

# 물-기체 2상 유동 해석을 위한 Semi-Implicit 방법의 대류항에 대한 2차 정확도 확장

조형규,<sup>\*1</sup> 이희동,<sup>2</sup> 박익규,<sup>3</sup> 정재준<sup>3</sup>

## IMPLEMENTATION OF A SECOND-ORDER INTERPOLATION SCHEME FOR THE CONVECTIVE TERMS OF A SEMI-IMPLICIT TWO-PHASE FLOW ANALYSIS SOLVER

H.K. Cho,<sup>\*1</sup> H.D. Lee,<sup>2</sup> I.K. Park<sup>3</sup> and J.J. Jeong<sup>3</sup>

A two-phase (gas and liquid) flow analysis solver, named CUPID, has been developed for a realistic simulation of transient two-phase flows in light water nuclear reactor components. In the CUPID solver, a two-fluid three-field model is adopted and the governing equations are solved on unstructured grids for flow analyses in complicated geometries. For the numerical solution scheme, the semi-implicit method of the RELAP5 code, which has been proved to be very stable and accurate for most practical applications of nuclear thermal hydraulics, was used with some modifications for an application to unstructured non-staggered grids. This paper is concerned with the effects of interpolation schemes on the simulation of two-phase flows. In order to stabilize a numerical solution and assure a high numerical accuracy, the second-order upwind scheme is implemented into the CUPID code in the present paper. Some numerical tests have been performed with the implemented scheme and the comparison results between the second-order and first-order upwind schemes are introduced in the present paper. The comparison results among the two interpolation schemes and either the exact solutions or the mesh convergence studies showed the reduced numerical diffusion with the second-order scheme.

**Key words :** 2상 유동(Two-phase flow), 반내재적 기법(Semi-Implicit Method), 원자로 열수력(Nuclear Thermal-Hydraulics)

### Nomenclature

$C_p$  Specific heat  
 $\vec{dx}$  Distance vector  
 $e$  Internal energy  
 $E$  Energy diffusion term  
 $F$  Interfacial drag force term  
 $g$  Gravity acceleration  
 $h$  Enthalpy

$H$  Interfacial heat transfer coefficient  
 $j$  Superficial velocity  
 $k$  Conductivity  
 $M$  Interfacial momentum transfer term  
 $\dot{m}$  Mass flow rate  
 $N_f$  Number of faces in a cell  
 $n_p$  Number of nodes on a face  
 $P$  Pressure  
 $Q$  Interfacial heat transfer term  
 $q$  Wall heat transfer term  
 $q''$  Wall heat flux  
 $S$  Entrainment or De-entrainment rate  
 $t$  Time  
 $T$  Temperature  
 $u$  Velocity  
 $V$  Volume  
 $W$  Width

접수일: 2009년 8월 12일, 수정일: 2009년 12월 4일,

게재확정일: 2009년 12월 11일.

1 정회원, 한국원자력연구원

2 학생회원, KAIST

3 정회원, 한국원자력연구원

\* Corresponding author, E-mail: hkcho@kaeri.re.kr

$X$	Non-condensable gas quality
$y^*$	Dimensionless elevation ( $y/H$ )

## Greek Letter

$\alpha$	Volume fraction
$\chi$	Interface drag factor
$\Gamma$	Vapor generation rate
$\eta$	Fraction of vapor generated from droplets
$\Phi$	Slope limiter
$\Theta$	Convective quantity
$\rho$	Density
$\tau$	Shear stress
$\psi$	Volume flow
$\Omega$	Total mass transfer rate

## Subscripts

$d$	Droplet
$DE$	De-entrainment
$E$	Entrainment
$g$	Gas
$i$	Interface
$in$	Inlet
$k$	$=g, l, \alpha, d$
$l$	Liquid
$m$	Mixture
$\bar{m}$	Mean
$n$	Non-condensable
$n$	Node
$sat$	Saturation
$v$	Vapor
$w$	Wall
$wall$	Wall

## 1. 서론

전통적으로 원자력 발전소의 안전성 평가는 1차원 2상 유동 모델에 기반을 둔 계통 분석 코드로 수행해왔다. 그러나 신형 원자로 및 신개념 안전 계통이 개발됨에 따라, 열수력 거동의 사실적 평가가 중요해지고 다차원 2상 유동 해석의 필요성이 부각되었다.

한국형 신형 원자로 APR1400의 경우, 냉각재 상실 사고 시 비상노심냉각수의 우회 및 강수부 비등(Downcomer Boiling)과 같은 다차원 2상 유동 현상이 발전소의 안전성과 관련된 주요 현안으로 대두되었다[1]. 이들은 다차원 현상일 뿐만 아니라 다양한 2상 유동양식(flow regime), 상 변화(phase change) 및 상 분리(phase separation) 등이 발생하는 현

상으로서, 현재의 계통분석 코드 및 전산유체(CFD) 코드로는 정확한 해석이 어렵다고 보고되었다. 계통분석 코드는 다차원 현상 해석이 제한적이며, 전산유체 코드는 원자로 내부의 복잡한 2상 유동 현상에 대한 과도 상태(transient) 해석에 비효율적이기 때문이다.

이러한 이유로 원자로 내의 특정 기기 내에서 발생할 수 있는 다차원 2상 유동에 대한 보다 효율적인 해석을 위해 기기 스케일 열수력 해석(component scale thermal hydraulic analysis)의 필요성이 제시되었다[2]. 이는 원자로 용기, 증기 발생기, 가압기, 격납 용기 등 원자력 발전소의 주요 기기들에 대해 다차원 해석을 수행하는 방법으로, 계통 스케일 해석(system scale analysis) 및 국소 스케일 해석(local scale analysis)과 함께 다중 스케일(multi-scale) 열수력 해석 방법을 구성하고 있다[3]. 원자로 기기에서 발생하는 고유의 열수력 현상에 대한 모델을 이용하여 계산을 수행하므로, 효율적인 계산이 가능하며, 따라서 현재 국외의 많은 기관들에서 COBRA-TF, FLICA, OVAP, ATHOS, GOTHIC 등과 같은 기기 해석 코드를 개발하여 사용 중에 있다.

한국원자력연구원에서는 국내의 기기해석에 대한 기술 수요 증가를 고려하여 기기 열수력 코드의 수치해석 모듈 CUPID를 개발 중에 있다[2]. 개발 중인 CUPID 수치 해석 모듈의 주요 사항은 다음과 같다.

- 지배방정식: 3차원 2유체 3장(three-field) 모델
- 유한 체적법, 비엇갈림 격자(collocated mesh)
- 비정렬 격자계
- 수치해석 방법: semi-implicit[2], SMAC[4], SIMPLE[5]
- 과도 상태 유동(transient flow)
- 다공성 매질 모델 포함
- 난류 모델: 대수 모델 및 표준 k- $\epsilon$  모델

본 연구의 선행 연구들에서 다양한 개념문제 해석을 통해 CUPID가 사용 중인 2상 유동 수치해법의 정확성 및 적용성을 검증하였다[2,4,5]. 그 결과 원자로 기기 내에서 발생할 수 있는 다양한 2상 유동 현상을 CUPID 해석 모듈이 적절히 계산할 수 있음을 확인하였다. 이때 지배방정식의 대류항을 계산하기 위해 1차 정확도(first-order) 풍상 차분법(upwind method)을 적용하였다.

본 연구에서는 수치 확산을 줄이고 계산 정확도를 향상시키기 위해 CUPID에 적용한 2차 정확도(second-order) 풍상 차분법에 대해 기술하였다. 압축성 유동 해석을 위해 개발된 2차 정확도 방법을 2상 유동 해석에 적합하게 수정하여 적용하였으며, 불연속적인 기포율(void fraction) 분포가 존재할 경우 발생할 수 있는 불안정성을 방지하기 위한 방법을 추가하였다. 또한 적용된 2차 정확도 방법이 상 변화 및 상 분리가 발생하는 2상 유동 해석 시에도 정확도를 증가시킬 수 있다

는 것을 확인하기 위해 다양한 수치 시험을 수행하였으며, 그 결과를 기술하였다.

### 2. 2-유체 모델 지배 방정식

CUPID 수치해석 모듈이 채택하고 있는 2상 유동 지배방정식은 2-유체 모델 (two-fluid model)로서, 기체, 연속 액체 그리고 액적에 대해 독립적인 유동을 고려하는 3-장 (three-field) 모델을 사용하고 있다. 각 상에 대한 독립적인 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 이용하여 유동을 기술하며, 상 간의 상호 작용은 계면 전달항 (interfacial transfer term)을 이용하여 모델한다.

각 상에 대한 연속 방정식은 다음과 같다.

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

여기서,

$$\Omega_g = \Gamma_v + \Gamma_{wall} \quad (2)$$

$$\Omega_l = -(1-\eta)\Gamma_v - \Gamma_{wall} - S_E + S_{DE} \quad (3)$$

$$\Omega_d = -\eta\Gamma_v + S_E - S_{DE} \quad (4)$$

증기와 비응축성 기체가 함께 존재할 경우를 고려하기 위해 비응축성 기체에 대한 연속 방정식을 추가하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g X_n) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g X_n \underline{u}_g) = 0 \quad (5)$$

여기서  $X_n$ 은 기체 혼합체 중 비응축성 기체의 질량비를 의미한다. 이때, 비응축성 기체는 증기와 균질하게 섞여 온도와 속도가 증기와 동일하다고 가정하였다.

각 상에 대한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\underline{\tau}_k + \underline{\tau}_k^T)] + \alpha_k \rho_k \underline{g} + \underline{M}_{ik} \quad (6)$$

여기서  $\underline{M}_{ik}$ : 계면 운동량 전달항

에너지 방정식의 경우, 액적과 연속 액체 간의 열적 평형 상태( $T_d = T_l$ )를 가정하였는데, 이는 원자력 안전과 관련된 대부분의 경우에 적용될 수 있는 가정이다. 결과적으로 기체

및 전체 액체에 대한 2개의 에너지 방정식만을 갖는다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \underline{u}_g) = -P \frac{\partial}{\partial t} \alpha_g + E_g^D - P \nabla \cdot (\alpha_g \underline{u}_g) + Q_{ig} - Q_{gl} + q_{wg} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\alpha_g)\rho_l e_l] + \nabla \cdot [(\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d)\rho_l e_l] = -P \frac{\partial}{\partial t}(1-\alpha_g) + E_l^D - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d) + Q_{il} + Q_{gl} + q_{wl} \quad (8)$$

여기서  $E_k^D$ 는 확산과 관련된 항을 의미한다.

식 (1,6,7,8)의 지배방정식에는 모두 상 간의 질량, 운동량 및 에너지 전달항을 포함하고 있다. 먼저 계면 열전달 항( $Q_{ig}$  및  $Q_{il}$ )은 다음과 같이 모델하였다.

$$Q_{ig} = P_s/P \cdot H_{ig} A_i (T_{sat} - T_g) + \Gamma_v h_{gi} + \Gamma_{wall} h_{g,sat} \quad (9)$$

$$Q_{il} = H_{il} A_i (T_{sat} - T_l) - \Gamma_v h_{li} - \Gamma_{wall} h_l \quad (10)$$

여기서  $(h_{gi}, h_{li}) = (h_{g,sat}, h_l)$  if  $\Gamma \geq 0$ ,  
 $(h_{gi}, h_{li}) = (h_g, h_{l,sat})$  if  $\Gamma < 0$ .

각 상의 계면 열전달 항들의 합 ( $Q_{ig}$  및  $Q_{il}$ )은 0이 되어야 하므로, 단위 체적 당 증기 생성량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_v = -\frac{P_s}{P} \frac{H_{ig} A_i (T_{sat} - T_g) + H_{il} A_i (T_{sat} - T_l)}{h_{gi} - h_{li}} \quad (11)$$

식 (7) 및 (8)의  $Q_{gl}$ 은 비응축성 기체와 액체 간의 계면 열전달을 나타내는 항이다.

$$Q_{gl} = (P - P_s)/P \cdot H_{gl} A_i (T_g - T_l) \quad (12)$$

식 (6)의 계면 운동량 전달항 ( $\underline{M}_{ik}$ )은 계면 마찰 (interfacial drag) 및 상 변화에 의한 운동량 전달 등을 포함한다.

$$\underline{M}_{ik} = -\underline{F}_{gl} - \underline{F}_{gd} + \Gamma_v \underline{u}_{gi} + \Gamma_{wall} \underline{u}_{gi} \quad (13)$$

$$\underline{M}_{il} = -\underline{F}_{gl} - (1-\eta)\Gamma_v \underline{u}_{li} - \Gamma_{wall} \underline{u}_{li} - S_E \underline{u}_l + S_{DE} \underline{u}_d \quad (14)$$

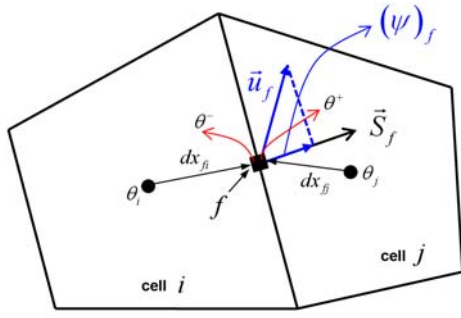


Fig. 1 Face value evaluation for upwind scheme

$$\underline{M}_{id} = -\underline{F}_{gd} - \eta \Gamma_i \underline{u}_{di} + S_{f_i} \underline{u}_i - S_{DE} \underline{u}_d \quad (15)$$

이 중 계면 마찰항은 계면 마찰 속도( $\underline{u}_{ki}$ )를 포함하고 있으며, 이는 상 변화가 발생하기 이전 상태의 속도로 가정하였다.

이와 같은 지배 방정식들의 독립 상태 변수들은  $P$ ,  $\alpha_k$ ,  $\underline{e}_k$  및  $X_n$ 이며, 각 상의 속도  $\underline{u}_k$  또한 미지수이다. 이들 이외에 각 상의 밀도 및 온도, 포화 온도, 포화 압력 등과 같은 종속 상태 변수 들은 상태 방정식(EOS: equation of the state)을 통해 독립 상태 변수의 함수로 변환하여 계산한다.

본 논문에서 2차 정확도 확장을 위해 사용한 수치해법은 semi-implicit 방법으로서 이에 대한 자세한 내용은 Jeong et al.[2,6]에 기술하였다.

### 3. 2상 유동을 위한 2차 정확도 풍상 차분 방법

CUPID가 사용 중인 2상 유동 2-유체 모델의 대류항들은 다음과 같이 이산화된다.

- k 상의 연속 방정식

$$\int \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k^{n+1}) dV \approx \sum_f (\alpha_k \rho_k)_f (\psi_k)_f^{n+1} \quad (16)$$

여기서  $(\psi_k)_f = (\underline{u}_k \cdot \underline{S})_f$ : 격자 면(cell face)에서의 체적 유량.

- 비응축성 기체의 연속 방정식

$$\int \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g X_n \underline{u}_g^{n+1}) dV \approx \sum_f (\alpha_g \rho_g X_n)_f (\psi_g)_f^{n+1} \quad (17)$$

- k 상의 에너지 방정식

$$\int \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{e}_k \underline{u}_k^{n+1}) dV \approx \sum_f (\alpha_k \rho_k \underline{e}_k)_f (\psi_k)_f^{n+1} \quad (18)$$

운동량 방정식의 경우, 식 (6)의 좌변을 다음과 같이 비보전형으로 바꾸어 이산화한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) \\ &= \alpha_k \rho_k \frac{\partial \underline{u}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) - \underline{u}_k \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) \\ & \quad - \underline{u}_k \Omega_k \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)의 우변에는 2개의 대류항이 나타나며, 이를 이산화하면 식 (20) 및 (21)과 같다.

$$\int \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k^n \underline{u}_k^n) dV \approx \sum_f (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k)_f (\psi_k)_f^n \quad (20)$$

$$- \int \underline{u}_k \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) dV \approx - \underline{u}_k \sum_f (\alpha_k \rho_k)_f (\psi_k)_f^n \quad (21)$$

따라서 이산화된 대류항의 일반적인 형태는 식 (22)와 같다.

$$A \sum_f (\theta)_f (\psi_k)_f, \quad (22)$$

여기서  $(\theta)_f$ : 대류에 의해 전달되는 물리량.

1차 정확도 풍상 차분법을 사용하여 대류항을 계산할 경우, 격자 면에서의 값  $(\theta)_f$ 를 유동 방향에 따라 상류 값을 이용하여 결정한다.

$$(\theta)_f = \begin{cases} \theta^- = \theta_i & \text{if } (\psi)_f \geq 0 \\ \theta^+ = \theta_j & \text{if } (\psi)_f < 0 \end{cases} \quad (23)$$

여기서  $\theta_i$ ,  $\theta_j$ ,  $\theta^+$  및  $\theta^-$ 의 의미는 Fig. 1에 나타내었다.

이와 달리, 2차 정확도 풍상 차분법을 사용할 경우 대류항은 상류 격자의 중심 값과 그 기울기를 이용하여 식 (24)와 같이 결정된다.

$$(\theta)_f = \begin{cases} \theta^- = \theta_i + \Phi(\nabla \theta)_i \cdot \underline{dx}_{fi} & \text{if } (\psi)_f \geq 0 \\ \theta^+ = \theta_j + \Phi(\nabla \theta)_j \cdot \underline{dx}_{fj} & \text{if } (\psi)_f < 0 \end{cases} \quad (24)$$

여기서,  $\underline{dx}_{kf} = \underline{x}_f - \underline{x}_k$ ,  $\Phi$ : 기울기 제한자(slope limiter).

상류 격자 중심에서의 기울기  $\nabla \theta$ 을 계산하기 위해

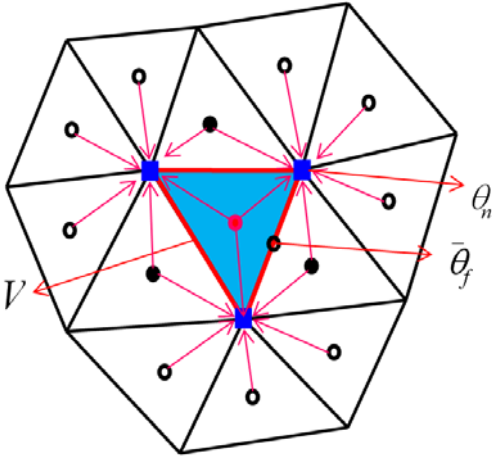


Fig. 2 Frink's Pseudo-Laplacian weighting method

Green-Gauss 방법에 기반을 둔 Frink's restructuring method[7]를 적용하였다.

$$(\nabla\theta)_i = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\theta}_f S_f \tag{25}$$

여기서  $\bar{\theta}_f = \sum_{k=1}^{n_p} \theta_{n,k} / n_p$ ; 상류 격자의 각 격자점 (node) 값을 내삽하여 계산한 격자 면에서의 값,

- $n_p$  : 해당 면을 구성하는 격자점의 개수,
- $\theta_n$  : node에서의 값.

본 연구에서는  $\theta_n$ 을 계산하기 위해 Fig. 2와 같이 Pseudo-Laplacian weighting method[8]를 사용하였다.

$$\theta_n = \sum_{i=1}^{n_c} w_i \theta_i / \sum_{i=1}^{n_c} w_i$$

한편, 2상 유동 수치 해석 시 두 격자 간의 경계에서 물리량들의 불연속성이 존재하는 경우가 흔히 나타난다. 특히, 2상 유동 해석의 주요 변수 중 하나인 기포율( $\alpha_g$ , void fraction)의 경우, 상 변화 및 상 분리가 발생할 경우 급격한 기포율 변화가 인접한 두 격자에서 나타날 수 있다. 이러한 불연속성이 존재하는 영역에 고차 정확도 방법을 사용하면 비물리적인 진동이 발생할 수 있기 때문에, 이를 막고 대류항 계산 시의 안정성을 확보하기 위해 기울기 제한자(slope limiter,  $\Phi$ )를 도입하였다. 압축성 유동에서 불연속면을 다루기 위해 다양한 기울기 제한자가 제시되었는데, 본 연구에서

는 그 중 범용성이 높으며 적용이 편리한 Barth and Jespersen[9] 방법을 다음과 같이 적용하였다.

$$\Phi_i = \min(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n_{f,i}}) \tag{26}$$

여기서  $n_{f,i}$ ; 격자 i를 이루는 면의 개수,

$$\phi_j = \begin{cases} \min(l, \Delta_{\max} / \Delta_j), & \text{if } \Delta_j > 0 \\ \min(l, \Delta_{\min} / \Delta_j), & \text{if } \Delta_j < 0 \\ 1, & \text{if } \Delta_j = 0 \end{cases}$$

$$\Delta_{\max,j} = \max(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_{f,i}}, \theta_i) = \theta_i$$

$$\Delta_{\min,j} = \min(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_{f,i}}, \theta_i) - \theta_i$$

$$\Delta_j = (\bar{\theta}_f)_j - \theta_i$$

이때 2상 유동의 특성을 고려하여 각 상의 체적 비  $\alpha_k$ 가  $10^{-3}$  보다 작은 경우 기울기 제한자를 0으로 설정하였다. 또한 연속 방정식 및 에너지 방정식을 위해 각각 계산된  $(\alpha_k \rho_k)_f$  및  $(\alpha_k \rho_k e_k)_f$  값은 항상 아래와 같은 조건을 만족시켜야만 한다.

$$\min(e_{k,i}, e_{k,j}) \leq (\alpha_k \rho_k e_k)_f / (\alpha_k \rho_k)_f \leq \max(e_{k,i}, e_{k,j})$$

이 조건은 각 방정식에 서로 다른 기울기 제한자 값을 적용할 경우 위배될 수 있으며, 이를 만족시키지 못할 경우, 기울기 제한자를 0으로 설정하여 안정적인 계산이 이뤄지도록 하였다.

#### 4. 수치 시험 결과

적용한 2차 정확도 방법을 평가하기 위한 수치 시험을 수행하였다. 단상 완전 발달 유동, 벽면 비등 유동(wall boiling flow), 중력에 의한 상 분리(phase separation) 현상 등 개념 문제(conceptual problem)들에 대한 해석을 통해 2차 정확도 적용 시, 수치 확산이 감소되는 지를 평가하였다. 각 계산은 성긴 격자(coarse mesh) 및 조밀 격자(fine mesh)에 대해 수행하여 격자 수렴성(mesh convergence) 및 2차 정확도 사용 시의 이점을 확인 하였다. 이때 난류 모델은 고려하지 않았다.

##### 4.1 단상 완전 발달 유동

첫 번째 수치 시험으로 단상 열적 완전 발달 유동에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 3은 계산 영역의 기하학적 현상과 경계 조건을 보여준다. 계산 영역의 하부와 상부가 각각 입구와

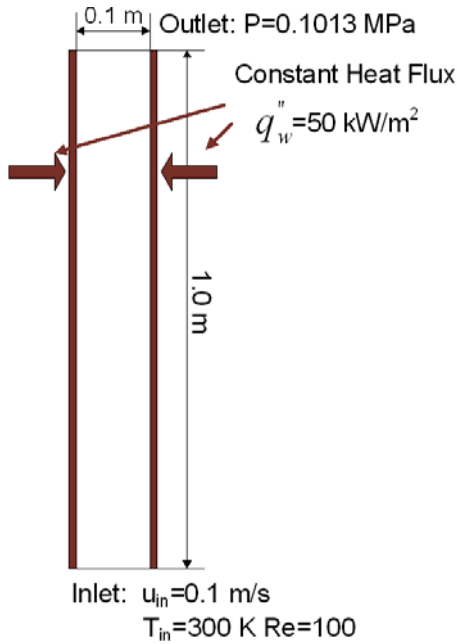


Fig. 3 Geometry and boundary conditions of the fully developed laminar flow

출구로 지정되었으며, 입구 경계의 유속과 온도는 0.1 m/s 및 300.0 K로서, Reynolds 수와 Prandtl 수는 각각 100 및 0.28이다. 출구 압력은 0.1013 MPa로 고정하였으며, 양 벽면에는 균일 열속(heat flux,  $q_w'' = 50 \text{ kW/m}^2$ )을 적용하였다. 이러한 조건에서 유동이 열적으로 완전 발달될 경우, 온도 분포는 다음과 같다[10].

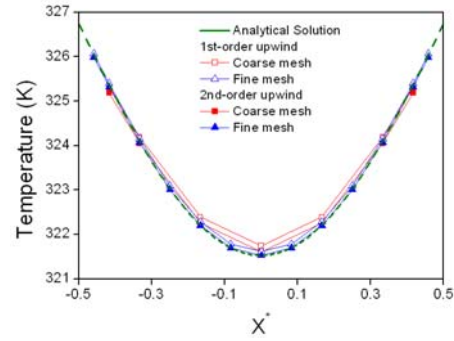
$$\frac{T_w - T(x)}{T_w - T_{mean}} = \frac{35}{136} \left[ 5 - 6 \left( \frac{x}{0.5 \cdot W} \right)^2 + \left( \frac{x}{0.5 \cdot W} \right)^4 \right] \quad (27)$$

여기서,

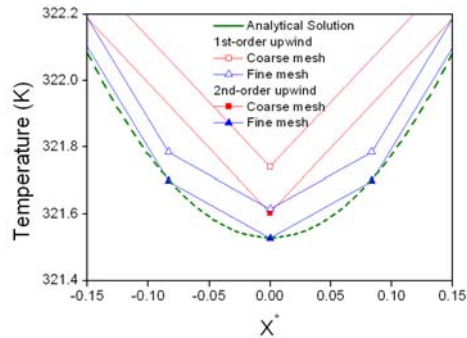
$$T_{mean}(y) = T_{mean, \infty} + \frac{2q''}{mc_p} y$$

$$\frac{T_w - T_{mean}}{q_w'' \cdot 2W/k} = \frac{17}{140}$$

수치시험은 균일한 직사각형 격자를 이용하여 성긴 격자(6 X 50) 및 조밀 격자(12 X 100)에 대해 수행되었으며 각 격자에 대해 1차 정확도 및 2차 정확도 방법을 적용하였다. Fig. 4에



(a) Whole region



(b) Center region

Fig. 4 Comparison of the calculated temperatures at  $y^*=0.95$  with the analytical solution

는 이러한 네 가지 경우에 대해  $y^*=0.95$ 인 위치에서의 온도 분포를 식 (27)의 해석해와 비교하였다.

Fig. 4에서 보이는 바와 같이 CUPID의 계산 결과가 해석해를 적절히 예측하며, 2차 정확도 방법을 사용하면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 이는 적용한 2차 정확도 방법이 단상유동에 대해 정확히 작동하고 있음을 의미한다.

#### 4.2 벽면 비등 유동

두 번째 수치 시험으로 벽면에서 비등이 발생하는 유동에 대한 계산을 수행하였다. 비등이 발생하여 단상 유동에서 2상 유동으로 천이가 발생할 경우 2차 정확도 방법이 안정적으로 계산 정확도를 증가시키는지 평가하기 위한 수치 시험으로, Fig. 5에 계산 영역의 기하학적 형상 및 경계 조건을 도시하였다. 채널의 하부는 입구로 유속 및 온도는 각각 1 m/s와 372.0 K이다. 출구인 채널의 상부에는 균일 압력 경계 조건이 적용되었으며, 그 압력은 0.1013 MPa이다. 벽면에는  $80 \text{ kW/m}^2$ 의 균일 열속이 인가되어 유체의 온도가 증가하고 특정 높이

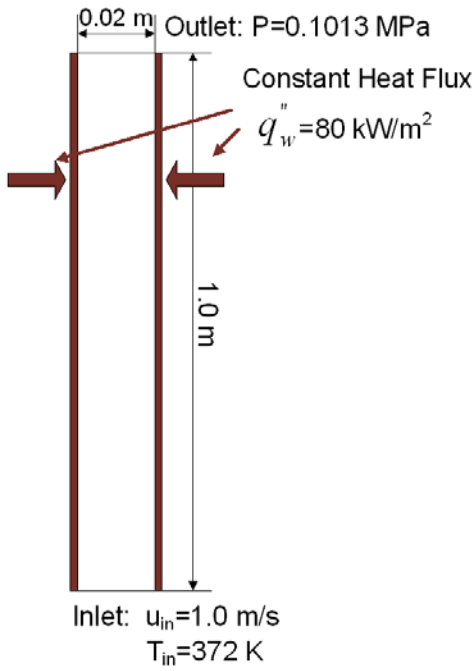


Fig. 5 Geometry and boundary conditions of the wall boiling flow

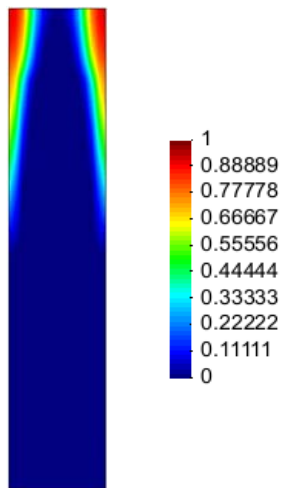
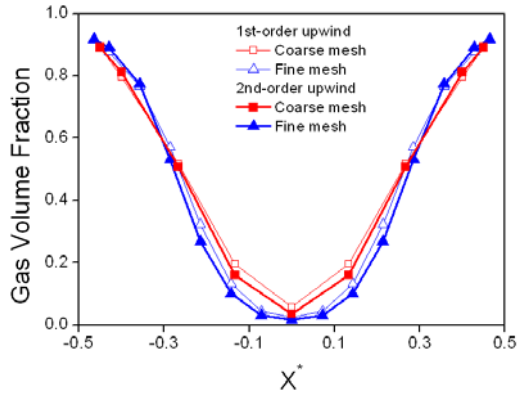


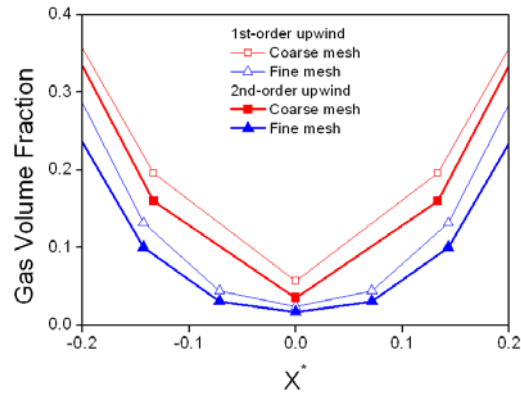
Fig. 6 Calculated void fraction distribution

이상에서는 비등이 발생한다. 짧은 계산 영역 내에서 완전 발달된 유동을 얻기 위해 물의 열전도도를 인위적으로 200배 크게 설정하여 계산을 수행하였다.

수치 시험은 직사각형 격자를 이용하여 성긴 격자(8 X 80) 및 조밀 격자(14 X 100)에 대해 수행하였으며, 각 경우에 대해 1차 정확도 및 2차 정확도 방법을 적용하였다. 벽면 비등의 경우 해석해가 존재하지 않기 때문에, 위의 네 가지 계산 결



(a) Whole region



(b) Center region

Fig. 7 Radial void fraction distributions at the exit

과를 서로 비교하여 격자 수렴성 경향을 확인하였다.

Fig. 6은 정상 상태에 도달했을 때 계산영역 내의 기포율 분포를 나타낸 그림이다. 높이 약 0.5 m 지점에서 비등이 발생하여 2상 유동 영역이 시작되고 높이에 따라 급격하게 기포율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 수평 방향의 기포율 변화 또한 급격하여, 채널의 출구 부근에서의 기포율은 벽면에서는 0.92, 중심부에서는 0.02로 크게 변하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 단상 유동에서 2상 유동으로의 유동 천이 및 급격한 기포율 변화가 존재하는 유동이 본 연구에서 개발 중인 수치해석 모듈을 사용하여 안정적으로 계산될 수 있다는 것을 확인하였다.

앞서 기술한 네 가지 계산에 대해 출구에서의 반경 방향 기포율 분포와 채널 중앙에서의 축 방향 기포율 분포를 각각 Fig. 7 및 8에 도시하였다. 두 그림 모두에서 격자 개수와 계산 정확도의 관계가 동일하게 나타난다. 격자 개수가 많아지면 반경 방향 기포율이 보다 급격하게 감소하며, 채널 중앙부

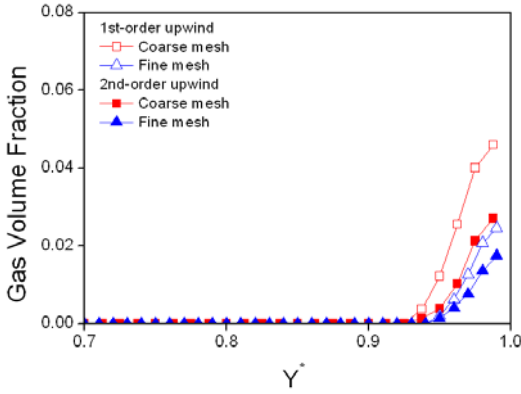


Fig. 8 Axial void fraction distributions along the center line

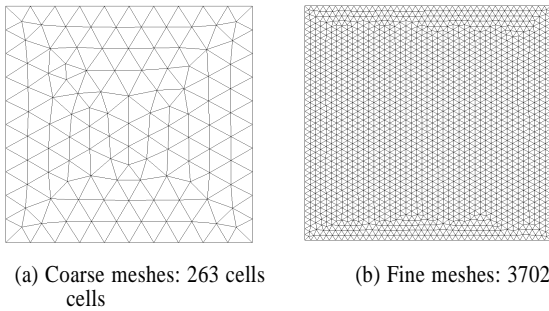


Fig. 9 Meshes for the phase separation

에서의 기포율은 작아진다. 이와 동일한 경향이 2차 정확도를 사용할 경우 나타나며, 이는 같은 수의 격자를 사용하더라도 2차 정확도에 의해 대류항을 계산했을 경우, 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 계산 결과로부터, 2차 정확도 방법을 적용할 경우 급격한 상 변화가 존재하는 유동에서도 안정적으로 보다 정확한 해를 얻을 수 있다는 것을 확인하였다.

### 4.3 중력에 의한 상 분리

2차 정확도 방법을 평가하기 위한 시험 문제로서 중력에 의한 상 분리 현상을 모의하였다[11]. 상 분리 현상은 균질하게 섞여있는 2상 유체가 중력에 의해 가벼운 기체는 위쪽으로, 액체는 아래쪽으로 이동하며 기상과 액상으로 완전히 분리되는 현상을 의미한다.

본 시험 문제의 계산 영역은 가로 1 m, 세로 1 m인 사각 평판으로, 초기에는 기포율이 0.5인 물-공기 혼합체로 채워져 있다. 계산 시작과 함께 중력에 의해 유체가 이동하기 시작하며, 물은 하부부터 채워져 올라오며 공기는 상부부터 내려온다. 최종적으로 상 분리가 완료되면, 채널의 중앙에 수위가

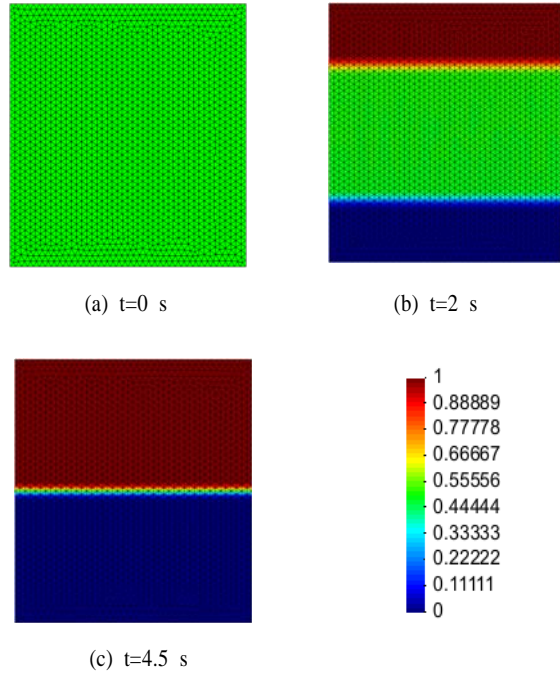


Fig. 10 Transient void distributions

형성되고 정상상태에 도달한다.

이와 같은 계산은 원자로 열수력 해석과 관련하여 매우 중요한 역류 유동(counter-current flow) 및 2상 유동에서 단상 유동으로의 천이 등 주요 열수력 현상을 포함하고 있기 때문에, 2상 유동 해석 코드의 주요 검증 문제로 인용되어 왔다[11]. 본 연구에서도 2차 정확도 사용 시 이러한 현상을 보다 정확하게 예측할 수 있는지를 평가하기 위해 수치 시험을 수행하였다. 또한 계산 중 급격한 기포율의 구배가 나타나기 때문에 고차 정확도 대류항 계산 시 발생할 수 있는 불안정성을 기울기 제한자를 통해 억제시킬 수 있는지의 여부를 평가하고자 하였다.

Fig. 9는 계산에 사용한 격자를 나타내며, 236개 및 3702개의 삼각형 격자를 사용하였다. 각 격자에 대해 1차 정확도 및 2차 정확도 방법이 각각 적용되어 총 4가지 경우에 대해 계산을 수행하였다.

상 분리 과정 동안에 각 상과 2상 유동 혼합체 간의 경계면이 이동하는 속도를 해석적으로 구할 수 있으며, 그 값은 다음과 같이 표현된다[11].

$$\begin{aligned}
 u_l &= \frac{\alpha_g \alpha_l (\rho_m - \rho_g) g}{\chi_i} \\
 u_g &= \frac{\alpha_g \alpha_l (\rho_m - \rho_g) g}{\chi_i}
 \end{aligned}
 \tag{28}$$



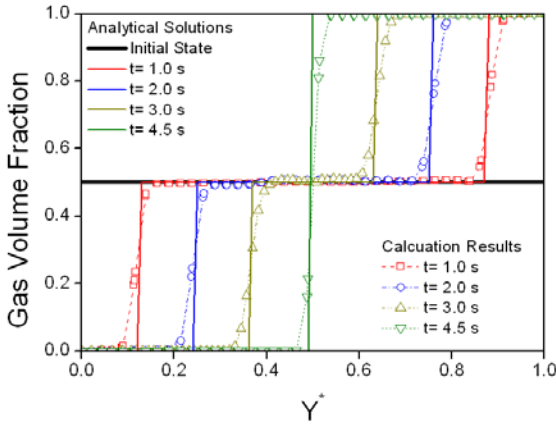


Fig. 11 Axial void fraction profiles at the center line

여기서  $\chi_i$ 는 계면 마찰 계수를 의미한다. 본 계산에서는 해석해와 수치해 간의 비교를 용이하게 하기 위해 다음과 같은 단순 계면 마찰 계수 모델을 적용하였다.

$$\chi_i = 40000 \cdot \alpha_g \alpha_l \quad (29)$$

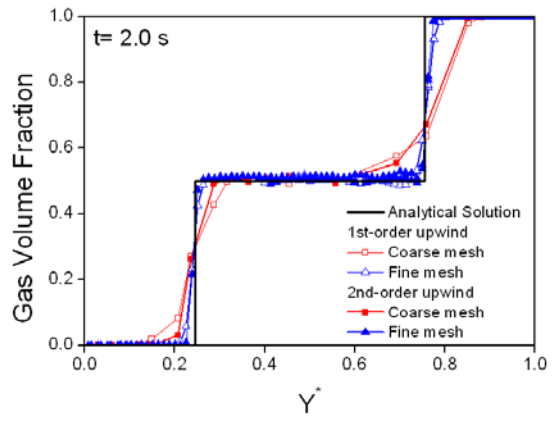
Fig. 10은 성긴 격자 및 1차 정확도 방법 적용 시, 초기 상태, 계산 시작 후 2초 및 4.5초 후의 기포를 분포를 나타낸 그림이다.

초기의 2상 혼합체가 4.5초 뒤 액체와 기체로 완전히 분리되는 과정이 안정적으로 계산되는 것을 볼 수 있다. Fig. 11은 계산 시작 후 1초, 2초, 3초 및 4.5초 후의 축 방향 기포율 분포를 식 (28)을 이용하여 계산한 해석해와 비교한 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 CUPID 해석 결과가 해석해를 근사적으로 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 12에는 총 4가지 계산에 대해 계산 시작 후 2초가 지났을 때의 기포율을 해석해와 비교하였다. 비교 결과 2차 정확도 방법을 적용할 경우, 동일한 격자에서 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

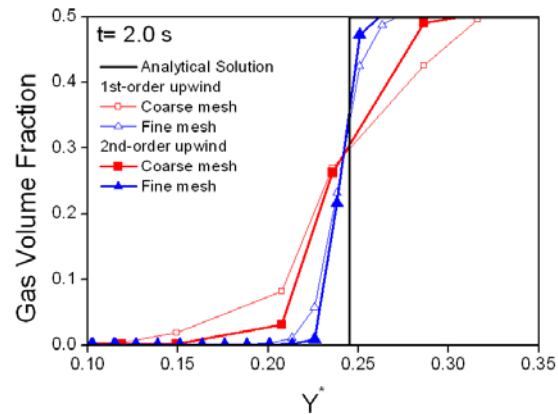
한편 급격한 기포율 변화가 존재하는 2상 유동 계산 동안 불안정성에 의한 문제가 야기되지 않았으며, 이는 적용한 기울기 제한자가 적절히 작동하고 있음을 의미한다

### 5. 결 론

원자력 발전소의 주요 기기에 대한 다차원 과도 상태 2상 유동 해석을 위한 수치해석 모듈 CUPID를 개발 중에 있다. 본 연구에서는 수치 확산을 줄이고 계산 정확도를 향상시키기 위해 CUPID의 대류항을 2차 정확도로 확장하였으며, 이때



(a) Whole region



(b) Bottom region

Fig. 12 Comparison of the calculated void fraction profiles with the analytical solution at t=2.0 s

계산의 정확도 및 강건성에 대한 수치 시험을 수행하였다. 각 격자에서 물리량의 구배를 계산하기 위해 Frink가 제안한 재구성 방법을 임의의 다각형에 적용 가능하도록 수정하여 사용하였다. 또한 2차 정확도 적용 시 계산의 강건성을 위해 Barth and Jespersen이 제안한 기울기 제한자를 도입하였고, 이를 상 변화 및 상 분리가 나타나는 2상 유동에 적합하게 수정하였다.

적용된 2차 정확도 방법을 평가하기 위해 단상 유동 및 2상 유동에 대한 수치 시험을 수행하였다. 열적으로 완전 발달된 층류 유동 해석, 벽면에서 비등이 발생하는 유동 해석, 중력에 의해 2상 혼합체가 액체와 기체로 분리되는 상 분리 유동 해석 등을 통해 제안된 2차 정확도 방법 및 기울기 제한자가 급격한 상 변화 및 기포율 구배가 나타나는 2상 유동 현상에 적용 가능함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단에서 지원하는 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.(Grant code: M20702040002-08M0204-00210).

## 참고문헌

- [1] 2003, Song, C.-H., Baek, W.P., Chung, M.K. and Park, J.K., "Multi-Dimensional Thermal Hydraulic Phenomena in Advanced Nuclear Reactor Systems: Current Status and Perspectives of R&D Program in KAERI," *Proc. NURETH-10*, Seoul, Korea.
- [2] 2008, Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Park, I.K., Cho, H.K. and Kim, J., "A Semi-implicit Numerical Scheme for Transient Two-phase Flows on Unstructured Grids," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.238, pp.3403-3412.
- [3] 2005, Bestion, D. and Guefil, A., "Status and Perspective of Two-Phase Flow Modelling in the NEPTUNE Multi-iscale Thermal-hydraulic Platform for Nuclear Reactor Simulation," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.37, pp.512-524.
- [4] 2009, Yoon, H.Y., Park, I.K., Lee, Y.J. and Jeong, J.J., "An Unstructured SMAC Algorithm for Thermal Non-equilibrium Two-phase Flows," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.36, pp.16-24.
- [5] 2008, Kim, J., Park, I.K., Kim, K.D. and Jeong, J.J., "Unstructured-mesh Pressure-based Algorithm for the Simulation of Two-phase Flows in a Light Water Nuclear Reactor," *Proc. NUTHOS-7*, Seoul Korea.
- [6] 2008, Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Cho, H.K., Kim, J. and Park, I.K., "A semi-implicit numerical scheme for a transient two-fluid three-field model on an unstructured grid," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.35, pp.597 - 605.
- [7] 1991, Frink, N.T., Parikh, P. and Pirzadeh, S., "A Fast Upwind Solver for the Euler Equations on Three-Dimensional Unstructured Meshes," *AIAA-91-0102*, Reno, Nevada.
- [8] 1994, Frink, N.T., "Recent Progress Toward a Three-dimensional Unstructured Navier-Stokes Flow Solver," *AIAA-94-0061*, Reno, Nevada.
- [9] 1989, Barth, J. and Jespersen, D.C., "The Design and Application of Upwind Schemes on Unstructured Meshes," *AIAA-89-0366*, Reno, Nevada.
- [10] 1987, Kakac, S., Shah, R.K. and Aung, W., *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer (I)*, John Wiley & Sons, Inc., pp.3.30-3.32.
- [11] 2006, H. Staedtke, *Gas Dynamic Aspects of Two-phase Flow*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim, pp.143-147.