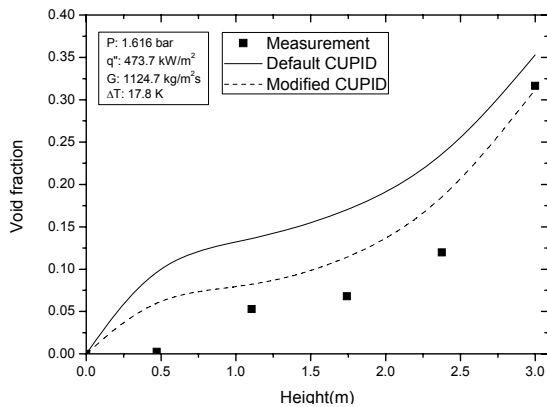


Fig. 16 Axial void fraction profiles predicted from the default and modified models for case 7

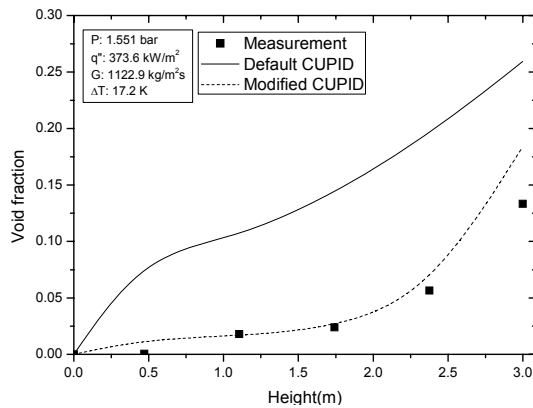


Fig. 17 Axial void fraction profiles predicted from the default and modified models for case 8

또한, 전체적인 기포 생성량의 검증을 위해 축방향의 단면평균 기포율 분포 해석결과를 Figs. 16과 17에 나타내었다. Zeitoun의 실험 해석결과와 마찬가지로, 새로운 부모모델 조합을 적용함으로써 기본 모델을 사용했을 때 보다 기포율 분포에 대한 예측능력이 향상되었다. 특히 벽면 비등량에 의해 결정되는 단면평균 기포율 분포 역시 Figs. 16과 17에서 볼 수 있듯이 예측 정확도가 크게 개선되었다.

다만, 여전히 반경방향의 기포율 분포 예측에서는 실험 결과와의 오차가 존재함을 확인하였다. 가열표면에서 생성되어 떨어져 나온 기포의 공간 분포는 벽면비등량 및 유로 내 기포크기 뿐만 아니라 운동량 보존방정식에서 생성항으로 작용하는 계면운동량전달력에 크게 좌우된다. 이는 견인력과 더불어 양력, 벽면유효력, 난류분산력 등의 비견인력을 포함한다. 따라서 기포의 반경방향 공간분포 예측을 개선하기 위해서는 향후

상기의 계면운동량전달력에 대한 평가와 검증이 요구된다.

또한, 축방향의 기포율 비교 시 낮은 높이에서 여전히 실험 데이터보다 기포율을 높게 예측하는 모습을 보인다. 이는 ONB(Onset of nucleate boiling) 지점이 실험보다 낮은 높이에서 발생하는 것으로 예측한다는 의미이다. ONB 지점은 기포가 차지하는 면적비인 A_{bub} 값에 따라 변화하며, 따라서 이를 결정하는 K-인자가 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.

4. K-인자가 기포율에 미치는 영향

K-인자는 비등표면 이탈 시 기포차지면적 대비 급랭 유동에 의해 열전달에 영향을 받는 표면적의 비로 정의된다. 열분배모델을 채택하는 CFD 스케일의 해석코드에서는 Kurul and Podowski⁽²⁰⁾의 제안에 따라 K-인자로 상수 4를 적용하는 것이 일반적이었다.⁽¹⁷⁻¹⁹⁾ K-인자의 값은 A_{bub} 의 크기를 결정짓는 요소로 작용하며, 이는 대류 열속과 급랭 열속의 예측에 영향을 미친다. 따라서 핵생성위치밀도와 기포이탈빈도, 기포이탈직경과 더불어 K-인자 역시 미포화비등장 내 기포변수의 분포를 결정하는 주요 인자로 꼽을 수 있다.

4.1 K-인자에 대한 기존 연구

실험 혹은 해석을 통해 미포화비등 시 K-인자를 정의하기 위한 연구들이 수행되었다. Judd and Hwang⁽²⁸⁾은 염화메틸렌을 이용한 수조비등 실험을 수행하여, 실험결과를 모의할 수 있는 최적의 K-인자가 1.8이라고 제안하였다. Kenning and Victor⁽²⁹⁾는 통계적으로 K-인자가 2와 5 사이의 값을 가진다고 주장하였으며, Tu and Yeoh⁽¹²⁾는 이를 바탕으로 K-인자를 Jakob 수에 대한 함수의 형태로 제시하였다. Victor⁽³⁰⁾는 에너지 보존방정식을 적용한 계산을 통해 이 값이 5.8과 7.5 사이에 있다고 주장하였다.

하지만 최근에는 국소 벽면온도를 측정하는 기법들이 발전함에 따라 보다 직접적으로 기포의 이탈 및 급랭열전달 면적을 측정할 수 있게 되었으며, 이들의 적용 결과에 따른 K-인자는 기존의 연구자들이 제안한 값과는 큰 차이를 보인다. Golobic⁽³¹⁾은 IR thermometer를 사용하여 국소 벽면온도를 측정하는 실험을 하였고, K-인자의 값

은 1.0 보다 작다고 제안하였다. Kenning⁽³²⁾은 LCT(Liquid crystal thermography)를 이용한 실험으로 K-인자의 값이 거의 1.0에 가깝다고 주장하였다. 또한, 송준규 등⁽³³⁾은 적외선 카메라와 고속카메라를 이용한 실험적 결과로부터 이 값을 0.25로 제안하였다.

실험 기법 등에 따라 각 연구자들이 제안하는 K-인자의 값이 상이하며, 특히 최근의 국소 정밀 실험을 통해 도출한 값은 대체로 1.0에 가깝거나 이보다 작음을 알 수 있다. 이는 급랭유동에 의해 영향을 받는 면적이 표면이탈 시 기포가 차지하는 면적보다 크다는 기존의 연구결과와 상반된다. 이에 따라 미포화비등 해석에서 열분배모형에 적용하는 K-인자가 기포울 분포 예측에 미치는 영향을 파악하고, 앞서 도출한 부모형 조합과 함께 적용되었을 때 가장 정확도가 높은 값을 제안하기 위해, K-인자 값을 변경하여 SUBO 실험과 Zeitoun의 실험을 재해석하였다.

4.2 K-인자의 영향

우선 국소 기포율의 다차원 분포 비교가 가능한 SUBO 실험에 대해, 열분배모형에 Table 9의 최적 부모형 조합을 적용하고 K-인자의 값을 변화시키면서 추가 해석을 수행하였다. K-인자의 값으로 기존의 4.0 이외에 1.0, 0.25를 적용하여 기준 실험인 case 7을 해석하였다. Figs. 18와 19은 K-인자가 각각 1.0, 0.25일 때의 반경방향 기포울 분포를 비교한 결과를 보여준다.

기존 값을 그대로 적용한 결과인 Fig. 14와 함께 비교할 때, K-인자의 값이 작아짐에 따라 전반적으로 시험부 하단에서의 기포율이 낮게 계산됨을 확인할 수 있다. L/D_h가 18.4와 43.3인 위치에서 K-인자의 값에 따른 기포율 분포의 변화를 나타낸 Fig. 20에서도 이러한 경향성을 확인할 수 있다. Case 7 실험에 대해 CUPID 코드가 전반적으로 기포율을 높게 예측하나, K-인자의 선택에 따라 가열부 초기의 기포율 분포가 영향을 받는 것으로 드러났다.

이와 유사하게, Cho⁽³⁴⁾는 K-인자가 작아질수록 코드에서 예측하는 ONB 발생이 지연되어, 그 위치가 점차 상부로 이동함을 보였다. 이는 열분배모형의 수치모델에서 K-인자가 작아질수록 기포 열전달 면적비가 감소하여, 상대적으로 단상대류 열속이 커지는 현상에 기인한다.

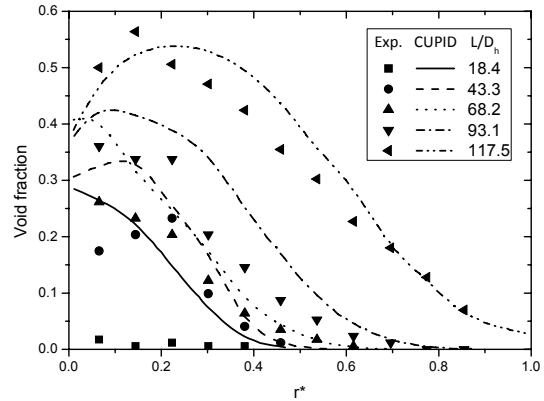


Fig. 18 Simulation results for radial void fraction distributions with K=1 for case 7

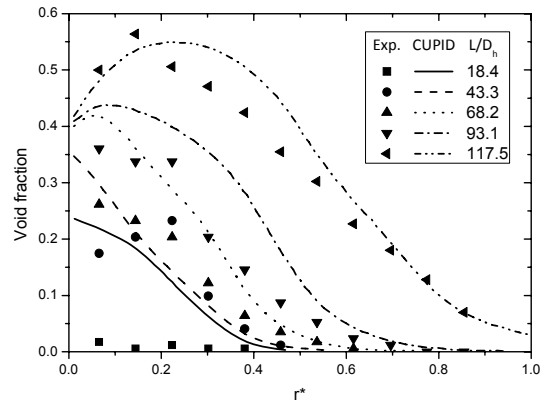


Fig. 19 Simulation results for radial void fraction distributions with K=0.25 for case 7

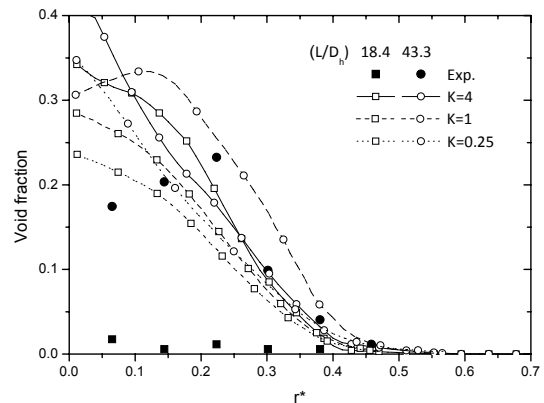


Fig. 20 Effect of K-factor on local void profiles at lower elevations of test section for case 7

반면 시험부 상부에서의 기포율 분포는 K-인자에 따른 변화가 거의 없는 것으로 파악되었다. 가열구간이 길어지면서 식 (8)로 표현되는 기포 열전달 면적비가 최대값인 1에 도달하여, K-인자가 기포율에 미치는 영향이 미미하였다.

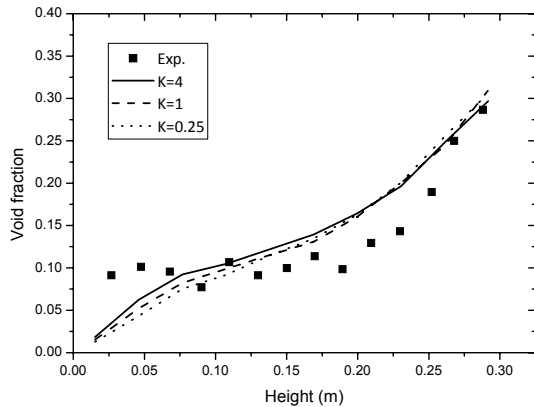


Fig. 21 Effects of K-factor on axial void profiles for case 9

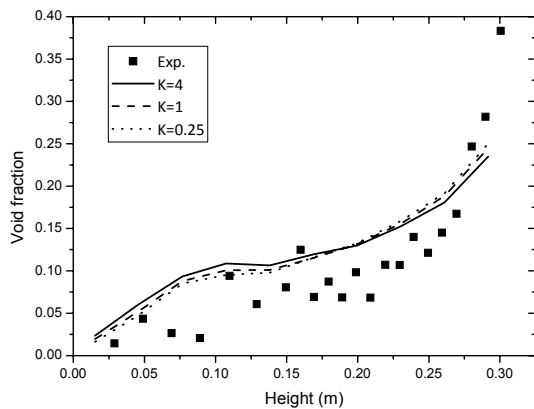


Fig. 22 Effects of K-factor on axial void profiles for case 10

열분배모델 내 주요인자의 최적 부모모델 검증에 사용하였던 Zeitoun의 실험에 대해서도 K-인자의 영향을 평가하였다. Figs. 21와 22은 실험 case 9 과 case 10에서 K-인자의 변화에 따른 단면평균 기포율의 예측 결과를 보여준다. 분명, 핵생성위 치밀도나 기포이탈직경에 비해 벽면 비등량 계산에 미치는 영향은 미미하나, 일관되게 K-인자가 작을수록 가열부 초기의 기포율이 낮게 예측되는 경향을 보인다. 기포율 평균 오차와 RMSE 계산 결과, 저압 미포화비등 실험에 대한 최적 모의를 위해서는 본 연구를 통해 도출된 최적 부모모델 조합과 함께 K-인자로 1을 적용하는 것이 가장 적합한 것으로 증명되었다.

5. 결론

열분배모델을 적용한 기기해석코드 CUPID를 사용하여 수직유로에서의 저압 미포화비등 현상

을 해석하였다. 열분배모델 내 주요 인자에 사용되는 부모모델에 대한 민감도 분석을 통해 저압 조건 미포화비등 예측에 적합한 부모모델 조합을 도출하였으며, K-인자가 기포율 분포에 미치는 영향을 평가하였다.

그 결과 최적 부모모델 조합으로서 핵생성위치밀도에 Kocamustafaogullari and Ishii 모델, 기포이탈빈도에 Cole의 모델, 기포이탈직경에 Fritz의 모델을 적용함으로써 저압 미포화비등 조건에서의 기포율 분포 예측 정확도를 크게 개선할 수 있음을 증명하였다. 또한, K-인자는 가열부 초기의 기포율 분포와 ONB 지점의 예측에 영향을 미치며, 도출한 부모모델 조합과 함께 K-인자로 1을 적용하였을 때 최적 해석결과를 얻을 수 있었다. 따라서 저압 조건에서의 비등현상 예측이 중요한 과도해석에 대해서는 상기의 부모모델 조합과 K-인자로 1의 적용이 권장된다.

SUBO 실험 해석에서 파악할 수 있듯이, 최적 부모모델 적용을 통해 열분배모델을 사용한 벽면 비등량의 예측능력은 개선할 수 있으나, 반경방향 기포율 분포는 이와 더불어 계면운동량전달력의 모델링에 좌우된다. 따라서 향후 CFD 스케일의 전산해석코드에서 기포의 다차원 공간 분포에 대한 해석 정확도를 개선하기 위해서는 견인력과 비견인력 모델에 대한 평가와 검증이 요구된다.

후 기

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Christensen, H., 1961, "Power-to-void Transfer Functions," ANL-6385, Argonne National Laboratory, Argonne, USA.
- (2) Bartolomey, C. C. and Chanturiya, V. M., 1967, "Experimental Study of True Void Fraction When Boiling Subcooled Water in Vertical Tubes," *Thermal Engng*, Vol. 14, pp. 123~128.
- (3) Zeitoun, O. and Shoukri, M., 1997, "Axial Void Fraction Profile in Low Pressure Subcooled Flow Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 4, pp. 869~879.
- (4) Thorncroft, G. E., Klausner, J. F. and Mei, R.,

- 1998, "An Experimental Investigation of Bubble Growth and Detachment in Vertical Upflow and Downflow Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 23, pp. 3857~3871.
- (5) Basu, N., Warrier, G. R. and Dhir, V. K., 2002, "Onset of Nucleate Boiling and Active Nucleation Site Density During Subcooled Flow Boiling," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 124, No. 4, pp. 717~728.
- (6) Situ, R., Hibiki, T., Sun, X., Mi, Y. and Ishii, M., 2004, "Axial Interfacial Area Transport of Subcooled Boiling Flow in an Internally Heated Annulus," *Exp. Fluids*, Vol. 37, pp. 589~603.
- (7) Yun, B. J., Bae, B. U., Euh, D. J., Park, G. C. and Song, C. -H., 2010, "Characteristic of the Local Bubble Parameters of a Subcooled Boiling Flow in an Annulus," *Nucl. Eng. Design*, Vol. 240, No. 9, pp. 2295~2303.
- (8) Bae, B. U., 2008, "Development of CFD code for Subcooled Boiling Two-phase Flow with Modeling the Interfacial Area Transport Equation," Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea.
- (9) Hoang, N. H., Chu, I. C., Euh, D. J. and Song, C. -H., 2016, "A Mechanistic Model for Predicting the Maximum Diameter of Vapor Bubbles in a Subcooled Boiling Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 94, pp. 174~176.
- (10) Hibiki, T., Lee, T. H., Lee, J. Y. and Ishii, M., 2006, "Interfacial Area Concentration in Boiling Bubbly Flow Systems," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 61, pp. 7979~7990.
- (11) Ivey, H. J., 1967, "Relationships between Bubble Frequency, Departure Diameter and Rise Velocity in Nucleate Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10, No. 8, pp. 1023~1040.
- (12) Tu, J. Y. and Yeoh, G. H., 2002, "On Numerical Modeling of Low-pressure Subcooled Boiling Flows," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 6, pp. 1197~1209.
- (13) Degha, A. L. and Chaker, A., 2010, "Numerical Study of Subcooled Boiling in Vertical Tubes Using Relap5/Mod3.2," *J. Electron Devices*, Vol. 7, pp. 240~245.
- (14) Bae, B. U., Yun, B. J., Yoon, H. Y., Song, C. -H. and Pack, G. C., 2010, "Analysis of Subcooled Boiling Flow with One-group Interfacial Area Transport Equation and Bubble Lift-off Model," *Nucl. Eng. Design*, Vol. 240, No. 9, pp. 2281~2294.
- (15) Krepper, E., Koncar, B. and Egorov, Y., 2007, "CFD modelling of Subcooled Boiling: Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design," *Nucl. Eng. Design*, Vol. 237, No. 7, pp. 716~731.
- (16) Koncar, B., Kljenak, I. and Mavko, B., 2004, "Modelling of Local Two-phase Flow Parameters in Upward Subcooled Flow Boiling at Low Pressure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, No. 6-7, pp. 1499~1513.
- (17) CD-adapco, 2014, "STAR-CCM+ User Guide 9.02," USA.
- (18) ANSYS Inc., 2009, "ANSYS CFX-Solver Theory Guide: Release 12.1," USA.
- (19) KAERI, 2015, "CUPID code Manuals Vol. 1: Mathematical Models and Solution Methods, Version 1.9," Korea.
- (20) Kurul, N. and Podowski, M. Z., 1990, "Multi-dimensional Effects in Forced Convection Subcooled Boiling," *9th International Heat Transfer Conference*, Jerusalem, Israel.
- (21) Cole, R., 1960, "Photographic Study of Boiling in Region of Critical Heat Flux," *AIChE Journal*, Vol. 6, pp. 533~542.
- (22) Cole, R. and Rohsenow, W., 1969, "Correlation of Bubble Departure Diameters for Boiling of Saturated Liquids," *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 65, pp. 211~213.
- (23) Lemmert, M. and Chwala, J. M., 1977, "Influence of Flow Velocity on Surface Boiling Heat Transfer Coefficient," In: Hahne, E., Grigull, U.(Eds.), *Heat Transfer in Boiling*, Academic Press and Hemisphere, New York, USA.
- (24) Hibiki, T. and Ishii, M., 2003, "Active Nucleation Site Density in Boiling Systems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, No. 14, pp. 2587~2601.
- (25) Kocamustafaogullari, G. and Ishii, M., 1983, "Interfacial Area and Nucleation Site Density in Boiling Systems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 9, pp. 1377~1387.
- (26) Fritz, W., 1935, "Maximum Volume of Vapor Bubbles," *Phys. Z.*, Vol. 36, pp. 379~384.
- (27) Tolubinsky, V. I. and Kostanchuk, D. M., 1970, "Vapor Bubbles Growth Rate and Heat Transfer

- Intensity at Subcooled Water Boiling," 4th International Heat Transfer Conference, Paris, France.
- (28) Judd, R. L. and Hwang, K. S., 1976, "A Comprehensive Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Including Microlayer Evaporation," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 98, No. 4, pp. 623~629.
- (29) Kenning, D. B. R., Victor, H. and Del Valle, M., 1981, "Fully Developed Nucleate Boiling: Overlap of Areas of Influence and Interference between Bubble Sites," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, No. 6, pp. 1025~1032.
- (30) Victor, H., Del Valle, M. and Kenning, D. B. R., 1985, "Subcooled Flow Boiling at High Heat Flux," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 10, pp. 1907~1920.
- (31) Golobic, I., Petkovsek, J., Baselj, M., Papez, A. and Kenning, D. B. R., 2009, "Experimental Determination of Transient Wall Temperature Distributions Close to Growing Vapor Bubbles," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, No. 7, pp. 857~866.
- (32) Kenning, D. B. R. and Yan, Y., 1996, "Pool Boiling Heat Transfer on a Thin Plate: Features Revealed by Liquid Crystal Thermography," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 15, pp. 3117~3137.
- (33) Song, J. K., Park, J. S., Jung, Satbyoul and Kim, H. D., 2014, "Experimental Study on Heat Flux Partitioning in Subcooled Nucleate Boiling on Vertical Wall," *Trans Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 6, pp. 465~474.
- (34) Cho, Y. J. and Yoon, H. Y., 2015, "Effect of Bubble Influence Area Factor on Wall Heat Flux Partitioning in CUPID Simulation of SUBO Experiment," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Korea.