

## CUPID코드의 유체 물성치 변화를 고려한 자연대류 해석

이 승 준,<sup>1</sup> 박 익 규,<sup>1</sup> 윤 한 영,<sup>1</sup> 김 정 우<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 열수력안전연구부

<sup>2</sup>서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

### NATURAL CIRCULATION ANALYSIS CONSIDERING VARIABLE FLUID PROPERTIES WITH THE CUPID CODE

S.J. Lee,<sup>1</sup> I.K. Park,<sup>1</sup> H.Y. Yoon<sup>1</sup> and J. Kim<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, Thermal Hydraulics Safety Research Div.

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology

*Without electric power to cool down the hot reactor core, passive systems utilizing natural circulation are becoming a big specialty of recent nuclear systems after the severe accident in Fukushima. When we consider the natural circulation in a pool, thermal mixing phenomena may start from single phase circulation and can continue to two phase condition. Since the CUPID code, which has been developed for two-phase flow analysis, can deal with the phase transition phenomena, the CUPID would be pertinent to natural convection problems in single- and two-phase conditions. Thus, the CUPID should be validated against single- and two-phase natural circulation phenomena. For the first step of the validation process, this study is focused on the validation of single-phase natural circulation. Moreover, the CUPID code solves the fluid properties by the relationship to pressure and temperature from the steam table considering non-condensable gas effects, so that the effects from variable properties are included. Simple square thermal cavity problems are tested for laminar and turbulent conditions against numerical and experimental data. Throughout the investigation, it is found that the variable properties can affect the flow field in laminar condition, but the effect becomes weak in turbulence condition, and the CUPID code implementing steam table is capable of analyzing single phase natural circulation phenomena.*

**Key Words :** 자연대류(Natural Circulation), CUPID 코드(CUPID Code), 가변유체물성치(Variable Fluid Property), 단상(Single Phase), 사각공동(Square Cavity)

### 1. 서 론

일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후로, 전력공급이 차단된 상황에서 원자로를 냉각시킬 수 있는 피동안전계통(passive safety system)에 대한 연구가 원자력안전 연구의 최신 연구 동향이다. 원자력안전 연구는 주로 2상(two phase)유동을 다루고 비등(boiling)이나 응축(condensation)과 같은 상변화 현상을 내포하는데, 피동안전계통의 하나인 수조(pool)에서의 자연대류 열혼합 현상은 일반적으로 단상(single phase)유동에서

시작하여 2상유동으로 진행되어지기에 주요한 원자력안전연구분야로 볼 수 있다.

이러한 단상 및 2상유동에 대한 열수력(thermal hydraulics) 해석을 위해 한국원자력연구원에서는 CUPID 코드[1-3]를 개발하였다. CUPID 코드는 원자력 열수력계통의 사고 안전성 해석이나 기기들의 성능을 평가하는데 목적을 두고 있다. 특히 원자력 열수력계통의 사고 해석 문제는 최대 150 bar에 이르는 압력변화와 가열된 원자로와 냉각계통간의 수백 K에 이르는 온도차이로 극단적 유체 성질 변화를 보이고, 또한 기포와 물 사이의 복잡한 거동으로 인해 정밀한 예측이 매우 어렵다. CUPID는 2-유체(two-fluid) 기법에 근거한 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 스케일 코드인데, 넓은 범위의 압력 및 온도 변화를 고려하기 위해 증기표(steam table)와 비응축성기체가 연계되어 있고, 2-유체 방정식의 closure인 다

Received: September 8, 2015, Revised: December 23, 2015,  
Accepted: December 23, 2015.

\* Corresponding author, E-mail: kimjw@seoultech.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.4.014>

© KSCFE 2015

수의 물리 모델을 포함하고 있어, 다양한 사고 및 원자로 운전 조건에서의 상변화/응축 문제를 다룰 수 있다.

전통적인 원자로 열수력안전해석 프로그램인 RELAP5[4], TRACE[5], MARS[6], CATHARE[7] 등과 같은 1차원 열수력 프로그램과 달리 CUPID는 3차원으로 작성되었으며, 아직까지 1차원 코드에서 검증된 물리 모델의 다차원 적용성에 대한 검토가 진행 중에 있다. 본 논문도 그 연장선으로 피동안전계통인 수조의 자연대류 현상에 대한 다차원 해석 성능을 검토하는 것을 최종 목표로 하고, 그 첫 과정으로 단상 자연대류(single phase natural circulation) 열혼합(thermal mixing) 현상에 대한 검토를 수행할 것이다.

2장에서는 CUPID 코드의 지배방정식과 상태방정식을 설명하고, 3장에서는 CUPID에 적용된 2-유체 난류수송 방정식을 설명하고, 4장에서는 층류와 난류 조건에 대한 단상 자연대류 해석 결과를 검증할 예정이다.

## 2. 지배방정식과 상태방정식

### 2.1 지배방정식

CUPID 코드는 2-유체 3-장(three-field) 모델을 적용하였다. 2-유체는 하나의 격자(cell)내에서 기체와 액체의 유체역학적 특성을 다르게 정의함으로써 상변화나 기포 등의 거동을 묘사한다는 의미이다. 3-장은 액체(liquid), 기체(gas), 액적(droplet)장으로 정의하였다. 따라서 2-유체 3-장 모델은 하나의 격자에서 액체, 기체, 액적의 물성치를 동시에 갖는다는 의미이다.

CUPID 코드의 질량 보존방정식은 다음과 같다.

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

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

여기서, 하첨자  $k$ 는 임의의  $k$ -장을 나타내고,  $\Omega_k$ 는 상변화율(phase change rate)을 의미한다. 상변화율은 bulk 비등과 벽면 비등을 일컫는다. 식 (1)은 각 장의 질량보존을 나타내며, 식 (2)는 기체상의 증기에 대한 비응축성(non-condensable) 기체(혹은 공기) 비율( $X_n$ )의 보존방정식을 나타낸다.

운동량 보존방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \vec{u}_k) \\ = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\mu_l + \mu_t) \nabla \vec{u}_k] + \alpha_k \rho_k \vec{g} \\ + M_k^{mass} + M_k^{drag} + M_k^{ndrag} + M_k^{VM} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\mu_l$ 과  $\mu_t$ 는 각각 분자점성계수와 난류점성계수를 의미하고,  $M_k^X$ 는 각 장(field)간의 계면운동량전달(interfacial momentum transfer)을 나타낸다.  $M_k^X$ 의 상첨자  $X$ 는 상간의 운동량전달 메커니즘을 나타내는데 질량(mass) 교환, 견인력(drag) 교환, 비견인력(non-drag) 교환, 가상질량(virtual mass) 교환방식으로 구성된다.

에너지 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g e_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \vec{u}_g) \\ = -P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - P \nabla \cdot (\alpha_g \vec{u}_g) + \ddot{q}_g \\ + \nabla \cdot (\alpha_g \vec{q}_g) + \Omega_g h_g^* + \frac{P_s}{P} H_{ig} [T^s(P_s) - T_g] \\ - \left( \frac{P - P_s}{P} \right) H_{gf} (T_g - T_l) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}((\alpha_l + \alpha_d) \rho_l e_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l e_l \vec{u}_l + \alpha_d \rho_d e_d \vec{u}_d) \\ = -P \frac{\partial (\alpha_l + \alpha_d)}{\partial t} - P \nabla \cdot (\alpha_l \vec{u}_l + \alpha_d \vec{u}_d) + \ddot{q}_l \\ + \nabla \cdot (\alpha_l \vec{q}_l + \alpha_d \vec{q}_d) - \Omega_g h_g^* \\ + H_{lf} [T^s(P_s) - T_l] + \left( \frac{P - P_s}{P} \right) H_{gf} (T_g - T_l) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 식 (4)는 혼합기체(증기+공기)에 대한 에너지 보존 방정식을, 식 (5)는 액체류(액체+액적)의 에너지 보존을 의미하는데, 액체와 액적의 열적 평형을 가정하였다.  $H_{if}$ ,  $H_{ig}$ 와  $H_{gf}$ 는 계면에서 액체(하첨자  $f$ ) 또는 기체(하첨자  $g$ )로의 열전달계수, 그리고 공기에서 액체(하첨자  $g$ )로의 열전달계수를 의미한다. 또한 상첨자나 하첨자의  $s$ 는 포화(saturation)상태를 의미한다.

### 2.2 상태방정식

각 상(phase: 혹은 field)의 밀도, 온도, 포화온도, 포화 압력은 수정된 Gibbs-Dalton 증기 혼합물 가정을 통해 다음과 같은 상태방정식으로 정리된다.

$$\rho_g = \rho_g(P, e_g, X_n) \quad (6)$$

$$\rho_l = \rho_l(P, e_l) \quad (7)$$

$$T_g = T_g(P, e_g, X_n) \quad (8)$$

$$T_l = T_l(P, e_l) \quad (9)$$

$$T^s = T^s(P_s) \quad (10)$$

$$P^s = P^s(P, e_g, X_n) \quad (11)$$

여기서  $e$ 는 내부에너지를 나타낸다. 밀도나 온도는 종속변수 (dependent variable)로 압력과 내부에너지와 같은 독립변수 (independent variable)의 변화율로써 선형화 된다. 따라서 위 상태방정식(식 (6)-(11))은 혼합물 증기표로부터 얻은 각 종속 변수에 대한 독립변수의 변화율에 대한 정보로써 지배방정식 (식 (1)-(5))에 연계된다.

### 3. 2-유체 $k$ - $\epsilon$ 난류 수송 방정식

난류점성계수는 다음과 같은 조건으로 정의한다.

$$\mu_{T,l} = C_\mu \rho_l k_l^2 / \epsilon_l \quad (12)$$

만일, 상간의 난류점성계수는 서로 같다는 조건을 적용하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu_{T,g} = \mu_{T,l} \rho_g / \rho_l \quad (13)$$

식 (13)은 사용자의 선택에 의해 사용될 수 있고, 아래에 설명될 2-유체 난류 수송 방정식을 풀어 식 (12)로만 사용할 수도 있다[16].

2-유체  $k$ - $\epsilon$  난류 수송 방정식은 난류운동에너지 수송 방정식과 Jones and Lauder[8]의 소산률 수송 방정식을 각 상에 도입한다. 부력효과[9]를 고려하기 위해 각 수송 방정식에 부력에 의한 난류운동에너지 및 소산률 방정식 생성항( $P_{b,g}$ ,  $P_{b,l}$ )을 추가하여 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l k_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l k_l \vec{u}_l) \\ &= \nabla \cdot \left[ \alpha_l \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right)_l \nabla k_l \right] + \alpha_l P_{k,l} + \alpha_l P_{b,l} \\ & \quad - \alpha_l \rho_l \epsilon_l + \alpha_l S_k + \Phi + D \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g k_g \vec{u}_g) \\ &= \nabla \cdot \left[ \alpha_g \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right)_g \nabla k_g \right] + \alpha_g P_{k,g} + \alpha_g P_{b,g} \\ & \quad - \alpha_g \rho_g \epsilon_g + D \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \epsilon_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \epsilon_l \vec{u}_l) \\ &= \nabla \cdot \left[ \alpha_l \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right)_l \nabla \epsilon_l \right] \\ & \quad + \frac{\alpha_l \epsilon_l}{k_l} (f_1 C_{\epsilon 1} P_{k,l} - f_2 C_{\epsilon 2} \rho_l \epsilon_l) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\epsilon_l}{k_l} f_1 C_{\epsilon 2} C_{\epsilon 3} P_{b,l} + \alpha_l S_\epsilon + E \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \epsilon_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \epsilon_g \vec{u}_g) \\ &= \nabla \cdot \left[ \alpha_g \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right)_g \nabla \epsilon_g \right] \\ & \quad + \frac{\alpha_g \epsilon_g}{k_g} (f_1 C_{\epsilon 1} P_{k,g} - f_2 C_{\epsilon 2} \rho_g \epsilon_g) \\ & \quad + \frac{\epsilon_g}{k_g} f_1 C_{\epsilon 2} C_{\epsilon 3} P_{b,g} + E \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, 2상유동의 경우 기포진동에 의한 난류생성항인  $S_k$  [10]가, 벽면비동에 의한 난류생성항인  $\Phi$ [11]가 식 (14)의 기체상에 추가되고, 기포진동에 의한 난류감쇠율 생성항인  $S_\epsilon$  [10]이 식 (16)에 추가되었다.

부력에 의한 난류생성항은 다음과 같다.

$$P_b = \beta \frac{\mu_T}{Pr_T} \vec{g} \cdot \nabla T \quad (18)$$

$$C_{\epsilon 3} = \tanh \left| \frac{V}{U} \right| \quad (19)$$

또한, 난류자연대류에 대한 정확도 향상을 위해 standard  $k$ - $\epsilon$  난류모델과, low-Reynolds 수  $k$ - $\epsilon$  난류모델[12]을 추가하여 비교하였고, 계수는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Constants for  $k$ - $\epsilon$  turbulence models

Coeffs.	standard	low-Reynolds-number
$C_\mu$	0.09	1.44
$C_{\epsilon 1}$	1.44	1.35
$C_{\epsilon 2}$	1.92	1.80
$\sigma_T$	1.00	1.00
$\sigma_k$	1.00	1.00
$\sigma_\epsilon$	1.30	1.30

Table 2 Coefficients for  $k$ - $\epsilon$  turbulence models

Coeffs.	standard	low-Reynolds-number
$f_1$	1	1.0
$f_2$	1	$1 - \frac{2}{9} \exp[-(Re_T/6)^2]$
$f_\mu$	1	$1 - \exp[-0.0115y^+]$
$D$	0	$-2\mu k/y_n^2$
$E$	0	$-2\mu \frac{\epsilon}{y_n^2} \exp[-0.5y^+]$

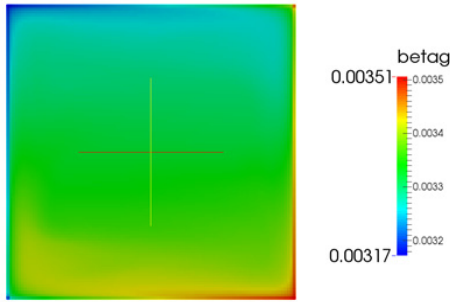


Fig. 1 Thermal expansion coefficient estimated by the steam table

### 4. 자연대류 해석 검증

정사각 공동(square thermal cavity)에서 자연대류 문제를 층류와 난류로 나누어 검증해 보았다. 층류의 비교를 위해 Barakos의 해석해[13]와 Krane의 실험결과[14]와 비교하였으며, 난류의 비교를 위해 Ampofó의 실험결과[15]와 비교하였다. 또한, 물성치 변화의 영향성을 살펴보기 위해 부력 항에 Boussinesq 가정을 적용하여 상수 물성치가 적용된 CUPID 해석(이후 CUPID-Boussinesq)을 추가로 수행하여 기본 CUPID 코드(이후 CUPID-Steam Table)의 결과와 비교하였다.

#### 4.1 CUPID-Boussinesq 버전

Barakos의 해석결과와 Fluent의 결과는 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 풀어 얻은 결과로 밀도를 상수로 처리한다. 뿐만 아니라, 정압비열(Cp), 열전도도, 열팽창계수, 분자 점성계수를 상수로 처리하고, 밀폐된 공동에서의 온도 상승으로 인한 비체적 증가와 그에 따른 압력의 상승을 고려하지 않는다. 이와 같은 조건을 모사하기 위해 다음과 같이 수정하였다.

$$\rho_T \approx \rho [1 - \beta(T - T_{ref})] \tag{20}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \vec{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{u}_k \vec{u}_k) \\ = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\mu_l + \mu_t) \nabla \vec{u}_k] \\ + \alpha_k \rho_k \vec{g} [1 - \beta(T - T_{ref})] \\ + M_k^{mass} + M_k^{drag} + M_k^{ndrag} + M_k^{VM} \end{aligned} \tag{21}$$

식 (20)은 부력 항에 대한 Boussinesq 근사를 나타내고, 식 (20)으로 식 (3)의 부력 항을 수정하면 식 (21)이 얻어진다. CUPID 코드는 비압축성 코드이지만 압력과 온도에 대한 국

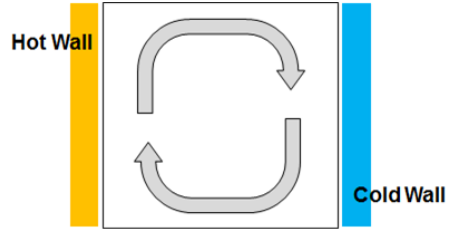


Fig. 2 2-dimensional thermal cavity concept

소 밀도변화(식 (1), 식 (6))를 고려하기에 밀도장 계산이후 밀도를 상수로 업데이트하고, 증기표 계산 이후에 정압비열, 열전도도, 열팽창계수, 분자점성계수를 상수로 처리함으로써 CUPID-Boussinesq 적용 버전을 작성하였다.

#### 4.2 CUPID-Steam Table 버전 검토

Fig. 1은 CUPID-Steam Table 해석을 통해 얻은 열팽창계수 값을 나타낸다. 이를 상수 열팽창계수 값과 다음과 같이 비교할 수 있다.

- 1) Mean Temperature 와 Rayleigh 수의 정의로부터 유도:

$$\beta = Ra \alpha_m \nu_m / g \Delta T L^3 \approx 0.003398$$

- 2) Barakos [13]의 Mean Temperature를 이용한 정의:

$$\beta = 1 / T_m \approx 0.003299$$

1)과 2)의 정의로부터 얻은 상수 열팽창계수는 Fig. 1의 값과 전체적으로 크게 다르지 않기에 현재의 증기표를 이용한 접근방식이 합리적일 수 있음을 확인했다.

#### 4.3 자연대류 해석 조건

해석 대상은 Fig. 2에서와 같이 정사각형 공동으로 좌측 벽은 hot wall, 우측 벽은 cold wall로 정하였으며, 수평 벽면은 단열조건이다. 자연대류 해석은 층류와 난류 조건으로 구분하였고, 형상정보, 기타 유동 정보 및 온도경계조건은 Table 3에 정리하였다.

또한, CUPID-Boussinesq 버전의 상수 물성치는 Case 1과 Case 2의 경우 평균온도인 20°C를 기준으로 1.205 kg/m<sup>3</sup>의 밀

Table 3 Test matrix

Case	Rayleigh Number	L (m)	T <sup>hot</sup> (°C)	T <sup>cold</sup> (°C)	Type
1	10 <sup>4</sup>	0.01688	30	10	Laminar
2	1.89 x 10 <sup>5</sup>	0.04493	30	10	Laminar
3	1.58 x 10 <sup>9</sup>	0.04183	50	10	Turbulence

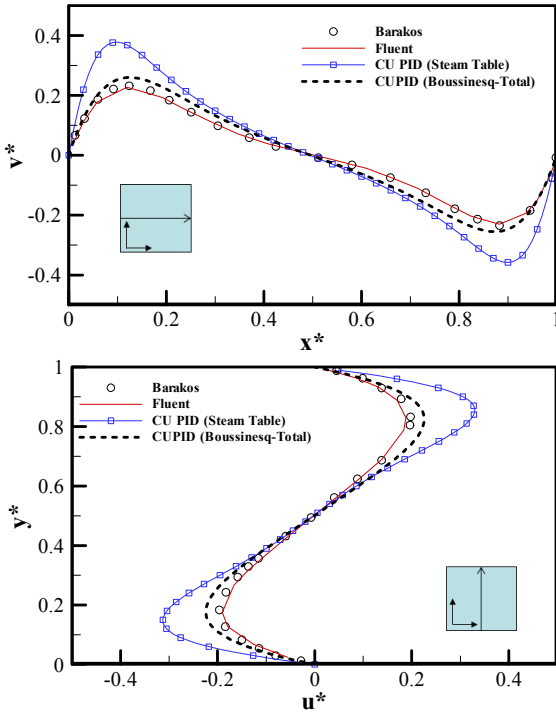


Fig. 3 Comparison with numerical solutions for Case 1 (Laminar condition,  $Ra = 10^4$ )

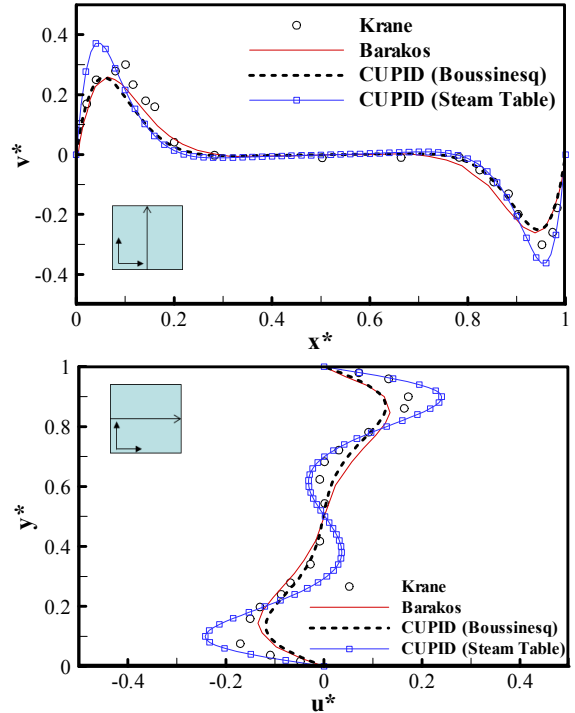


Fig. 4 Comparison with experimental solutions for Case 2 (Laminar condition,  $Ra = 1.89 \times 10^5$ )

도와,  $1.821 \times 10^5$  kg/m·s의 분자점성도, 0.0257 W/m·K의 전도도로 정하였고, Case 3의 경우 평균온도인 30°C를 기준으로 1.165 kg/m<sup>3</sup>의 밀도와,  $1.868 \times 10^5$  kg/m·s의 분자점성도, 0.0263 W/m·K의 전도도로 정하였다.

CUPID 코드를 이용한 해석에는  $100 \times 100$ 의 격자계를 적용하였다. Standard  $k-\epsilon$  난류모델에 대해서는 균일 격자계를 사용하였으며, low-Reynolds 수  $k-\epsilon$  난류모델에 대해서는 벽면 첫 셀의  $y^+$ 가 5정도 되는 벽면 밀집 격자계를 사용하였다.

#### 4.4 자연대류 해석 결과 비교

Fig. 3는 Case 1에 대한 해석 결과를 비교한 그림이다. CUPID 해석 결과비교를 위해 공동(cavity)의 가로축과 세로축의 중앙에서 무차원화된 속도[13]를 비교하였다. Barakos, Fluent와 CUPID-Boussinesq 결과는 서로 일치하였지만, CUPID-Steam Table의 결과는 벽면 부근에서 Barakos et al.[13]의 결과와 비교하여 차이를 보인다.

Fig. 4는 Case 2에 대한 해석 결과를 비교한 그림으로 Krane의 실험결과와 비교를 하였다. Fig. 3에서와 마찬가지로 CUPID-Boussinesq 결과는 Barakos의 결과와 잘 일치하고 있으며 실험결과와 비교했을 때는 과소예측(underprediction)임을

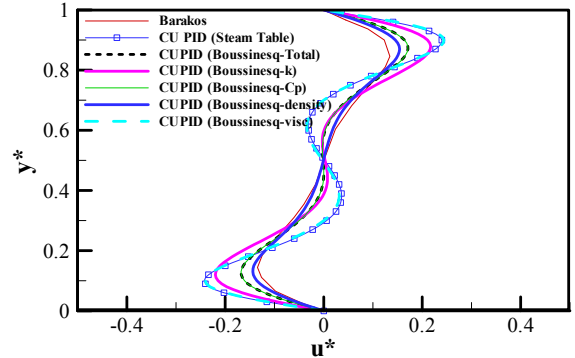


Fig. 5 Effects on Variable Parameters for Case 2

알 수 있다. CUPID-Steam Table의 경우에는 과대예측(overprediction)을 보이고 있지만 실험 결과와 비슷한 유동장 형태를 띠고 있음을 볼 수 있다.

Case 1과 Case 2 결과는 물성치에 대한 입력이 층류 자연대류 결과에 영향을 주고 있다는 것을 의미한다. 따라서 열전도도, 정압비열, 밀도, 점성도 등에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

Fig. 5는 CUPID-Boussinesq 코드에서 상수로 정의된 변수들

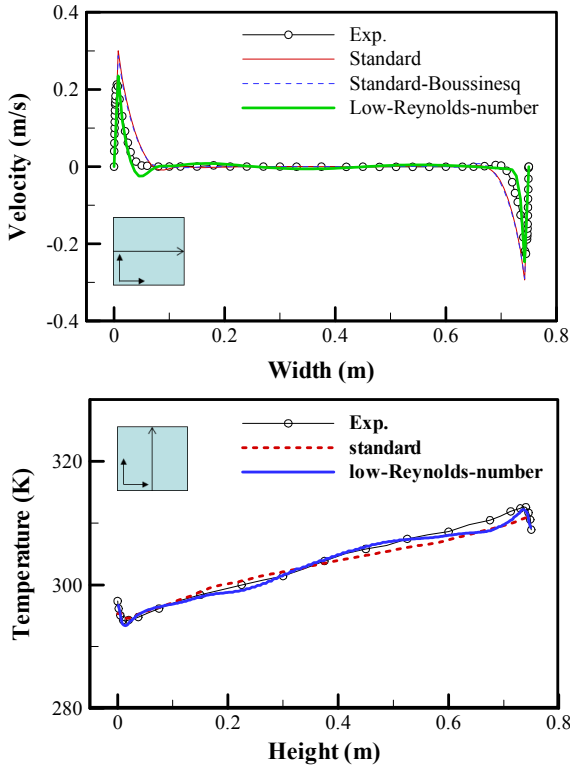


Fig. 6 Comparison with experimental solutions for Case 3 (Turbulence condition,  $Ra = 1.58 \times 10^9$ ).

을 각각 물성치 변화를 가능하게 함으로써 CUPID-Boussinesq 결과가 CUPID-Steam Table 결과에 가장 근접하도록 만드는 인자가 무엇인지 보여준다. 그 인자는 분자점성계수와 열전도도로서 온도장에 직접적으로 영향을 받는 변수이다. 그중에서 분자점성계수는 온도에 반비례하고, 열전도도는 열확산을 결정짓는 변수이므로 정확한 물성치로 계산된 열전도도가 전체 유동장 형성에 중요한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이는 CUPID-Steam Table 결과의 차이를 유발하는 주요 인자이다.

Fig. 6는 Case 3에 대한 난류 자연대류 해석 결과를 Ampofo의 실험결과와 비교한 그림이다. Ampofo의 실험[15]에서 제시된 수평벽면의 정상상태 온도 분포는 CUPID를 이용한 단상 자연대류 해석의 경계조건으로 부과되었다. Fig. 5까지 CUPID-Steam Table의 예측 성능을 확인하였기에 Case 3 (난류)의 경우는 CUPID-Steam Table 버전과 Boussinesq 버전을 이용하여 실험 결과와 비교하였다. 난류 점성계수의 크기는 분자점성계수의 크기에 비해 크기 때문에 난류모델에 대한 영향성이 지배적임을 확인하였다. 벽면에서의 결과 차이는 물성치 조건에 대해 영향이 아닌, 난류모델에 의한 차이로 발생한다. Fig. 6는 간략히 Chien의 low-Reynolds number 모델을 적

용함으로써 상당한 결과 개선이 이루어 짐을 보인다.

### 5. 결론

본 논문에서는 CUPID 코드의 단상 자연대류 예측성능을 검토하기 위해 CUPID 계산결과를 Barakos의 해석결과와, Krane 및 Ampofo의 실험결과와 비교하였다. 해석 결과 물성치 변화를 고려한 CUPID 코드가 적절히 층류와 난류 자연대류 현상을 적절히 모사하고 있음을 확인하였다. 또한, 자연대류 열혼합 현상은 열전도도와 벽면 난류계수의 정확한 예측능력이 중요함을 확인하였다.

### 후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea and the Korea Radiation Safety Foundation grant funded by the Korean government(MSIP & NSSC) (Nuclear Research and Development Program: 2012M2A8A4025647, Nuclear Safety Research Center Program: 1305011).

### Note

This paper is a revised version of the paper presented at the KSCFE 2015 Spring Annual meeting, Jeju, May 15-16, 2015.

### References

- [1] 2014, Yoon, H.Y., Lee, J.R., Kim, H., Park, I.K., Song, C.-H., Cho, H.K. and Jeong, J.J., "Recent Improvements in the CUPID Code for a Multi-Dimensional Two-Phase Flow Analysis of Nuclear Reactor Components," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.46, No.5, pp.655-666.
- [2] 2010, Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Park, I.K., Cho, H.K. and Lee, H.D., "Development and Preliminary Assessment of a Three-Dimensional Thermal Hydraulics Code, CUPID," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.42, pp.279-296.
- [3] 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.
- [4] 2010, U.S. Nuclear Regulatory Commission, *RELAP5/Mod 3.3 code manual Vol. IV: Models and Correlations*.
- [5] 2008, U.S. Nuclear Regulatory Commission, *TRACE V5.0*

- theory manual: Fields equations, solution methods, and physical models.*
- [6] 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, pp.1611-1642.
- [7] 1990, Barre, F. and Bernard, M., "The CATHARE code strategy and assessment," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.124, pp.257-284.
- [8] 1972, Jones, W.P. and Launder, B.E., "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.15, pp.301-314.
- [9] 1980, Rodi, W., "Turbulence models and their application in hydraulics, a state of the art review," *Int. Ass. For Hydraulic Research*, Delft, The Netherlands.
- [10] 2005, Lahey, R.T., "The Simulation of Multidimensional Multiphase Flows," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.235, pp.1043-1060.
- [11] 1997, Kataoka, I. and Serizawa, A., "Analysis of Turbulence Structure of Gas-Liquid Two-phase Flow under Forced Convective Subcooling Boiling," *Proceeding of the 2nd Japanese-German Symposium on Multi-phase Flow*, Tokyo, Japan.
- [12] 1982, Chien, K.Y., "Predictions of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulence Model," *ALAA Journal*, Vol.20, No.1, pp.33-38.
- [13] 1994, Barakos, G., Mitsoulis, E. and Assimacopoulos, D., "Natural Convection Flow in a Square Cavity Revisited: Laminar and Turbulent Models with Wall Functions," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.18, pp.695-719.
- [14] 1983, Krane, R.J. and Jessee, J., "Some Detailed Field Measurements for a Natural Convection Flow in a Vertical Square Enclosure," *Proceeding of the 1st ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol.1, pp.323-329.
- [15] 2003, Ampofó, F. and Karayiannis, T.G., "Experimental Benchmark Data for Turbulent Natural Convection in an Air Filled Square Cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, pp.3551-3572.
- [16] 2013, Park, I.K., Chun, K.H., "Verification of Turbulence and Non-Drag Interfacial Force Models of a Computational Multi-Fluid Dynamics Code," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.18, No.2, pp.99-108.