

열수력 기기해석용 CUPID 코드 개발 및 평가 전략

박익규,¹ 조형규,² 이재룡,² 김정우,² 윤한영,² 이희동,³ 정재준^{*4}

THE DEVELOPMENT AND ASSESSMENT STRATEGY OF A THERMAL HYDRAULICS COMPONENT ANALYSIS CODE

I.K. Park,¹ H.K. Cho,² J.R. Lee,² J. Kim,² H.Y. Yoon,² H.D. Lee³ and J.J. Jeong^{*4}

A three-dimensional thermal-hydraulic code, CUPID, has been developed for the analysis of transient two-phase flows at component scale. The CUPID code adopts a two-fluid three-field model for two-phase flows. A semi-implicit two-step numerical method was developed to obtain numerical solutions on unstructured grids. This paper presents an overview of the CUPID code development and assessment strategy. The governing equations, physical models, numerical methods and their improvements, and the systematic verification and validation processes are discussed. The code couplings with a system code, MARS, and, a three-dimensional reactor kinetics code, MASTER, are also presented.

Key Words : CUPID 코드(CUPID Code), 평가 전략(Assessment Strategy), 기기 스케일(Component Scale), 코드 연계(Code Coupling)

기호설명(Nomenclature)

알파벳

a_i	계면 면적 밀도 [1/m]
A	표면적 [m]
c_p	정압 비열 [J/kg·K]
d_r	거리 벡터 [m]
D	직경 [m]
e_k	k상 내부 에너지 [J/kg]
E_k^D	에너지 확산률 [W/m ³ ·s]

F_{jk}	계면 운동량 전달률 [N/m ³ ·s]
g	중력 가속도 [m/s ²]
h	엔탈피 [J/kg]
H_{jk}	계면 열전달 계수 [W/m ² ·K]
j	겉보기 속도 [m]
k	난류 운동 에너지 [J/kg]
k_k	k상 열전도도 [W/m ² ·k]
n_f	수직 단위 벡터 [m]
N''	핵비등 밀도 [1/m ²]
Nu	Nusselt 수 [1]
P	압력 [N/m ²]
Pr	Prandtl 수 [1]
q'''	체적 열속 [W/m ³]
q''	열속 [W/m ²]
Q_{jk}	k상 계면 열전달률 [W/m ³]
Q_{gl}	비응축성 기체 잠열 전달률 [W/m ³]
Re	Reynolds 수 [1]

접수일: 2011년 4월 27일, 심사완료일: 2011년 5월 17일,

게재확정일: 2011년 5월 18일.

1 정회원, 한국원자력연구원

2 한국원자력연구원

3 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

4 정회원, 부산대학교 기계공학부

* Corresponding author, E-mail: jjjeong@pusan.ac.kr

S_{DE}	단위 체적당 액적 소실률 [kg/m ³ ·s]
S_E	단위 체적당 액적 포획률 [kg/m ³ ·s]
S_f	면벡터 [m]
S_t	Stokes 수 [1]
St	Stanton 수 [1]
t	시간 [s]
T	온도 [K]
u_k	k상 속도 [m/s]
u_{ki}	k상 계면 속도 [m/s]
u_τ	마찰 속도 [m/s]
V	부피 혹은 속도 [m ³ , m/s]
X	위치 벡터 [m]
X_n	비용축성 기체 건도 [1]

그리스문자

α_k	k상 부피 분율 [1]
Δt	시간 단계 크기, $t^{n+1} - t^n$ [s]
$\delta\varphi$	$\varphi^{n+1} - \varphi^n$ $\varphi = X_n, e_g, e_b, \alpha_g, \alpha_d$, or P
γ	기포 분율 차이 함수
Γ_g	단위체적당 수증기생성률 [kg/m ³ ·s]
η	액체내 액적 비율 [1]
μ	점성도 [N·s/m ²]
θ	대류량
ρ_k	k상 밀도 [kg/m ³]
σ	표면 장력 [N/m]
τ_k	점성 전단 응력 [N/m ²]
τ_k^T	난류 전단 응력 [N/m ²]
Ω_k	단위체적당 상간 질량전달률 [kg/m ³ ·s]
Ψ_k	체적유량 [m ³ /s]

아래첨자

b	버블
d	액적
f	포화수 혹은 격자면
g	포화증기
i	계면
k	k-상, 즉, 액체, 액적, 수증기
l	액체
n	비용축성 기체
s	수증기 혹은 포화 상태

sat	포화 상태
w	벽
	위첨자
m	예측 단계
n	이전 시간 단계
$n+1$	새로운 시간 단계

1. 서 론

최신 열수력 계통 코드는 경수로의 다양한 사고 조건을 분석할 수 있는 능력을 갖추고 있지만, 물리적 모델과 수치적 방법 측면에서 몇 가지 한계점을 내포하고 있다[1, 2]. 즉, 열수력 계통 코드의 경우 다차원 유동 현상을 1 차원 모델로 모사하고 있고, 정상 상태의 완전 발달된 유동 조건에서 개발된 유동양상 맵(flow regime map)을 사용하고 있으며, 시간과 공간에 대해 1 차 차분화를 하여 수치적으로 강건하지만 다차원 현상의 예측이 어렵고 수치 확산이 크다. 이러한 한계점을 극복하여 다차원 2상유동 열수력적 거동을 모사할 수 있는 향상된 성능을 가진 열수력 코드 개발이 필요하다.

한편, 컴퓨터 계산 속도의 향상으로 원자력 발전소 안전 해석에 전산 유체 역학 코드(Computational Fluid Dynamics; CFD)를 활용하는 연구가 진행 중에 있다. 그 일환으로 OECD/CSNI는 2상유동이 포함되어 있는 몇 가지 원자로 안전 문제에 대하여 CFD 코드의 적용을 제안하였다[3]. 상기 문제 들로는 드라이아웃(dry-out), 핵비등 이탈(Departure of Nucleate Boiling; DNB), 가압 열 충격(Pressurized Thermal Shock: PTS), 수조형 열교환기 등이 있다. 그러나, CFD 코드에서 채택하고 있는 2상유동 모델은 1차원 계통 코드의 2상유동 모델이나 CFD 코드에서 단상 유동 모델에 비해서 그 완성도가 떨어지기 때문에 상기 문제들을 물리적으로 적합하게 해석하기 위해서는 2상유동 모델의 완성도를 높이는 데 많은 노력이 필요한 실정이다.

기본적으로 2상유동은 서로 다른 시간 척도 및 공간 척도를 갖는 다양한 현상을 포함하고 있다. 어떤 2상유동 영역에 대해서는 아직 물리적 모델이 개발되지 않았고, 더욱이 작은 척도의 계산을 수행하기 위해서 요구되는 컴퓨터에 대한 계산 능력은 현재의 하드웨어 기술로는 달성할 수 없다. 그러므로, 당장 수십 년 안에 CFD 코드를 일반적인 2상유동 해석 코드로 사용하기는 어렵다. 이러한 점에서 거대, 중간, 미소 (macro, meso, micro) 척도 해석 도구를 사용한 서로 다른 척도 계산 간의 상호 피드백을 통한 다중 척도 계산법이 안전 해석 선진화의 유력한 대안으로 제시되고 있다[4]. 일반적으로 거대 및 중간 척도 계산에는 RANS(Reynolds Average

Navier-Stokes) 방정식을 사용하는 시간 평균 다유체 모델을 사용하고, 미소 척도 계산에서는 계면 추적 방법(interface tracking method)과 의사 직접 수치 모사(pseudo DNS)을 사용한다.

개별적으로 혹은 체계적인 방법으로 다중 척도 계산법을 산업에 적용하기 위한 다양한 노력을 하고 있다. 2001년에 시작된 ASTAR 프로젝트[5]에서는 3차원 2상유동의 수치 모사 분야에서 현재 상태를 분석하고 진일보된 미래 전망을 제시하였다. 2상유동 분석에 대한 산업적 요구에 의하여 2001년에 시작된 NEPTUNE 프로젝트[6,7]는 다중 척도(multi-scale) 계산과 다중 원리(multi-disciplinary) 계산을 쉽게 수행할 수 있고, 모든 척도를 하나의 체계화된 계산 도구를 가지고 모델링할 수 있는 신형 2상유동 열수력 도구의 개발을 목표로 하고 있다. 2상유동에 대한 계통 척도, 거대 척도, 중간 척도, 미소척도 계산에서 각각 많은 진전이 있었다. NEPTUNE-CFD와 TRIO-U 코드는 각각 중간 척도와 미소 척도의 계산을 수행할 수 있는 2상유동 코드이다.

MSMA 프로젝트는 다중 척도 모델링과 대류 비등의 분석에 중점을 두고 있는데, 궁극적으로 임계 열속을 예측하는 능력을 갖추는 것을 목표로 하고 있다[8]. ACE-3D 코드는 중간 척도 계산 코드로 분류되는데 2 유체 모델과 계면 추적 방법을 병합하는 선진 모델을 채용하였다[9]. ACE-3D 코드에서는 계산 격자보다 더 작은 버블이나 액적들의 계면 구조를 모델링하는데 2 유체 모델을 사용하고, 계산 격자보다 더 큰 액체 막이나 큰 버블들의 계면 구조를 모델링하는 데는 계면 추적 방법을 사용한다. 위에서 설명한 다중 척도 계산법을 2상유동 영역의 전체에 적용하는데는 아직도 많은 어려움이 있다.

한국원자력연구원에서 수행한 원자로 기기에서 2상유동에 대한 모사 실험과 계통 코드 해석의 상호 비교 결과 3차원 열수력 코드의 필요성이 제기되었고, 이에 따라 한국원자력연구원에서는 원자로 기기 해석을 위한 CUPID 코드 개발을 수행하고 있다[10, 11]. 원자로 직접 분사(DVI), 중력에 의한 피동 안전 주입 계통, 피동 2차 냉각 계통 등 신형디자인에서는 다차원적인 해석을 요구하고 있다. 이들 계통에서 어떤 현상들은 강제 대류가 없기 때문에 다차원적인 유동 형태가 나타난다. 예를 들면, DVI 계통에서 강수부 비등[12]과 수조에서 2상유동 혼합 현상 등에서의 자연 대류 현상은 2상유동에 의해 가속되는데, 이를 모사하기 위하여 고정밀 3차원적 해석이 요구된다. 그런데, 계통 해석 코드의 3차원 모듈이나 상업용 CFD 코드 어느 것도 극심한 상변화를 모사하는 능력이 충분하지 않기 때문에 신뢰성 있는 해석 결과를 제시하지 못한다. 이러한 점에서 3차원 고정밀 열수력 해석을 위한 CUPID 코드의 개발을 시작하였다.

CUPID 코드는 거대 척도 코드이고 향후에 중간 척도 또는

미소 척도와 같이 좀 더 작은 척도를 갖는 도구와 연계할 것이다. CUPID 코드 개발의 자료 기기의 2상유동을 해석하기 위한 독자적인 도구를 만드는 것이다. 그 뒤에 CUPID 코드를 계통 해석 코드에 연계할 것이고 또한 과도 원자로 노심의 연계 분석을 위하여 원자로 동특성 코드와도 연계할 것이다. CUPID 코드는 모델링의 한계를 극복하여 좀 더 정제된 2상유동 해석을 수행하는 것을 목표로 하고 있다.

CUPID 코드는 2상유동을 모사하기 위해 2 유체 3 장 (2 fluids 3 fields) 모델을 채택하고 있다. 상기 모델은 2상유동에 대한 국소 순간 형태의 지배 방정식을 시간 평균하여 구한 2 유체 단일 압력 모델의 확장 형태이다[13]. 지배 방정식에 대해 시간 평균을 적용하였기 때문에 국소에서 2상 계면 구조는 소실되고, 대신에 유동 영역 모델을 사용하여 계면의 존재만을 고려한다. 이렇게 시간 평균 지배 방정식으로 2상유동을 모사하면 국소 2상 계면 구조가 소실되어 질량, 운동량, 열전달량에서 오차가 커지는 근본적인 한계점이 존재한다. CUPID 코드에 대한 검증 계산을 수행하면서 이러한 한계점을 확인할 예정이다. CUPID 코드는 자유 매질(free media)과 다공성 매질(porous media)에 대해서 모델링과 해석을 수행할 수 있도록 설계하였다. 2상 운동량 방정식에서는 계면 견인력(interfacial drag force) 외에도 2상양력(lift force), 벽윤활력(wall lubrication force), 난류 확산력(turbulent dispersion force) 같은 비견인력(non-drag forces)을 모델링하였고, 선택적으로 활성화할 수 있게 하였다. 이러한 특징으로 CUPID 코드는 RELAP5-3D[14], MARS[15], 그리고 CATHARE-2[16]과 같은 계통 코드들에 내장되어 있는 3차원 모듈과 차별성을 갖게 되었다. 그런데, 자유 매질 접근 방식의 물리 모델은 기포 비율이 낮은 영역에만 존재하는 등의 이유로 자유 매질 방식으로 2상유동 영역 전체를 해석하는 데는 많은 한계점이 있다. 따라서, CUPID 코드가 어떤 유동 영역에서 적용성이 제한되는 지를 파악하고, 평가 전략도 이에 따라 수립되어야 한다.

본 논문에서는 CUPID 코드의 개발 현황과 평가 전략에 대한 개관을 제시하였다. 2 장에서는 2상유동에 대한 물리 모델을 제시하였고, 열전도 모델 또한 제시하였다. 3 장에는 유동 모델에 대한 수치 해법과 몇 가지 개선된 사항을 제시하였다. 계통 해석 코드 및 원자로 동특성 해석 코드와의 코드 연계는 4 장에서 다루었다. 마지막으로 코드의 확인 계산 및 검증 계산(Verification and Validation; V&V) 결과를 제시하였다.

2. 지배 방정식 및 물리 모델

CUPID 코드는 기본적으로 거대 척도 계산 코드이고 다공성 매질을 염두에 두고 물리 모델을 채택하였다. 한편으로는, 자유 매질 분석을 위해서 몇 가지 모델들을 선택적으로 내장

하고 있다. 여기서는 기본적인 지배 방정식과 자유 매질 분석을 위한 물리 모델들을 소개하였다.

2.1 지배 방정식

2상유동을 모사하기 위하여 과도 상태 2 유체 3 장(2 fluids 3 fields) 모델을 채택하였다. 여기서 3 장이란 연속 액상, 액적, 수증기들을 말한다[15, 17]. 2상유동의 3 장 형식은 2상유동의 국소 순간(instant) 방정식을 시간 평균한 2유체 단일 압력 모델의 직접적인 확장 형태이다[13]. 각 상에 대해서 질량, 에너지, 운동량 방정식을 각각 세운 뒤에 각 방정식들을 질량, 에너지, 운동량 전달 모델을 이용하여 연결하였다.

k-상에 대한 연속 방정식은 다음과 같다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} \Omega_g &= \Gamma_g, \\ \Omega_i &= -(1-\eta)\Gamma_g - S_E + S_{DE}, \\ \Omega_d &= -\eta\Gamma_g + S_E - S_{DE}, \\ \eta &= \alpha_d / (\alpha_l + \alpha_d) \end{aligned}$$

수증기에 포함된 비응축성 기체는 수증기와 열적, 기계적 평형을 유지한다고 가정하였다. 즉, 수증기와 비응축성 기체의 온도와 속도는 서로 같다. 따라서, 비응축성 기체에 대해서는 다음 연속방정식 1개만 추가된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g X_n) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g X_n \underline{u}_g) = 0 \tag{2}$$

여기서, 비응축성 기체의 건도(X_n)는 전체 기체에 대한 비응축성 기체의 질량의 비를 나타낸다. k-상에 대한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) &= -\alpha_k \nabla P \\ &+ \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_k^T)] + \alpha_k \rho_k g + \underline{F}_{ik} + \underline{F}_k^{ND} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 \underline{F}_{ik} 는 계면 견인력, 가상 질량력, 계면 질량 전달로 인한 계면 운동량 전달항을 나타낸다. \underline{F}_k^{ND} 는 비견인력(non-drag)으로 인한 운동량 전달항을 나타낸다. 난류 레이놀즈 응력(turbulent Reynolds stress)은 표준 k-ε 난류 모델이나 혼합 거리 모델을 이용하여 계산한다.

연속 액체와 액적은 서로 열적으로 평형인 것으로 가정하

였다. 즉, 액체와 액적의 온도는 서로 같다. 결과적으로 에너지 방정식은 수증기 에너지 방정식과 연속 액체와 액적의 합으로 된 통합 액체에 대한 에너지 방정식의 2 개로 된다

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \underline{u}_g) &= E_g^D \\ &- P \frac{\partial}{\partial t} \alpha_g - P \nabla \cdot (\alpha_g \underline{u}_g) + Q_{ig} - Q_{gl} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha_g) \rho_l e_l] + \nabla \cdot [(\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d) \rho_l e_l] &= E_l^D \\ &- P \frac{\partial}{\partial t} (1-\alpha_g) - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d) + Q_{il} + Q_{dl} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, E_k^D 는 k 상에서의 열전도, 난류 에너지(turbulent energy source), 점성 소산(viscous dissipation)를 나타낸다.

지배 방정식에서 정의하지 않은 항들과 계수들을 정립하면 지배 방정식의 해를 수학적으로 구할 수 있다. 이에 대해서는 2 장에서 정리하였다. 각 상들의 밀도와 온도를 구하기 위해서 상태 방정식 또한 필요하다. CUPID 코드에서 액체의 밀도와 온도는 압력과 내부에너지의 함수로 표시한다.

$$\rho_l = \rho_l(P, e_l) \tag{6}$$

$$T_l = T_l(P, e_l) \tag{7}$$

기체의 물성치는 수증기와 비응축성 기체의 수정된 깁스-돌턴(Gibbs-Dalton) 혼합체를 가정하여 다음과 같이 계산한다.

$$\rho_g = \rho_g(P, e_g, X_n) \tag{8}$$

$$T_g = T_g(P, e_g, X_n) \tag{9}$$

$$P_s = P_s(P, e_g, X_n) \tag{10}$$

포화 상태의 물성치는 압력의 함수로 계산한다.

$$T_{sat} = T_{sat}(P_s) \tag{11}$$

2.2 국소 2상유동 유동양식 및 계면 전달항

2상유동에서 계면 면적과 계면 전달량은 계면의 모양과 밀접한 관련이 있다. 그러나, 2 유체 지배 방정식을 평균화하면서 국소 계면 구조는 소실된다. 따라서 계통 척도 및 기기 척도 코드에서는 계면의 표면 위상(surface topology)를 정의하는 유동 양식 맵을 필요로 하게 된다.

2.2.1 국소 2상유동 유동양식

2상유동을 해석하기 위해서는 상간 계면 면적 정보가 필요

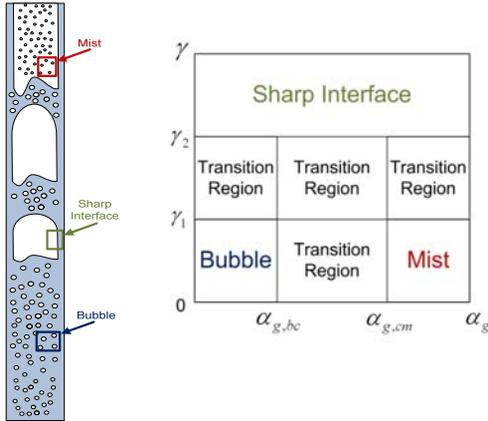


Fig. 1 Inter-phase surface topology concept [18]

한데, 계통 코드에서는 2상유동 유동 양식을 사용하였다. 계통 코드의 유동 양식 개념은 자유 매질 분석에는 적용할 수 없는데, 왜냐하면 계통 코드의 유동 양식 개념에서는 유동 인자들에 대한 단면 평균을 통하여 모든 격자들이 벽면 경계 조건을 포함하기 때문이다. 자유 매질 분석에서도 계면 면적을 정의하기 위하여 STAR-CD[19]를 기초로 개발한 CFD-BWR 코드[18]에서는 최근에 상간 계면 위상 맵(topology map)을 최근에 제안하였다. 또한, 이러한 위상 맵 개념을 일부 기포 유동뿐만 아니라 슬러그나 액적 유동에서 볼 수 있는 국소적으로 날카로운 계면을 갖는 유동에도 적용하였다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 3 가지의 주요 국소 상간 표면 위상 함수와 천이 영역의 위상 함수를 정의하였다. 먼저 3 가지의 주요 위상 함수를 버블 유동, 액적 유동, 슬러그 등 유동에 대해서 정의한다. 2 개나 혹은 3개의 주요 위상이 겹치는 부분에서는 천이 영역의 위상 함수를 사용한다. Tentner [20, 21], Ioilev[22], Ustinenko[23] 등이 이러한 접근 방법을 확인 및 검증하는데 기여를 하였다.

Tentner 등이 개발한 상간 위상 개념을 CUPID 코드에 적용하였다. 각 격자에서 계면의 표면 위상은 기포 분율(α)과 기포 분율 구배(γ)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\gamma = 0.5 \cdot \vec{\delta} \cdot \left[\left| \frac{\partial \alpha_g}{\partial x} \right| \hat{i} + \left| \frac{\partial \alpha_g}{\partial y} \right| \hat{j} + \left| \frac{\partial \alpha_g}{\partial z} \right| \hat{k} \right] \quad (12)$$

$$\vec{\delta} = \frac{V_i}{\sum_f |S_{f,x}|/N_f} \hat{i} + \frac{V_i}{\sum_f |S_{f,y}|/N_f} \hat{j} + \frac{V_i}{\sum_f |S_{f,z}|/N_f} \hat{k}$$

그림 1에 제시된 상간 계면의 표면 위상에 대한 기준 값은

다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_{g,bc} &= 0.3, \\ \alpha_{g,cm} &= 0.95, \\ \gamma_1 &= 0.2, \\ \gamma_2 &= 0.4. \end{aligned}$$

본 연구에서는 CFD-BWR에서 적용된 상간 계면 위상 맵 모델을 비정렬 격자에 맞게 수정하였다. 또한, 수치 불안정성을 해소하는 방향으로 수정하여 CUPID 코드에 적용하였다. CUPID 코드는 먼저 각 격자에서 계면의 표면 위상을 결정한 뒤에, 여기서 구한 계면의 표면 위상에 따라 계면 면적과 계면 전달량을 계산한다.

2.2.2 계면 면적 밀도

다음과 같은 계면 면적 밀도 모델을 CUPID 코드에 구현하였다.

기포 위상[24]:

$$\alpha_i = (\pi D_b^2) \left(\frac{6\alpha_g}{\pi D_b^3} \right) = \frac{6\alpha_g}{D_b} \quad (13)$$

$$D_b(P, \alpha_g) = 10.06 \left(\frac{10^5}{P} \right)^{0.098} \sqrt{\frac{\sigma}{9.8(\rho_l - \rho_g)}} \cdot [\min(\alpha_g, 0.118)]^{0.35} \quad (14)$$

액적 위상[25]:

$$\alpha_l = \frac{6(1 - \alpha_g)}{D_d} \quad (15)$$

$$D_d(P, \alpha_g) = 0.01 \frac{\sigma}{\rho_g d_g^2} Re_g^{2/3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{2/3} \quad (16)$$

날카로운 경계면(sharp interface) 위상[26]:

$$\alpha_i = |\nabla \alpha_g| \quad (17)$$

상기 계면의 표면 위상 모델을 정립함에 있어서 아직은 구 모양의 기포 계면과 액적 계면만을 상정하였다. 2상유동을 좀더 정확하게 모사하기 위해서는 찌그러진 구나 굴곡이 있는 계면을 모사할 수 있는 추가적인 모델이 필요하다. 또한, 천이 영역의 표면 위상에 대해서는 내삽보간법을 적용하고 있다.

2.2.3 계면 운동량 전달항

식 (3)의 계면 운동량 전달항(F_{ik})은 계면 견인력, 계면 질

량 전달로 인한 운동량 교환항, 가상 질량력 등을 포함하고 있다. 가상 질량력은 다음 절에 논의하기로 한다. 계면 운동량 전달항은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\underline{F}_{iq} = \underline{F}_{qt} + \underline{F}_{qd} + \Gamma_g \underline{u}_{qi} \quad (18)$$

$$\underline{F}_{ui} = \underline{F}_{qi} - (1-\eta)\Gamma_g \underline{u}_{qi} - S_E \underline{u}_i + S_{DE} \underline{u}_d \quad (19)$$

$$\underline{F}_{id} = \underline{F}_{qd} - \eta\Gamma_g \underline{u}_{qi} + S_E \underline{u}_i - S_{DE} \underline{u}_d \quad (20)$$

계면 질량 전달로 인한 계면 운동량 전달을 계산하기 위해서는 계면에서 각 상의 속도(\underline{u}_{ki})를 알아야 한다. 계면에서의 각 상의 속도는 상류 차분 도식 개념(donor formulation)을 사용하여 구한다[14]. CUPID 코드에서 구현된 계면 견인력항들을 표 1에 제시하였다. 수증기로서의 액적 포획량(S_D)과 수증기로부터의 액적 탈출량(S_{DE})을 1 차원적인 자료에 기반을 둔 전형적인 모델을 사용하여 구현하였고, 앞으로 이를 개선할 예정이다.

각 상들의 가속도 차이로 인한 계면 운동량 전달을 포괄하는 가상 질량력 모델로는 Drew 등[27]이 개발한 것을 사용하고 있다.

Table 1 The interfacial drag force models in the CUPID code

Local flow regime	Interfacial drag force
Bubble	$\underline{F}_{qd} = \frac{1}{8} a_i \rho_c C_D u_q - u_i (u_q - u_i)$ $C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_b} (1 + 0.15 Re_b^{0.687}) & \text{for } 0 < Re_b \leq 1000 \\ 0.44 & \text{for } Re_b > 1000 \end{cases}$
Mist	$\underline{F}_{qd} = \frac{1}{8} a_i \rho_c C_D u_q - u_d (u_q - u_d)$ <p>C_D is obtained for droplets</p>
Sharp interface	$\underline{F}_{qd} = \frac{1}{2} a_i \rho_g C_i(\phi) u_q - u_i (u_q - u_i)$ $C_i(\varphi) = C_{i,tan} + (C_{i,ort} - C_{i,tan}) \cos\varphi $ $C_{i,tan} = 0.005, C_{i,ort} = 1$ $\cos\varphi = \frac{(u_q - u_i) \cdot \nabla \alpha_g}{ (u_q - u_i) \nabla \alpha_g }$
Transition	$\underline{F}_{qd} = \chi_i (u_q - u_i)$ $(\chi_i)_{transition} = w \cdot (\chi_i)_1 + (1-w) \cdot (\chi_i)_2$ $w = \frac{\alpha_{g,cm} - \alpha_g}{\alpha_{g,cm} - \alpha_{g,bc}} \text{ or } w = \frac{\gamma_2 - \gamma}{\gamma_2 - \gamma_1}$

$$\underline{F}_{vm,q} = C_g^{vm} \alpha_g \alpha_l \rho_m \frac{\partial (u_l - u_g)}{\partial t} \quad (21)$$

여기서, $\rho_m = (\alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l)$

$$C_g^{vm} = \begin{cases} \frac{(1+2\alpha_g)}{2(1-\alpha_g)} & \text{for } \alpha_g < 0.5 \\ \frac{(3-2\alpha_g)}{2\alpha_g} & \text{for } 0.5 \leq \alpha_g < 1 \end{cases}$$

가상 질량력은 모든 표면 위상에 대해 적용하되 나머지 비견인력항은 기포 유동의 표면위상에 대해서만 정의한다.

식 (3)에서 비견인력항(\underline{F}_k^{ND})은 평균 유동 방향의 수직인 방향으로 작용하는 힘을 나타내는데, 2상양력(lift force), 벽윤활력(wall lubrication force), 난류 확산력(turbulence dispersion force) 등을 포함하고 있다[10].

$$\underline{F}_k^{ND} = \underline{F}_{lift,k} + \underline{F}_{wl,k} + \underline{F}_{td,k} \quad (22)$$

2상양력은 상간 속도차와 연속 액상의 속도 구배와의 curl 연산으로 표시한다.

$$\underline{F}_{lift,q} = -\alpha_g \rho_l C_L (u_q - u_l) \otimes (\nabla \otimes u_l) \quad (23)$$

Tomiyama [28]는 2상양력에 대한 계수에 대해 다음과 같은 모델을 제시하였다.

$$C_L = \begin{cases} \min [0.288 \tanh(0.121 Re_b), f(E_{o,H})], & \text{if } E_{o,H} < 4 \\ f(E_{o,H}), & \text{if } 4 \leq E_{o,H} < 10 \\ -0.27, & \text{if } 10 \leq E_{o,H} \end{cases} \quad (24)$$

여기서, $Re_b = \frac{\rho_l |u_q - u_l| D_b}{\mu_l}$

$$f = 0.00105 E_{o,H}^3 - 0.0159 E_{o,H}^2 - 0.0204 E_{o,H} + 0.474$$

$$E_{o,H} = \frac{g(\rho_l - \rho_g) d_H^2}{\sigma}$$

$$d_H = D_b (1 + 0.163 E_{o,H}^{0.757})^{1/3}$$

$$E_o = \frac{g(\rho_l - \rho_g) D_b^2}{\sigma}$$

Antal 등은 다음과 같은 벽윤활력 모델을 제시하였다[29]:

$$\underline{F}_{wl,q} = \frac{\alpha_g \rho_l C_{wl} |u_q - u_l|^2}{D_b} \max \left(0, C_1 + C_2 \frac{D_b}{y_w} \right) \underline{n}_w \quad (25)$$

여기서 C_1 과 C_2 는 각각 -0.01과 0.05이다. \vec{n}_w 는 벽면에 대해 수직 단위 벡터이다. 벽윤활력은 벽면으로부터 버블 직경의 5 배 이내의 거리에서만 정의한다($y_w < 5D_b$). 난류 확산력은 액상의 속도에 대한 난류 요동의 결과이다. Lahey 등[30]은 다음과 같은 난류 확산력 모델을 제시하였다.

$$F_{td,g} = C_{TD} \rho_i k_i \nabla \alpha_i \quad (26)$$

여기서, C_{TD} 는 상수값 0.1이다. De Bertodano [31]는 균질 난류를 상정하여 좀 더 일반적인 형태의 난류 확산력 계수를 다음과 같은 Stokes 수의 함수 형태로 표시하였다.

$$C_{TD} = C_\mu^{1/4} \frac{1}{S_t(1+S_t)}$$

액체에 미치는 비견인력은 기체에 미치는 비견인력과 크기는 같고 부호는 반대로 정의한다.

2.2.4 에너지 및 질량 전달

식 (4)와 (5)의 계면 에너지 전달항, Q_{ig} 과 Q_{il} 은 다음과 같이 모델링 한다.

$$Q_{ig} = \frac{P_s}{P} H_{ig} a_i [T_{sat}(P_s) - T_g] + \Gamma_g h_{gi} \quad (27)$$

$$Q_{il} = H_{il} a_i [T_{sat}(P_s) - T_l] + \Gamma_g h_{li} \quad (28)$$

여기서 식 (27)과 (28)의 우측 첫 번째 항은 벌크(bulk)에서 계면 열전달을 나타내고, 두 번째 항은 질량 전달로 인한 에너지 전달을 나타낸다. P_s 는 기체에서 수증기의 분압을 나타낸다. 계면 엔탈피, h_{gi} 과 h_{li} 는 액체와 수증기 계면에서 계면 에너지 도약 조건을 만족시키도록 정의한다[14]. 단위 부피당 수증기 생성량은 계면에서 상간 에너지 전달항의 합, Q_{ig} 와 Q_{il} 의 합이 영이 되도록 다음과 같이 정의한다.

$$\Gamma_g = - \frac{\frac{P_s}{P} H_{ig} a_i [T_{sat}(P_s) - T_g] + H_{il} a_i [T_{sat}(P_s) - T_l]}{h_{gi} - h_{li}} \quad (29)$$

식 (4)와 (5)에서 Q_{gl} 은 계면에서 비응축성 기체의 단위 부피 및 단위 시간당 잠열 전달을 나타낸다.

$$Q_{gl} = \frac{P - P_s}{P} H_{gl} a_i (T_g - T_l) = \frac{P_n}{P} H_{gl} a_i (T_g - T_l) \quad (30)$$

여기서, H_{gl} 과 P_n 은 각각 잠열 전달 계수와 비응축성 기체의 분압을 나타낸다. 이 식에서 압력으로 구성된 곱셈항은 비응축성 기체가 존재하지 않을 경우에 비응축성 기체의 잠열 전달항을 영으로 만드는데 사용되는 임의의(ad-hoc) 함수이다 [14].

표 2에 계면 열전달 계수를 각각의 표면 위상에 대해서 제시하였다. 액체 온도가 포화온도보다 높다면 액체에서 열전달은 다음과 같은 근사 모델을 사용하여 계산한다.

$$H_{ii} a_i = \max(10^6, H_{ii} a_i) \quad (31)$$

이 모델을 사용하면 액체의 온도를 포화 온도로 가능한 한 빨리 낮출 수 있다.

2.3 난류 모델

CUPID 코드에는 난류 전달 응력을 구하기 위해 산술 난류 모델과 k-ε 난류 모델을 적용하였다. 난류 구조에 대한 버블의 효과를 고려하기 위하여 Michiyochi와 Serizawa[32]와 Sato[33]가 각각 제안한 버블 유도 난류 선원항을 도입하였다.

단상 유동에 대해서는 일반적인 벽함수를 적용하였다. 그러나, 2상유동에서는 벽면 경계층에서 버블의 존재가 벽근처의 속도 분포에 큰 영향을 주는 것으로 알려져있다. 이에 Yun [34] 등이 제안한 2상 벽함수를 도입하였다.

2.4 열구조체와 벽면 열전달

원자력 발전소의 과도 상태 분석에서 유체와 열교환을 하

Table 2 The interfacial heat transfer models in the CUPID code

Local flow regime	Interfacial heat transfer coefficient
Bubble	$H_{ik} = \frac{k_k N u_b}{D_b}$ $N u_b = 2 + 0.6 Re_b^{0.5} Pr_l^{0.3}$
Mist	$H_{ik} = \frac{k_k N u_d}{D_d}$ $N u_d = 2 + 0.6 Re_d^{0.5} Pr_g^{0.3}$
Sharp interface	$H_{ik} = St \rho_k c_{p,k} \left \frac{u_{\tau,g} - u_{\tau,l}}{D} \right ^{1/3}$ $St = 0.0045 \left(\frac{\rho_g u_g \mu_l}{\rho_l u_l \mu_g} \right)^{1/3}$ $\frac{u_{\tau,g} - u_{\tau,l}}{D} = (u_g - u_l) - \left[(u_g - u_l) \cdot \frac{\nabla \alpha_g}{ \nabla \alpha_g } \right] \frac{\nabla \alpha_g}{ \nabla \alpha_g }$
Transition	$(H_{ik} a_i)_{transition} = w (H_{ik} a_i)_1 + (1-w) (H_{ik} a_i)_2$

는 구조물에 대한 열적 분석은 2상유동에 대한 분석만큼이나 중요하다. 그러므로 CUPID 코드에 유체와 열구조체에 대한 복합(conjugate) 열전달 분석 계산 능력을 구현하였다. 열구조체 열전달 해석을 위해 다음과 같은 3차원 열전도 방정식을 사용하고 있다.

$$\int \rho_{solid} C_{P,solid} \frac{\partial T_{solid}}{\partial t} dV = \int \nabla \cdot k_{solid} \nabla T_{solid} dV + \int q''_{solid} dV + \int q''_{fluid-solid} dA \quad (32)$$

열구조체와 유체사이의 열전달을 모사하기 위하여 식 (32)를 외재적인 방법으로 각 상의 유체 에너지 방정식과 연결하였다. 그리고 이 지배 방정식을 3차원 비정렬 격자에서 유한체적법을 사용하여 풀고 있다.

열구조체로부터 각 상으로의 열을 분배하기 위하여 열 분배 모델(heat partitioning model)을 사용한다.

$$q_{fluid-solid} = q''_{fluid-solid} A = q_{wt} + q_{wg} \quad (33)$$

벽근처 격자의 계면 위상이 기포 유동일 때 벽으로부터 2상유동으로의 열전달 구조는 표면 냉각(q_c), 기화 (q_e), 단상 대

Table 3 Closure relations for the wall heat transfer

Variables	Model	Ref.
Surface quenching	$q_c = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t_w} k_l \rho_l C_{pl} f \right) A_{2f} (T_w - T_l)$	[35]
Wall boiling	$q_e = N'' f \left(\frac{\pi}{6} D_{b,depart}^3 \right) \rho_g h_{fg}$	[35]
Single phase convection	$q_c = h_c A_c (T_w - T_c)$	[35]
Active nucleate site density	$N'' = [185 (T_w - T_{sat})]^{1.805}$	[35]
Bubble departure frequency	$f = \sqrt{\frac{4g(\rho_l - \rho_g)}{3D_{b,depart}\rho_l}}$	[35]
Bubble departure diameter	$D_{b,depart} = 1.5 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \left[\frac{\rho_l C_{pl} (T_{wall} - T_{sat})}{\rho_g h_{lg}} \right]^{5/4}$	[36]
Bubble waiting time	$t_w = 0.8/f$	[35]
Heat transfer coefficient	$h_c = St \cdot \rho_c \cdot c_{p,c} \cdot u_\tau$	-
Single phase heat transfer area	$A_{1f} = 1 - A_{2f}$	[35]
Two-phase heat transfer area	$A_{2f} = N'' \frac{\pi D_{b,depart}^2}{4} K$	[35]
Bubble influence factor	$K = 4$	[35]

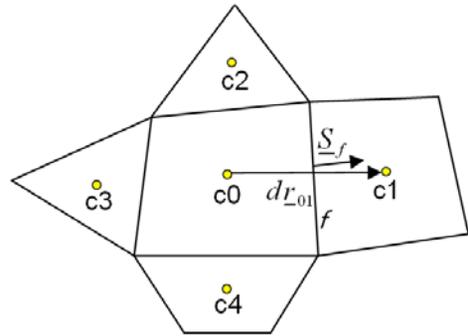


Fig. 2 Control volumes for the finite volume discretization

류 (q_{wlc} 와 q_{wg})로 가정한다. 식 (33)에서 벽면-액체 열전달양 (q_{wlc})은 표면 냉각량(q_c)과 단상 액체 대류량(q_{wlc})의 합이 된다.

만약 액적 유동 위상이라면 벽면으로부터 전달되는 모든 열은 기체 대류를 통하여 모두 기체로 간다고 가정한다. 즉, 벽면에서 액적으로서의 직접 접촉 열전달은 무시한다. 천이 유동 영역에서 벽면의 열은 기포 분열에 의하여 기포 유동과 액적유동을 선형 보간한 위상으로 전달된다고 가정한다. 그러므로, 천이 유동 영역의 벽면에서 열보존 방정식은 다음과 같다.

$$q_{fluid-solid} = \frac{\alpha_{g,cm} - \alpha_g}{\alpha_{g,cm} - \alpha_{g,bc}} (q_c + q_e + q_{wlc}) + \frac{\alpha_g - \alpha_{g,bc}}{\alpha_{g,cm} - \alpha_{g,bc}} q_{wg} \quad (34)$$

표 3에 식 (34)와 관련된 닫힘 관계식들을 제시하였다.

3. 수치 해법

CUPID 코드에서는 비정렬 및 비엇갈림 격자와 유한 체적법을 적용하여 2 유체 지배 방정식을 이산화하였다. 비엇갈림 격자 방법을 사용하기 때문에 압력, 속도, 부피 분율, 에너지 등의 모든 변수들을 격자의 중앙에서 정의하였다. 대류항을 계산할 때는 격자 중앙값을 내삽하여 격자면에서의 값들을 구하였다. 그림 2에는 CUPID 코드에서 적용하고 있는 2차원 비정렬 격자의 예를 제시하였다. 이 그림에서 f 는 격자 $c0$ 와 격자 $c1$ 의 사이에 있는 격자면의 번호를 나타내고, S_f 는 격자면 f 의 면벡터를 나타낸다.

3.1 Semi-Implicit 2 단계 수치 해법

CUPID 코드는 2상유동을 해석함에 있어서 강건성이 뛰어난 semi-implicit 수치 해법[14, 37]을 비경렬 및 비엇갈림 격자에 맞게 수정하여 사용하고 있다. 이 수치 해법을 semi-implicit 2 단계 수치 해법이라고 명명하였다.

Semi-implicit 수치 해법에서는 식 (3)의 보존형(conservative form) 방정식을 변형하여 비보존형(non-conservative form) 운동량 방정식을 사용한다. CUPID 코드는 공간에서 보존성을 높이기 위해 비보존형 대신에 반보존형(semi-conservative form)의 운동량 방정식을 사용한다. 반보존형 운동량 방정식은 시간에 대해서는 비보존형(non-conservative form) 운동량 방정식이 가지고 있는 수치적 편의성을 지니고 있으면서 공간에 대해서는 보존형 방정식에 가까운 장점을 가진다. (3.2.1절 참조):

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial u_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) - u_k \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) + u_k \Omega_k = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau^k + \tau_k^T)] + \alpha_k \rho_k g + \frac{F_{ik}}{\Delta t} + \frac{F_k^{ND}}{\Delta t} \quad (35)$$

3.1.1 외재적 운동량 대류항

Semi-implicit 2단계 수치해법을 사용하여 해를 구하기 위해서 우선 식 (35)의 운동량 방정식을 비경렬 형태의 격자 i 에 대해서 적분을 수행한다. 이때 우변의 계면 운동량 전달항은 내재적으로 처리하였다. 대류항은 외재적으로 처리하여 속도가 공간적으로 연관되지 않게 하였다. 그러면 운동량 방정식은 3개의 미지 변수인 각 상의 속도($u_{k,i}^*$)로 이루어진 3개의 선형 방정식으로 된다. 여기서 위첨자 *는 중간 단계의 변수임을 의미한다. 여기서 선형화된 운동량 방정식을 풀면 다음과 같은 중간 단계의 속도를 구할 수 있다:

$$u_{k,i}^* = \gamma_{k,i}^n + \beta_{k,i} \nabla P_i^n \quad (36)$$

여기서 $\gamma_{k,i}^n$ 는 외재적으로 처리한 대류항, 확산항, 체력(body force)를 포함하고 있고, $\beta_{k,i}$ 는 압력 구배의 계수이다. 새로운 시간 단계의 속도는 식 (36)에서 사용하는 이전 시간 단계의 압력 대신에 새로운 시간 단계의 압력을 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_{k,i}^{n+1} = \gamma_{k,i}^n + \beta_{k,i} \nabla P_i^{n+1} \quad (37)$$

식 (37)에서 식 (36)을 빼면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u_{k,i}^{n+1} = u_{k,i}^* + \beta_{k,i} \nabla P_i' \quad (38)$$

여기서, $P_i' (= P_i^{n+1} - P_i^n)$ 는 압력 수정항을 나타낸다. 이 압력 수정항은 추후에 질량 및 에너지 보존 방정식을 통하여 구하게 된다. 격자면에서 체적 유량($\Psi_{k,f}^{n+1} = u_{k,f}^{n+1} \cdot S_f$)을 얻기 위하여 식 (38)에 발산 연산($\nabla \cdot$)을 취하고 그 식을 격자 i 에 대해 적분한다. 그 다음에 격자면 f 에서 체적 유량은 다음과 같이 압력 수정항으로 표시할 수 있다.

$$\sum_f \Psi_{k,f}^{n+1} = \sum_f \left[\Psi_{k,f}^* + \beta_{k,f} \frac{A_f}{|dr_f|} (P_j' - P_i') \right] \quad (39)$$

3.1.2 예측 단계(Predictor Step)

모든 상에 대한 질량 보존 방정식을 더하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{V_i} \sum_f \frac{1}{\rho_k} \sum_k (\alpha \rho)_{k,f} \Psi_{k,f}^{n+1} = I_g^{n+1} \left(\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_l} \right) - \frac{\alpha_g}{\rho_g} \frac{\rho_g'}{\Delta t} - \frac{(1-\alpha_g)}{\rho_l} \frac{\rho_l'}{\Delta t} \quad (40)$$

여기서 위첨자를 갖지 않는 모든 변수들은 이전 시간 단계 값들이다. 상기 식을 풀기 위해 에너지, 비응축성 기체 질량비, 압력 수정 등의 변수를 사용하여 상변화율(I_g^{n+1})을 선형화하였다. 식 (39)를 식 (40)에 대입하면 체적 유량($\Psi_{k,f}^{n+1}$)을 제거하여 압력 수정 방정식을 구할 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 얻은 압력 수정 방정식은 다음과 같다.

$$D_i P_i' + \sum_f D_f P_j' = D_i^S \quad (41)$$

여기서, D_i , D_f , D_i^S 는 압력 행렬의 계수이다 [38]. 각 상의 이웃하는 격자 사이 상의 밀도차는 매우 작기 때문에 식 (41)의 계수 행렬은 대칭 행렬로 볼 수 있다.

3.1.3 계면 열전달 계수의 갱신

각 상의 부피 분율은 각 상의 연속 방정식을 모두 더한 방정식과 식 (39)와 식 (41)에서 구한 새로운 시간 단계의 각 상의 체적 유량 및 압력을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sum_{k=g,l,d} \left[\frac{V_i}{\Delta t} (\alpha_k^m \rho_k^m - \alpha_k^n \rho_k^n) + \sum_f (\alpha_k^n \rho_k^n \Psi_k^m)_f \right] = 0 \quad (42)$$

여기서 $\rho_k^m \approx \rho_k^n + \frac{\partial \rho_k}{\partial P} \delta P + \frac{\partial \rho_k}{\partial e_k} \delta e_k$ 이다. 이 단계에서는 아직 에너지 방정식을 풀지 않았기 때문에 δe_k 는 이전 시간 단계 값이다. 이렇게 각 상의 부피 분율을 구하고 이것을 기반으로 새로운 단계의 변수를 최종 결정하기 때문에, 여기서의 각 상의 부피 분율이 새로운 시간 단계의 값을 위한 예측자(predictor)가 된다. 위첨자 m 은 예측 단계(predictor step)를 나타낸다. 계면 열전달 계수는 이 예측 단계에서 계산된 각 상의 부피 분율을 사용하여 다음과 같이 갱신한다.

$$H_{ik} = H_{ik}(\alpha_k^m) \tag{43}$$

3.1.4 보정 단계(Corrector Step)

6 개의 질량과 에너지 보존 방정식을 계산 격자에 대해서 적분한다. 이 단계에서는 대류항에 대해서 내재적인 방법을 사용하지만, 밀도와 부피 분율과 같이 대류에 의해 전달되는 대류항에 대해서는 외재적인 방법을 사용한다. 비선형항은 새로운 시간 단계의 값을 얻기 위하여 이전 시간 단계 값을 사용하는 1 차 테일러 전개를 적용하여 선형화하였다. 이렇게 선형화한 방정식을 6 개의 스칼라 독립 변수들에 ($e'_g, e'_l, \alpha'_g, \alpha'_l, X'_n, P$) 대해서 재정렬하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\underline{A}_i x_i = \underline{s}_i + \sum_f \sum_k c_{k,f} \Psi_{k,f}^{n+1} \tag{44}$$

여기서 \underline{A}_i 는 위에서 언급된 6 개의 스칼라 방정식으로부터 획득한 계수 행렬이고, x_i 는 구하고자 하는 6 개의 독립 변수 벡터, \underline{s}_i 는 선원항을 나타내는 벡터, $c_{k,f}$ 는 스칼라 방정식의 대류항에 곱해지는 계수 벡터이다. 해집합은(solution vector) 식 (44)에 \underline{A}_i^{-1} 를 곱하여 얻을 수 있다.

$$x_i = \underline{A}_i^{-1} \underline{s}_i + \sum_f \underline{A}_i^{-1} \sum_k c_{k,f} \Psi_{k,f}^{n+1} \tag{45}$$

압력 수정 방정식을 얻기 위하여 상기에서 언급한 6 개의 스칼라 방정식을 사용한다. 식 (39)를 식(45)의 6 번째 열에 넣고 이 열을 모든 셀에 대해서 모으면 새로운 시간 단계의 체적 유량($\Psi_{k,f}^{n+1}$)을 제거하여 압력 수정 방정식을 얻을 수 있다. 이 압력 수정 방정식은 선형 방정식의 형태가 되고, 복합 구배 방법(conjugate gradient method) 같은 반복적인 방법을 사용하여 이 선형 방정식으로부터 해를 얻을 수 있다. 압력 수정 방정식을 풀 뒤에는 새로운 시간 단계의 속도($u_{k,i}^{n+1}$) 및

체적유량($\Psi_{k,f}^{n+1}$)을 식 (37)과 식 (39)를 통해서 구할 수 있다. 마지막으로 6 개의 스칼라 변수들을 식 (45)를 사용하여 갱신하고 밀도, 온도와 같이 남아 있는 상태 변수들을 증기표 함수를 사용하여 구한다.

열적 비평형인 2상유동의 과도 상태 계산에서 수렴된 해를 얻기 위해서는 계면 열전달 계수를 매우 조심스럽게 다루어야 한다. 현재의 Semi-implicit 2 단계 방법에서는 계면 열전달 계수를 거의 내재적으로 다루고 있기 때문에 계면 열전달 계수를 외재적으로 다루는 1 단계 방법에 비해 수치적 안정성이 매우 높다. 특히, 열적으로 비평형 상태에 있는 2상유동 해석에서는 더욱 뛰어나다. 정상 상태나 열적 평형 조건이 이루어지는 문제에서 압력을 계산할 때 보정의 2 번째 단계는 필요하지 않다.

3.2 CUPID 수치 해법 개선

CUPID 코드의 수치 해법의 정확도와 강건성을 증진시키기 위하여, 몇 가지 수치 기법을 개선하였다[39,40,41].

3.2.1 반보존형 운동량 방정식

초기 CUPID 코드는 2상 운동량 방정식을 다음과 같이 비보존형 형태로 변형하여 사용하였다.

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial u_k}{\partial t} + \alpha_k \rho_k u_k \cdot \nabla u_k + u_k \Omega_k = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_k^T)] + \alpha_k \rho_k g + \underline{F}_{ik} + \underline{F}_k^{ND} \tag{46}$$

상기 비보존형 운동량 방정식은 각 상의 속도만을 시간 전진시키기 때문에 수치적으로 편리하다. 그러나, 이것은 반대로 상변화가 급격히 발생하는 다차원적인 유동 모사에 있어서는 보존형에 비해 수치적 오차가 커질 수가 있다. 식 (35)와 같은 반보존형 운동량 방정식을 채택하면 이러한 상변화가 있는 다차원적 유동에서 수치적 오차를 근본적으로 줄일 수 있다. 식 (35)의 반보존형 운동량 방정식은 시간에 대해서는 여전히 비보존형이지만, 공간에 대해서는 보존형을 유지하고 있다. 정상 상태에서는 식 (35)는 식 (3)으로 되는데, 반보존형 방정식은 정상 상태의 경우에 보존형 방정식과 같은 형태가 된다는 뜻이다. 이러한 수치적 이점은 Park 등[39]이 논의한 바 있다.

3.2.2 2차 상류 도식으로 대류와 확산 계산

이전 버전의 CUPID에서는 1 차 정확도 상류 도식을 이용하여 대류항을 계산하였다. 1 차 정확도 기법은 단조성(monotonicity)를 만족함으로써 높은 안정성을 가지는 반면 수

치점성으로 인해 해의 정확도가 저해되는 단점을 가진다. 대류항의 공간 정확도를 높임으로써 해의 정확도를 증진시키기 위해 2 차 정확도의 상류 도식을 CUPID에 적용하였다[40].

각 지배 방정식에 포함된 대류항의 차분형태를 일반화하여 나타내면 다음과 같다.

$$\int \nabla \cdot (\theta \underline{u}_k) dV \approx \sum_f (\theta)_f (\Psi)_f \quad (47)$$

여기서 $(\theta)_f$ 는 대류량을 의미하며, 질량, 운동량, 에너지 방정식의 대류량은 각각 $(\alpha_k \rho_k)_f$, $(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k)_f$, $(\alpha_k \rho_k e_k)_f$ 이다.

상류 도식을 사용하는 대류항 차분에서는 대류량의 분포가 격자셀에 국한되어 분포한다고 가정한다. 그러므로 격자면에서의 대류량은 인접하는 두 격자셀로부터 계산된 대류량이 존재하므로 불연속적이다. 격자면에서의 대류량은 상류 도식에 따라 두 대류량 중 하나로 결정된다.

1차 정확도 기법에서는 대류량이 격자셀 내부에서 균일하게 분포한다고 가정한다. 그러므로 격자면에서의 두 대류량 값은 인접하는 두 격자셀 값과 동일하다. 반면, 2차 정확도 기법에서는 대류량이 선형적으로 분포한다고 가정한다. 그러므로 격자면에서의 대류량은 인접하는 두 격자셀에서의 선형 분포를 고려하여 다음과 같이 결정된다.

$$(\theta)_f = \begin{cases} \theta^- = \theta_i + (\nabla \theta)_i \cdot \underline{dx}_{fi} & \text{if } (\Psi)_f \geq 0 \\ \theta^+ = \theta_j + (\nabla \theta)_j \cdot \underline{dx}_{fj} & \text{if } (\Psi)_f < 0 \end{cases} \quad (48)$$

여기서 f 는 주어진 격자면을 나타내고, i, j 는 격자면에 인접한 두 격자셀을 의미한다. 그리고 \underline{dx}_{fk} 는 격자셀 중심에서 격자면의 중심까지의 벡터를 의미한다. 식 (48)을 계산하기 위해서는 격자셀 중심에서의 대류량 기울기가 필요하다.

격자셀 중심에서의 대류량 기울기는 이웃하는 격자들의 대류량을 이용하여 계산할 수 있으며, 비정렬 격자계에서는 최소 자승법 또는 Green-Gauss 정리를 이용하는 방법이 널리 사용된다. 본 연구에서는 다양한 기울기 계산 방법 중 Frink[42] 방법을 사용하였다. Frink는 사면체 격자에서의 기울기 계산 방법을 개발하였으며, 이를 임의의 다면체(polyhedral) 격자에 적용할 수 있도록 수정하여 적용하였다. 격자셀 중심에서의 기울기 계산을 위한 Frink 방법은 두 가지 내삽 과정으로 구성된다. 먼저 격자셀 중심값을 이용하여 격자점 값을 내삽(interpolation)하고, 내삽된 격자점 값을 이용하여 격자면 중심에서의 값을 계산한다. 그리고, Green-Gauss 적분 정리에 따라 계산된 격자면의 값으로부터 격자셀 중심의 대류량 기울기를 계산한다. Frink 방법은 격자셀 중심값을 격자점으로 내삽하

는 과정이 포함되므로, 인접하는 격자셀 뿐만 아니라 격자점을 공유하는 모든 격자셀이 대류량 기울기 계산을 위한 격자 집합(stencil)에 포함된다. 즉 Frink 방법은 기존의 Green-Gauss 기법에 기반한 기울기 재구성 기법에 비해 넓은 스텐실을 사용한다. 그러므로 Frink 방법은 비등방성의 비정렬 격자계에 대해서도 수치적 불안정성 없이 정확한 기울기를 계산할 수 있는 장점을 가진다.

1 차 정확도 상류 도식은 단조성(monotonicity)을 만족함으로써 비물리적인 진동 없이 불연속면 포착이 가능하나, 고차 정확도 상류 도식에서는 불연속면에서 비물리적인 진동이 발생하게 되어 수치적 불안정성이 유발될 수 있다[43]. 압축성 유동에서는 충격파와 같은 불연속면이 존재하며, 2상유동에서도 과도한 기포율의 변화에 따른 불연속면이 나타날 수 있다. 이러한 불연속면의 안정적 포착을 위해서는 재구성된 유동변수의 단조성 확보가 필수적이다. 유동 변수의 단조성 확보를 위해 본 연구에서는 기울기 제한자(slope limiter)를 도입하였으며, 비정렬 격자계에서 널리 사용되는 기울기 제한자인 Barth and Jespersen[43], Venkatakrishnan[44] 기울기 제한자를 적용하여 선택적으로 사용할 수 있는 다양성을 확보하였다.

CUPID에서 확산항은 다음과 같은 형태로 차분화한다.

$$\int \nabla \cdot (\theta \nabla \phi) dV = \sum_f \theta_f (\nabla \phi \cdot \underline{n})_f S_f \quad (49)$$

여기서 θ_f 는 운동량과 에너지 방정식의 $(\alpha_k \mu_k)$ 과 같은 격자면에서의 확산량을 의미한다. $(\nabla \phi \cdot \underline{n})_f$ 는 격자면 수직 기울기로, 다양한 형태의 차분이 가능하다. 현재 버전의 CUPID에서는 다음과 같은 차분법을 적용하고 있다.

$$(\nabla \phi \cdot \underline{n})_f = \frac{\Delta \phi_{i,j}}{|\underline{r}_{i,j}| \cdot \underline{n}} \quad (50)$$

확산항 차분법에 대한 코드의 다양성을 높이기 위해, 식 (50)의 확산항 차분법뿐만 아니라 Weiss[45]과 Mathur and Murthy[46]의 차분법을 적용하였다. Weiss는 다음과 같이 격자면 수직 기울기를 계산하였다.

$$(\nabla \phi \cdot \underline{n})_f = \overline{\nabla \phi} \cdot \underline{n} - \left[\overline{\nabla \phi} \cdot \underline{r}_{i,j} - \frac{\Delta \phi_{i,j}}{|\underline{r}_{i,j}|} \right] \frac{\underline{r}_{i,j} \cdot \underline{n}}{|\underline{r}_{i,j}|} \quad (51)$$

Mathur 와 Murthy 방법에서의 격자면 수직 기울기는 다음과 같다.

$$(\nabla \phi \cdot \underline{n})_f = \overline{\nabla \phi} \cdot \underline{n} - \left[\overline{\nabla \phi} \cdot \underline{r}_{i,j} - \frac{\Delta \phi_{i,j}}{|\underline{r}_{i,j}|} \right] \frac{1}{\underline{r}_{i,j} \cdot \underline{n}} \quad (52)$$

여기서, $r_{i,j}$ 는 격자셀 i 에서 격자셀 j 로의 방향 벡터를 나타내고, $\overline{\nabla\phi}$ 는 격자면에 인접한 격자셀 i 와 격자셀 j 각각의 중심에서의 기울기값의 평균을 의미한다. 격자셀 중심에서의 기울기는 Frink 기법을 이용하여 계산하였다.

3.2.3 압력 구배 계산 기법 개선

CUPID 코드[10]에서 격자셀 중심 압력 기울기 다음과 같이 Green-Gauss 적분 정리를 이용하여 계산하고 있다.

$$\nabla P_0 = \frac{1}{V_0} \sum_f P_f n_f S_f \quad (53)$$

여기서 아래첨자 f 는 격자셀을 구성하는 격자면을 나타낸다. 현재 CUPID에서는 격자면에서의 압력 P_f 을 인접한 두 격자셀값을 거리의 역가중치를 이용하여 내삽한다.

이와 같이 거리의 역가중치에 기반한 내삽 기법은 직교성이 보장된 정렬 격자에 대해서는 2차의 정확도를 가지나, 비정렬 격자와 같이 직교성이 보장되지 않는 격자계에서는 정확도가 저하될 수 있다. 그러므로, Frink 기법과 같이 비정렬 격자계에서도 2차의 정확도를 확보할 수 있는 기울기 재구성 기법이 요구된다.

경계면과 인접한 격자셀에서의 압력 기울기 재구성 과정은 경계면에서의 압력을 어떻게 결정하느냐에 따라 정확도의 차이가 발생할 수 있다. 예를 들면, 경계면에서의 압력을 격자셀 중심에서의 압력과 동일하다고 근사하면, 실제보다 낮은 압력 기울기로 계산된다. 이러한 문제점을 방지하기 위해 이전 버전의 CUPID는 경계셀에 대해 Green-Gauss 정리를 사용하지 않고, 최소자승법을 이용하여 계산하는 방법을 적용하였다. 최소자승법은 경계셀 압력 기울기의 정확도 저하를 막는 방편으로 사용될 수 있으나, 주위 인접 격자셀의 배치 및 개수에 따라 높은 오차가 발생하는 경우가 존재한다.

본 연구에서는 압력 기울기의 정확도를 증진시키기 위해 새로운 압력 재구성 기법을 개발하였다[41]. 이는 비정렬 격자계에서도 2차의 정확도를 확보할 수 있도록 Frink 방법을 기반으로 개발되었으며, 경계면의 압력값을 부정확하게 내삽함으로써 발생하는 오차를 제거하기 위해 경계셀에서는 반복적으로 기울기를 계산한다. Frink 방법은 내삽된 격자점의 값을 이용하여 격자면의 값을 계산하므로, 경계면에서의 압력을 정확하게 계산하기 위해서는 경계점 압력의 정확한 내삽이 필요하다. 반면, 경계점 값은 주위 격자셀 정보의 한계로 인해 일반적으로 부정확한 값이 내삽된다. 이를 극복하기 위해 경계점 압력값은 경계셀에서 계산된 압력기울기를 이용하여 반복적으로 계산한다. 이때 내부 격자점의 값은 기존 Frink 방법에서 사용하는 pseudo-Laplacian 방법을 적용한다. 수립된 경

계 격자점과 내부 격자점 값을 이용하여 각 격자면 압력값을 계산하고, Green-Gauss 적분정리로부터 모든 격자셀에 대한 압력 기울기를 재구성한다.

개발된 압력기울기 재구성 방법을 간단한 해석 함수, 중력이 있는 공동, 벽비등 2상유동 문제 등을 적용하여 기존 CUPID에 적용된 기울기 계산을 포함하여 다양한 기울기 계산법과 비교하였다[41]. 개발된 압력 기울기 재구성 방법은 정렬격자뿐만 아니라 비정렬 격자에서도 가장 높은 정확도를 보였으며, 단상유동 및 2상유동에서도 가장 정확한 결과를 제시하였다.

4. 코드 연계

CUPID 코드는 원래 독자 코드로 설계하였다. 독자 코드가 개발이 어느 정도 완료된 뒤에 CUPID 코드를 계통 분석 코드와 3차원 원자로 동특성 코드와 연계하였다. 이러한 연계를 통하여 진일보한 원자로 열수력 분석을 수행할 수 있으며, CUPID 코드의 적용성을 넓힐 수 있다.

4.1 계통 열수력 코드, MARS와의 연계

CUPID 코드는 기기 척도 코드가기 때문에 계통 코드와의 연계는 경계 조건만의 연계로 완성할 수 있다. 연계된 코드를 사용하면 계통 코드로는 전반적인 시스템을 분석하고 CUPID 코드로는 열수력 계통의 특정 부분을 모사할 수 있다. MARS [15] 계통 해석 코드를 연계 대상 코드로 선정하였는데 그것은 MARS가 2유체 모델(2 fluid model)을 채택하고 있고, 수치 기법이 CUPID의 교정 단계(corrector)와 유사하기 때문이다. 계통 해석 코드와 기기 해석 코드의 연계 경험[15, 47]을 MARS-CUPID 코드 연계에 활용하였다.

MARS-CUPID 연계에서 3차원 영역과 1차원 영역을 NC라고 명명한 계면 연결부(interface junction)로 통해 연결하였고, 연결된 3차원 영역과 1차원 영역을 CUPID와 MARS가 각각 모사하고 있다. 편의상 C_i 와 M_i 를 각각 CUPID와 MARS 코드에서 i 번째 연결 격자셀을 나타내는 번호라고 하면, 코드 연계의 개념과 가정은 다음과 같다.

(a) 연결부의 운동량 방정식은 MARS 코드로 푼다.

(b) 연결부에서 액체와 액적은 동역학적으로 평형 상태이므로 각각 속도가 같다., *i.e.*, $V_d = V_l$.

(c) MARS 코드에서 볼 때 CUPID의 격자셀 C_i 는 “CUPID의 경계 체적(cupvol)”을 나타내는데, 이 경계 격자셀에서 스칼라 변수들은 매 계산 때마다 CUPID에 의해 값이 갱신된다. 유동이 CUPID의 격자셀 C_i 에서 MARS의 격자셀 M_i 로 흐를 때, 연속 액체와 액적은 연결부에서 연속 액체로 합산 처리한다.

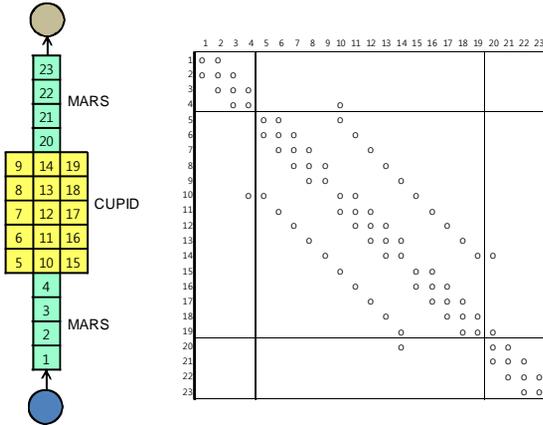


Fig. 3 An example of MARS-CUPID coupling and the coupled pressure correction matrix

(d) CUPID 코드에서 볼 때 MARS의 격자셀 M_i 는 내재적으로 연계하는 선원항(sink)으로 처리한다. 액체가 MARS의 격자셀 M_i 에서 CUPID의 격자셀 C_i 로 들어올 때, 액상은 배분 법칙(partition rule)에 따라서 계면에서 연속 액상과 액적으로 나뉜다[15]. 배분 비율은 환상 액적 혼합 유동에서 액적 생성 비율을 계산하는 상관식에 배분 법칙을 직접 적용하여 계산한다.

(e) 각 코드에서 만들어진 압력 수정 행렬은 연결부에서 운동량 모델링을 통하여 연계하여 동시에 푼다.

CUPID의 격자셀 C_i 로부터 MARS의 격자셀 M_i 로 유동이 생기는 연결부에서 운동량 보존은 MARS 코드에서 푼다. 여기서, 격자셀 C_i 의 기존 값들이 CUPID로 전달된다. 그 다음에, 연결부 i 번째 격자셀에서 각상의 새로운 시간 단계의 속도($V_{k,i}^{n+1}$)는 다음과 같다.

$$V_{k,i}^{n+1} = \alpha_{k,i} + \beta_{k,i} (\delta P_{C_i} - \delta P_{M_i}) \quad (54)$$

이렇게 MARS 코드에서 운동량을 계산하고 CUPID는 받아들이는 운동량의 연결 방식은 CUPID 코드에서 운동량 보존이 되는지가 문제가 된다. MARS-CUPID 연계에서, MARS의 압력 수정 방정식은 연결부에서 미지 속도를 포함하는 추가적인 미지항을 포함한다.

$$\underline{A}_M \delta P_M = b_M + \sum_{i=1}^{NC} (\gamma_{f,i} V_{f,i}^{n+1} + \gamma_{g,i} V_{g,i}^{n+1}) \quad (55)$$

여기서 γ_f 와 γ_g 는 각각 계수 벡터이다. 같은 방식으로 CUPID에서 압력 수정 방정식도 연결부에서 수정하여야 한다.

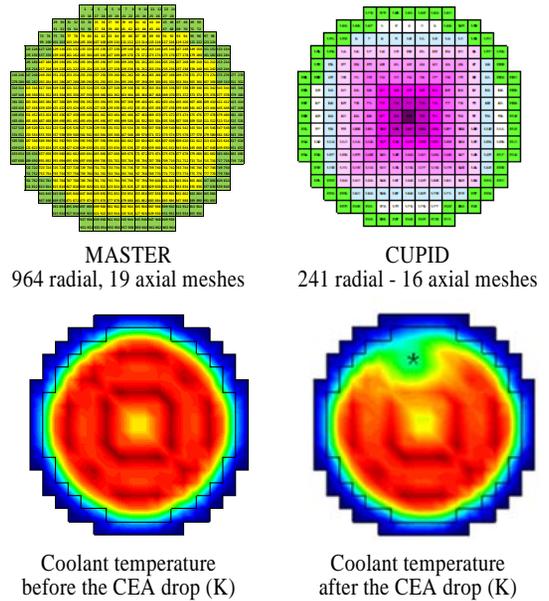


Fig. 4 An example of the CUPID-MASTER coupled calculation: The computational meshes and coolant temperature at the core exit (*The location of the dropped CEA)

$$\underline{A}_C \delta P_C = b_C + \sum_{i=1}^{NC} (\kappa_{f,i} V_{f,i}^{n+1} + \kappa_{g,i} V_{g,i}^{n+1}) \quad (56)$$

여기서 κ_f 와 κ_g 는 각각 계수 벡터이다.

식 (54)를 식 (55)와 식 (56)에 넣으면, CUPID와 MARS의 전체 영역에서 연계된 압력 수정 방정식을 세울 수 있다. 연계된 압력 수정 방정식은 행렬 재배치(domain decomposition) 방법을 통하여 행렬의 크기를 줄인 다음 푼다. 압력 수정 방정식을 푼 뒤에는 CUPID와 MARS 코드 별로 각각 수치 과정을 진행하여 해를 구하게 된다. 그림 3에는 MARS-CUPID의 연계 개념 및 연계 압력 수정 행렬을 제시하였다.

4.2 3차원 노심 동특성 코드, MASTER와 연계

열수력 코드와 노심 동특성 코드의 연계는 증성자 거동과 열수력 현상 사이에 강한 상관관계가 있는 과도 상태 계통을 분석하는데 있어서 정확한 예측 능력을 제공하기 위해서 수행된다[48, 49]. 이러한 열수력 코드와 노심 동특성 코드의 연계 해석은 원자로 노심에서 비대칭적인 거동이 발생할 때 특히 중요하다. 원자로 노심의 비대칭 거동을 해석할 목적으로 CUPID 코드를 3차원 원자로 동력학 코드인 MASTER코드와 연계하였다 [49].

CUPID코드와 MASTER코드의 연계는 윈도우즈 환경에서

수행하였다. 윈도우 환경에서는 동적 연결 라이브러리 (Dynamic Link Library; DLL)를 사용할 수 있고 개인용 컴퓨터에서 실행할 수 있다는 장점이 있다. DLL을 사용하면 각 코드의 무결성(integrity)을 독립적으로 유지할 수 있고, 연계 구조를 더 간단하게 할 수 있다. 약간의 수정만으로 자료를 상호 전달할 수 있고 피드백된 자료를 통합할 수 있다. 연계 코드에서는 CUPID로 계산한 냉각수 압력, 핵연료 온도 등의 과도 상태 노심 열수력 조건을 매 계산 시간마다 MASTER로 전달한다. 그 다음에 CUPID에서 주어진 노심 열수력 조건을 토대로 MASTER에서 새로 계산된 출력 분포가 CUPID로 다시 전달된다.

연계 코드의 성능을 검토하기 위하여 2815 MWt의 출력을 내는 가압경수로의 원자로 노심을 연계 코드로 모사하였다. 먼저 정상 상태를 모의한 다음, 하나의 제어봉 다발 (Control Element Assembly; CEA)이 돌발 낙하되었을 때를 계산하였다 [50, 51]. 이러한 과도 상태는 비대칭 노심 거동으로 귀결되기 때문에 열수력 코드와 노심 동특성 코드의 연계 3차원 계산의 역할이 매우 중요하다. 그림 4는 계산 격자들과 한 개의 CEA가 돌발 낙하되기 전후에 노심 출구에서 연계 코드로 계산한 냉각수의 온도를 제시하였다. 연계 코드가 정상적으로는 냉각수의 온도를 잘 예측하는 것으로 판단된다. 정량적인 검토는 추후 수행할 예정이다.

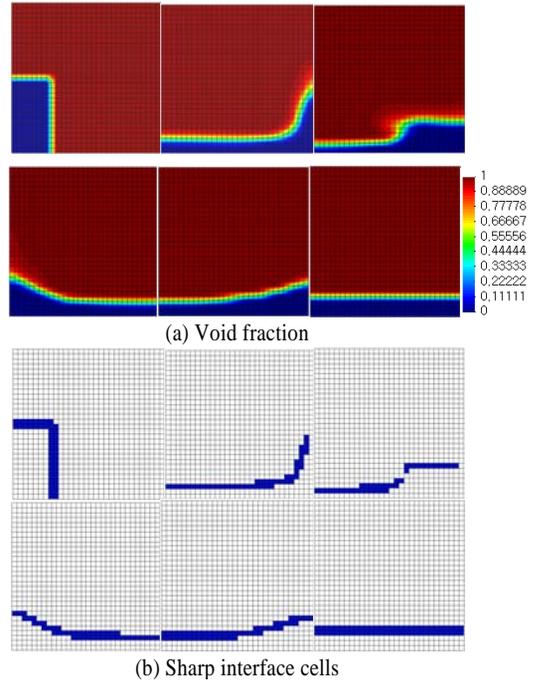


Fig. 5 The results of the dam break calculation: void fraction and sharp interface cells (t=0.0s,0.3s,0.45s,0.75s,1.9s,5.5s)

Table 4. The conceptual problems for the verification of the CUPID code

Problems ^a	Objectives
One-dimensional, steady-state liquid flow with a heat source One-dimensional, steady-state steam flow One-dimensional, steady-state two-phase flow Two-dimensional, steady-state liquid flow	Mass and energy conservation
One-dimensional, boiling flow Two-dimensional, flashing flow Three-dimensional, boiling flow Cavitations with a sudden contraction and a condensation	Phase change (Flow transitions)
One-dimensional, air-water phase separation by gravity Two-dimensional, air-water phase separation by gravity Two-dimensional, air-water manometric flow oscillations Two-dimensional, dam break ^b	Phase separation Mass conservation
Three-dimensional, steady-state air-water two-phase flow	Treatment of noncondensable gases
^a Both structured and unstructured grids were used ^b The inter-phase surface topology concept was examined	

5. CUPID 코드의 검증 계산의 현황 및 전략

코드 개발의 중요한 단계 중의 하나는 확인 계산 및 검증 계산이다. 확인 계산은 전산 코드가 차분 방정식을 정확하게 반영하고 있는 지와 주어진 계산 모델에서 얻은 해의 수치적인 정확도를 검토하는 것이다. 반면에 검증 계산은 코드 계산 결과와 실험 자료를 비교하여 계산 모델 및 실험 자료 물리적인 정확도에 대한 평가를 수행하는 것이다. 이 절에서는 CUPID 확인 및 검증에 대한 전략과 상태를 소개하고자 한다.

5.1 확인 계산

먼저, 표 4에 제시한 13개의 개념 문제를 사용하여 CUPID 코드를 체계적으로 확인하였다. 표 4의 각 문제는 지배 방정식의 특정 항목이나 특정 알고리즘을 확인할 수 있도록 선정하였다. 이 문제들을 4개의 그룹으로 분류한 뒤 계산 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(a) 스칼라 방정식을 옳게 풀고 있는 지를 확인하기 위하여 정상 상태 유동 문제를 풀었다. 보존성을 알아보기 위하여 질량 유량과 에너지 유량을 계산 영역의 입구와 출구에서 비교한 결과, 선택된 모든 문제에서 입구와 출구의 질량 유량과 에너지 유량의 상대적인 오차는 10⁻⁵보다 낮게 나오는 것을

확인하였다.

(b) 2상유동 계산시 기체나 액체가 새로 생기거나 아니면 사라지는 경우 수치적 문제가 있을 수 있다. 비등, 플래싱, 응축에 의한 상변화 문제들의 계산 결과를 분석하여 상이 생기거나 사라지는 상황에서 CUPID 코드의 수치 알고리즘의 무결성(integrity)을 확인하였다. 그리고, 상간 계면에서 에너지와 질량 전달항이 설계한 대로 작동하는 것도 확인할 수 있다. 아울러 존재하지 않는 상들에 대하여 보존 방정식이 설계한 대로 작동을 하는 지도 확인하였다.

(c) 운동량 방정식의 계면 견인력과 중력항이 올바르게 작동하는 지를 확인하기 위하여 상분리 문제를 활용하였다. 마노미터(manometer) 유동의 진동과 댐 붕괴 문제에서는 상들이 이미 분리되어 있다가 유체 정역학적인 수두를 원동력으로 과도 유동을 만들고 마침내 평형 상태에 이른다. 운동량 방정식에 있는 대부분의 항들은 이러한 상분리 문제의 계산과 관련이 된다. 그림 5에는 댐 붕괴 문제의 계산 결과를 제시하였다. 기포 분율과 날카로운 계면 위상의 위치 별 비교를 통하여 계면 위상을 계산하는 알고리즘(topology identification algorithm)이 적절히 구현되었다는 것을 확인하였다 [52].

(d) 액체와 비응축성 기체의 연속방정식을 확인하기 위하여 3차원 정상 상태 공기-물 2상유동을 모사하였다. 비응축성 기체가 존재할 때 계면에서 질량 전달 모델의 건전성을 확인하기 위하여 건도(quality, X_{ii})가 1인 마른 공기를 3차원 덕트(duct)에 주입하여 물을 기화시키는 계산을 수행한 뒤, 유로를 따라서 비응축성 기체의 건도를 검토하였다. 이 문제에서는 기화로 인해 수증기가 생성되고 있기 때문에 유로를 따라 비응축성 기체의 건도는 감소하여야 하고, 여기서 비응축성 기체의 건도의 이론적인 최소값은 국소에서 물의 포화압력에 따라서 결정되어야 한다. 계산된 비응축성 기체의 건도가 상기와 같은 결과를 보여주었고, 이것으로 CUPID 코드가 비응축성 기체를 잘 처리하고 있다는 것을 확인하였다 [11].

요약하면, 상기 계산의 결과를 통하여 CUPID 코드가 정렬 격자는 물론이고 비정렬 격자 위에서도 2상유동에 대한 지배방정식을 올바르게 풀고 있다는 것을 확인하였다.

5.2 검증계산 현황 및 전략

제한된 조건의 2상유동에 대해서 검증 계산을 수행 중이다 [11]. CUPID 코드는 기기 척도에서 2상유동의 과도분석을 할 수 있도록 설계하였다. CUPID 코드는 자유 매질 또는 다공성 매질로 2상유동을 풀 수 있는 기반을 마련하였다. 그러나, 이전에 언급한 바와 같이 현존하는 2상유동 모델로는 2상유동의 영역 전체에 대해 적용을 현재로서는 어렵다. 이러한 한계점을 인식하고 수조비등, DVI 에서 강수부 비등과 비상 노심 냉각수 우회(bypass), 가압 열 충격(Pressurized Thermal Shock;

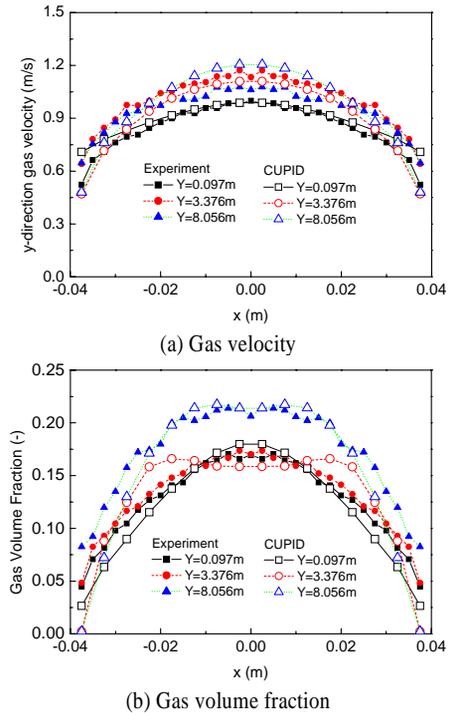


Fig. 6 Comparison of the calculated and the measured radial gas velocity and void distributions of the VAWL experiment

PTS) 등의 문제에 한정하여 CUPID 코드의 개발과 평가 전략을 수립하였다. 검증 계산을 통하여 CUPID 코드에서 채택하고 있는 물리적 모델의 단점을 확인할 것이다. 이렇게 확인된 단점을 모델 개선 전략에 피드백하여 CUPID 코드의 예측 능력을 증진시키고 가능한 한 경험주의를 배제할 수 있도록 할 것이다.

지금까지 다음 실험에 대하여 평가 계산을 통하여 CUPID 코드에 대한 평가를 수행하였다: (i) 수직관에서 공기-물 기포 유동(VAWL 실험), (ii) 수직 환형관에서 벽면 비등(SUBO 실험) (iii) 수직 평판에서 공기-물 기포 유동, (iv) 강수부 비등 실험 (DOBO 실험), (v) 댐 붕괴 실험 [53]. 일반적으로, CUPID 코드는 기포 분율이 낮다면 이들 실험을 개략적으로 예측할 수 있다. 상기 계산중 VAWL 실험과 DOBO 계산 2가지의 경우에 대한 결과를 아래에 제시하였다.

VAWL 실험에서는 직경이 0.08 m 이고 높이가 10 m인 수직관에서 공기-물 2상유동의 계면 면적 밀도 분포와 기체 부피분율을 세 개의 높이에서 측정하였다[54, 55]. 계산에서는 16 x 200개의 2차원적인 격자를 사용하였다. 그림 6은 계산 결과를 보여준다. 비록 중앙부에서 수증기 부피 분율이 측정 데이터에 비해 낮게 예측하긴 하지만 CUPID 코드에서 비경

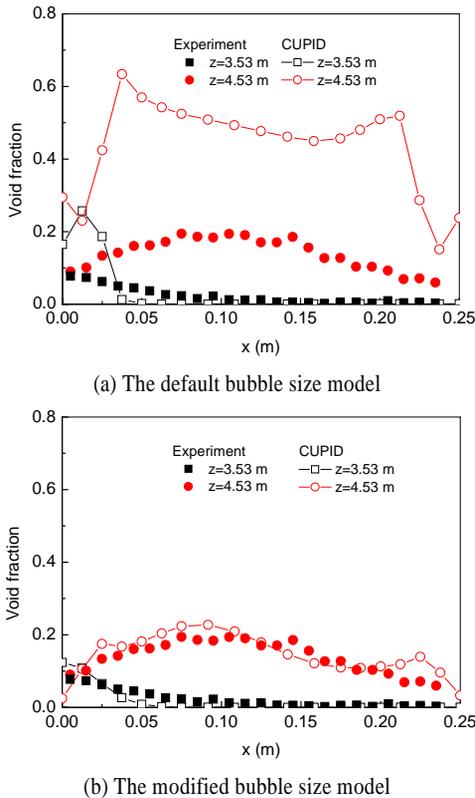


Fig. 7 Comparison of the calculated and the measured radial void distributions of the DOBO experiment

인력이 합리적으로 작동을 하는 것을 알 수 있다.

DOBO 시험 장치는[56] 가로×세로×높이가 각각 0.25 m × 0.3 m × 6.4 m인 직사각 도관의 형태이다. 시험 장치의 네 개의 벽중에 하나의 벽은 원자로용기 벽면으로부터 열방출을 모사하기 위하여 207 개의 카트리지 히터를 장착하였다. 주요 측정 인자는 국소 기포 분율, 국소 기체 및 액체 속도, 국소 유체 온도, 차압, 압력, 액체 유량 등이다. CUPID 검증에 위하여 다음과 같은 시험을 선택하였다. 바닥 입구에서 냉각수 유량과 온도는 3.2 kg/s(0.0183 m/s) 와 111.9 °C이다. 가열 벽면으로부터 열속은 72 kW/m² 이고 제어 밸브를 사용하여 시험 장치 상부 출구를 0.16 MPa 으로 유지하였다.

CUPID 계산에서는 2차원적인 격자 18 × 122 개를 사용하였고, 깊이 방향을 따라 유동 거동은 축방향이나 넓이 방향에 따른 유동에 비해 무시할 수 있는 것으로 가정하였다. 그림 7은 CUPID 계산에서 얻은 기포 분율을 DOBO 실험에서 측정된 기포 분율과 반경방향으로 비교하였다. 3차원적인 계산 또한 거의 같은 결과를 생산하였다. 기포 분율 분포는 기포 크기 모델에 민감하였고, 기포 분율이 높은 실험에서는 더욱 큰

오차를 보여주었다. 수정된 기포 크기 모델 [56]은 작동을 잘 하였는데, 다른 유동 조건을 갖는 다른 실험에는 일반적으로 적용할 수가 없었다. DOBO 실험을 좀 더 잘 모사하기 위해서는 슬러그와 천이 유동 영역에서 계면에서 전달항에 대한 개선이 필요하다.

6. 결 론

과도 상태 2상유동의 분석을 위하여 기기 척도를 갖는 3차원 고정밀 열수력 해석용 CUPID 코드를 개발하였다. CUPID 코드는 2 유체 3장 모델을 채택하여 2상유동을 묘사하고 있다. 비정렬 격자에 대해서 수치해를 얻을 수 있도록 semi-implicit 2 단계 수치 방법을 개발하였다. 개발된 semi-implicit 2 단계 수치 방법의 정확도와 강건성을 증진시키기 위한 노력을 기울여왔다.

여러 가지 개념 문제와 몇 가지 실험을 활용하여 CUPID 코드의 수치적 표현과 수치 알고리즘에 대한 확인 계산을 완료하였다. 확인 계산을 통하여 CUPID 코드에 적용된 수치 기법이 단상, 2상, 상변화, 비등, 플래싱, 상분리, 공기-물 유동 등을 수치적으로 정확하고 안정되게 풀 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 CUPID 코드의 질량과 에너지의 보존성에 문제가 없음을 증명하였다.

확인 계산을 완료한 뒤에 CUPID 코드의 물리적 모델에 대한 검증 계산을 수행하고 있다. 본문에서 언급한 바와 같이 현재 CUPID 코드에 구현된 물리 모델로는 2상유동의 모든 문제를 푸는 데는 한계가 있다. 이러한 점에서 일정한 제약 조건하에 CUPID 코드의 개발과 평가 전략을 세웠다. 먼저 기포 유동에 해당되는 몇 가지 실험에 대한 계산을 통하여 CUPID 코드의 검증 계산을 수행하였다. 상기 검증 계산에서 CUPID 코드는 기포 분율이 낮은 영역에서는 정성적으로는 합리적인 결과를 예측하는 것으로 나타났다. 향후 검증 계산을 하면서 CUPID 코드에 구현된 물리 모델의 단점을 정리하여, CUPID 코드의 물리 모델 개선으로 피드백할 것이다. 궁극적으로 CUPID 코드에 대한 이러한 일련의 모든 개발 및 평가를 통하여 우선 CUPID 코드를 독자 코드로 개발하고, 동시에 CUPID 코드를 계통 코드 혹은 CFD 코드와 연계할 예정이다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.(연구과제 관리코드: M20702040002-08M0204-00210)

참고문헌

- [1] 1996, Proc. OECD/CSNI Workshop on Transient Thermal-Hydraulic and Neutronic Codes Requirements, Annapolis, MD, USA, 5-8 November 1996, NUREG/CP-0159, NEA/CSNI/R(97)4.
- [2] 2003, Yadigaroglu, G., Andreani, M., Dreier, J. and Coddington, P., "Trends and needs in experimentation and numerical simulation for LWR safety," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.221, pp.205-223.
- [3] 2010, Bestion, D., "Extension of CFD codes application to two-phase flow safety problems," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.42, pp.365-376.
- [4] 2005, Yadigaroglu, G., "Computational fluid dynamics for nuclear applications: From CFD to multi-scale CMFD," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.235(2-4), pp.153-164.
- [5] 2005, Staetke, H., et al, "Advanced three-dimensional two-phase flow simulation tools for application to reactor safety (ASTAR)," *Nuclear Design and Design*, Vol.235, pp.379-400.
- [6] 2007, Guelfi, A., et al., "NEPTUNE: a new software platform for advanced nuclear thermal hydraulics," *Nuclear Science and Engineering*, Vol.156(3), pp.281-324.
- [7] 2005, Bestion, D., "Status and perspective of two-phase flow modeling in the NEPTUNE multiscale thermal-hydraulic platform for nuclear reactor simulation," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.37,511-524.
- [8] 2010, Niceno, B., Sato, Y., Badillo, A., M. Andreani, M., "Multi-scale modeling and analysis of convective boiling: Towards the prediction of CHF in rod bundles," to be published in the December issue of Nuclear Engineering and Technology.
- [9] 2010, Hosoi, H., Yoshida, H., "Numerical simulation of air-water two-phase flow in 38 mm diameter pipe by advanced two-fluid model including effects of turbulent diffusion on bubbles," *The 7th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety(NTHAS7)*, November 14-17, Chuncheon, Korea.
- [10] 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.
- [11] 2010, Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Park, I.K., Cho, H.K., Lee, H., "Development and preliminary assessment of a three-dimensional thermal hydraulics code, CUPID," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.42, pp.279-296.
- [12] 2006, Yun, B.J., Euh, D.J., and Song, C.H., "Investigation of the downcomer boiling phenomena during the reflood phase of a postulated large-break LOCA in the APR1400," *Nuclear Technology*, Vol.156, pp.56-68.
- [13] 2006, Ishii, M. and Hibiki, T., *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, Springer.
- [14] 2001, The RELAP5-3D Code Development Team, RELAP5-3D code manual volume I: Code structure, system models and solution methods, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
- [15] 1999, Jeong, J.J., Ha, K.S., Chung, B.D., and Lee, W.J., "Development of a multi-dimensional thermal-hydraulic system code, MARS 1.3.1," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.26(18), pp.1611-1642.
- [16] 1990, Barre, F., Bernard, M., "The CATHARE code strategy and assessment," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.124, pp.257-284.
- [17] 2003, Frepoli, C., Mahaffy, J.H., and Ohkawa, K., "Notes on the implementation of a fully-implicit numerical scheme for a two-phase three-field flow model," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.225, pp.191-217.
- [18] 2005, Tentner, A., et al., "Computational fluid dynamics modeling of two-phase flow in a boiling water reactor fuel assembly," Proc. of Mathematics and Computation, Supercomputing, Reactor Physics and Nuclear and Biological Applications, Avignon, France..
- [19] 2006, CD-adapco, "STAR-CD Version 4.0 Methodology Manual", Chapter 13, CD-adapco, UK.
- [20] 2006, Tentner, A., et al., "Advances in computational fluid dynamics modeling of two-phase flow in a boiling water reactor fuel assembly," *Proc. of ICONE14, Miami*, USA.
- [21] 2008, Tentner, A., et al., "Computational fluid dynamics modeling of two-phase flow topologies in a boiling water reactor fuel assembly," *Proc. of ICONE16, Orlando*, USA.
- [22] 2007, Ioilev, A., et al., "Advances in the modeling of cladding heat transfer and critical heat flux in boiling water reactor fuel assemblies," *Proc. of NURETH-12, Pittsburgh*, USA.
- [23] 2008, Ustinenko, V., et al., "Validation of CFD-BWR, a new two-phase computational fluid dynamics model for boiling water reactor analysis," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.238, pp.660-670.

- [24] 2002, Yoneda, K., et al., "Flow structure and bubble characteristics of steam - water two-phase flow in a large-diameter pipe," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.217, pp.267-281.
- [25] 1983, Kataoka, I., Ishii, M., and Mishima, K., "Generation and size distribution of droplet in annular two-phase flow," *Trans. ASME, J. Fluid Engineering*, Vol.105, pp.230 - 238.
- [26] 2008, Coste, P., et al., "Status of a two-phase CFD approach to the PTS issue," *XCFD4NRS Workshop*, Grenoble, France.
- [27] 1979, Drew, D., Cheng, L.Y., Lahey, R.T., "The analysis of virtual mass effect in two-phase flow," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.5, pp.233-272.
- [28] 2002, Tomiyama, A., Tamia, H., Zun, I., and Hosokawa, S., "Transverse migration of single bubbles in simple shear flows," *Chemical Engineering Science*, Vol.57, pp.1849-1858.
- [29] 1991, Antal, S.P., Lahey, R.T., Flaherty, J.E., "Analysis of phase distribution in fully developed laminar bubbly two-phase flow," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.7, pp.635-652.
- [30] 1993, Lahey, R.T., Lopez de Bertodano, M., and O.C. Jones, O.C., "Phase distribution in complex geometry conduits," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.141, pp.177-201.
- [31] 1998, Lopez de Bertodano, M., "Two fluid model for two-phase turbulent jets," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.179, pp.65-74.
- [32] 1986, Michiyoshi, I., and Serizawa, A., "Turbulence in two-phase bubbly flow," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.95, pp.253-267.
- [33] 1981, Sato, Y., Sadatomi, M., Sekoguchi, K., "Momentum and heat transfer in two-phase bubble flow - I," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.7, pp.167-177.
- [34] 2010, Yun, B.J., Splawski, A., Lo, S., and Song, C.-H., "Prediction of a subcooled boiling flow with mechanistic wall boiling and bubble size models," *Proc. CFD4NRS-3*, Washington D.C., USA, 14-16 September.
- [35] 1997, AEA, CFX-4 Solver Manual, UK.
- [36] 1969, Cole, R., and Rosenhow, W., "Correlation of bubble departure diameters for boiling of saturated liquids," *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.* Vol.65(92), pp.211 - 213.
- [37] 1978, Liles, D.R., and Reed, W.H., "A semi-implicit method for two-phase fluid dynamics," *J. Comput. Phys.*, 26, 390-407.
- [38] 2010, Yoon, H.Y. and eong, J.J., "A continuity based semi-implicit scheme for transient two-phase flows," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.47, No.9, pp.779-789.
- [39] 2009, Park, I.K., Cho, H.K., Yoon, H.Y., and Jeong, J.J., "Numerical effects of the semi-conservative form of momentum equations for multi-dimensional two-phase flows," *Nuclear Engineering and Design*, 239, 2365 - 2371 (2009).
- [40] 2010, Cho, H.K., Lee, H.D., Park, I.K., Jeong, J.J., "Implementation of a second-order upwind method in a semi-implicit two-phase flow code on unstructured meshes," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.37, 606 - 614.
- [41] 2010, Lee, H., Jeong, J.J., Cho, H.K., Yoon, H.Y., "An improved numerical scheme to evaluate the pressure gradient on unstructured meshes for two-phase flow analysis," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.37, pp.1273-1279.
- [42] 1994, Frink, N.T., "Recent progress toward a three-dimensional unstructured Navier-Stokes flow solver," *AIAA Paper 94-0061*.
- [43] 1989, Barth, T.J., and Jespersen, D.C., "The design and application of upwind schemes on unstructured meshes," *AIAA Paper 89-0366*.
- [44] 1995, Venkatakrishnan, V., "Convergence to steady state solutions of the Euler equations on unstructured grids with limiters," *Journal of Computational Physics*, Vol.118, pp.120 - 130.
- [45] 1999, Weiss, J.M., "Implicit solution of preconditioned Navier-Stokes equations using algebraic multigrid," *AIAA J.*, Vol.37, No.1.
- [46] 1997, Mathur, S.R., "A pressure-based method for unstructured meshes," *Numerical Heat Transfer*, Part B 31, pp.195-215.
- [47] 1992, Lee, S.Y., Jeong, J.J., Kim, S.H., and Chang, S.H., "COBRA/RELAP5; A merged version of the COBRA-TF and RELAP5/MOD3 codes," *Nuclear Technology*, Vol.99, pp.177-187.
- [48] 2000, Boer, R., Finnemann, H., and Knoll, A., "MSLB exercise 2: 3-D kinetics results with RELAP5/PANBOX," *Proc. Int. Topl. Mtg. Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium(PHYSOR2000)*, Pittsburgh, Pennsylvania, May 7 - 12, 2000, American Nuclear Society.
- [49] 2003, Joo, H.G., Jeong, J.J., Cho, B.O., Lee, W.J., and Zee,

- S.Q., "Analysis of the OECD MSLB benchmark problem using the refined core thermal-hydraulic nodalization feature of the MARS/MASTER code," *Nuclear Technology*, Vol.142, pp.166-179.
- [50] 2010, Jeong, J.J., Lee, S.W., Cho, J.Y., Chung, B.D., and Lee, G.C., "A coupled analysis of system thermal-hydraulics and three-dimensional reactor kinetics for a 12-finger control element assembly drop event in a PWR plant," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.37, pp.1580-1587.
- [51] 2010, Lee, J.R., Cho, H.K., Jeong, J.J., "Coupled simulation of component thermal hydraulics and neutron kinetics for a nuclear reactor core with CUPID and MASTER," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Jeju, Korea, October 21-22.
- [52] 2009, Cho, H.K., Park, I.K., Lee, H.D., Jeong, J.J., "Constitutive relations and a second-order interpolation scheme for the semi-implicit two-phase flow solver, CUPID," *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE17)*, July 12-16, Brussels, Belgium.
- [53] 2008, Nagatake, T., Kawara, Z., and Kunugi, T., "Establishment of experimental data base on dam-breaking problem for validating interface tracking methods," *NTHAS6: Sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety*, Okinawa, Japan, Nov. 24-27.
- [54] 2005, Huh, B.K., *Experimental and Analytical Study of Interfacial and Transport Phenomena in a Vertical Two-phase Flow*, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Korea.
- [55] 2010, Euh, D.J., et al., "Transport of local two-phase parameters in vertical air/water flow for bubbly and slug flow regime," *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Pyeongchang, Korea, May 27-28.
- [56] 2010, Cho, H.K., Yun, B.J., Park, I.K., and Jeong, J.J., "Computational analysis of downcomer boiling phenomena using a component thermal hydraulic analysis code CUPID," *Proc. the 18th International Conference on Nuclear Engineering*, Xi'an, China, May 17-21.