

## 원자로 기기 열수력 해석 코드에서 붕소 수송 방정식의 구현

박 익 규,\* 이 승 욱, 윤 한 영

한국원자력연구원 열수력안전연구부

### THE IMPLEMENTATION OF BORON TRANSPORT EQUATION INTO A REACTOR COMPONENT ANALYSIS CODE

Ik Kyu Park,\* Seung Wook Lee and Han Young Yoon

Thermal Hydraulics Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

*The boron transport model has been implemented into the CUPID code to simulate the boron transport phenomena of the PWR. The boron concentration conservation was confirmed through a simulation of a conceptual boron transport problem in which water with a constant inlet boron concentration injected into an inlet of the 2-dimensional vertical flow tube. The step wise boron transport problem showed that the numerical diffusion of the boron concentration can be reduced by the second order convection scheme. In order to assess the adaptability of the developed boron transport model to the realistic situation, the ROCOM test was simulated by using the CUPID implemented with the boron transportation.*

**Key Words :** 붕소 농도(Boron Concentration), 붕소 수송(Boron Transport), 2차 대류항(Second Order Convection), CUPID 코드(CUPID Code)

#### 기호설명(Nomenclature)

알파벳

- $C$  : 비례 상수 혹은 붕소 농도
- $d$  : 기포 직경[m]
- $e$  : 내부 에너지[J/kg]
- $g$  : 중력 가속도[m/s<sup>2</sup>]
- $I$  : 계면 열전달률[J/m<sup>3</sup>/s]
- $k$  : 난류운동에너지[ m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> ]
- $M$  : 상간 운동량 전달률[kg/m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- $u$  : 속도[m/s]
- $P$  : 압력[Pa] 혹은 난류에너지생성[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]
- $q$  : 열전도율[J/m<sup>2</sup>/s]
- $Q''$  : 체적열전달률

- $S$  : 표면적[m<sup>2</sup>]
- $t$  : 시간[s]
- $V$  : 부피[m<sup>3</sup>]
- $x$  : x 방향 좌표[m]

그리스문자

- $\alpha$  : 부피 분율[-]
- $\rho$  : 밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- $\Gamma$  : 계면 질량 전달률[kg/m<sup>3</sup>/s]
- $\kappa$  : Von Karman 상수
- $\sigma$  : 난류 Prandtl 수[-]
- $\epsilon$  : 난류에너지소산
- $\Psi$  : 체적 유량[m<sup>3</sup>/s]
- $\tau$  : 전단 응력[kg/m/s<sup>2</sup>]
- $\Omega$  : 상간 질량 전달률[kg/m<sup>3</sup>/s]

Received: August 14, 2013, Revised: November 4, 2013,

Accepted: November 4, 2013.

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

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.4.053>

© KSCFE 2013

위첨자

- $n$  : 이전 시간 단계
- $n+1$  : 새 시간 단계

아래첨자

$b$	: 기포
$B$	: 붕소
$d$	: 포획 액상(액적)
$eff$	: 유효
$f$	: 포화수 또는 격자면
$g$	: 기상
$i$	: 계산 격자
$k$	: k-상( $g, l, d$ )
$l$	: 연속액상
$T$	: 난류
$x$	: x 방향
$y$	: y 방향
$z$	: z 방향

## 1. 서 론

한국원자력연구원에서는 원자로의 주요 기기에서 발생하는 물/증기 혼합체 이상유동(two-phase flows) 해석을 위해 원자로 기기 열수력 해석코드 CUPID (Component Unstructured Program for Interfacial Dynamics)를 개발하였다[1-3]. CUPID 코드의 개발은 원자로 계통 안전해석 코드만으로는 대응하기 어려운 원전의 안전현안을 해결하기 위한 목적으로 시작하였다[4]. 따라서 이러한 목적에 맞게 복잡한 다차원 현상을 해석할 수 있도록 비정렬격자기반 유한체적법을 사용한다. 또한 다차원 2상 유동해석을 위해 과도 상태, 3차원, 2 유체, 3장 모델을 사용한다.

원자로 안전해석은 노심동특성과 열수력 현상이 복합적으로 관련되고, 또한 기기 내부 다차원 열수력현상이 계통의 1차원 열수력 현상과 연결된다. CUPID 코드는 이러한 노심동특성 혹은 1차원 열수력 현상과 연계하여 원자로 기기안전해석을 수행하기 위하여 노심동특성 코드 MASTER 및 1차원 계통 열수력 코드 MARS와 연계 계산 능력을 가져야 한다 [5,6]. CUPID코드를 노심동특성과 관련된 계산에 활용하기 위해서 붕소농도 계산 능력은 필수적이다.

붕소는 중성자 흡수 단면적이 커서 원자로심의 반응도를 제어하는데 사용된다. 붕산수를 원자로 냉각수로서 사용하는 이유는 원자로심의 연소도에 따라 장기 반응도를 제어하는데 있다. 안전 해석 측면에서 붕소 농도가 문제가 되는 것은 냉각수 상실 사고나 주증기관 파단 사고에서 고붕소농도의 비상 노심 냉각수가 주입될 때이다. 이때 고농도의 붕산수와 냉각수와의 혼합 정도가 문제가 된다. 본 논문에서는 CUPID 코드의 붕소 수송 모델을 소개하고 확인 계산 결과 및 원자로에서 유동혼합 모사실험인 ROCOM 실험에의 적용을 기술하

였다. 붕소는 액상(liquid phase)에 용해되어 전파되는데 이때 붕소는 평균적인 액체의 거동에 동반하는 것으로 간주하여 모델링하였다. 분자단위의 붕소 확산(diffusion)은 생략하였는데, 이것은 대류 현상이 활발한 원자로 조건을 고려한 것이다.

2장에서는 붕소 수송 방정식 및 이산화 방정식을 기술하였다. 붕소 수송 방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화하였고, 외재적인 방법을 사용하여 붕소 농도를 계산하였다. 3장에서는 2장의 붕소 수송 지배 방정식 및 이산화 방정식을 토대로 CUPID 코드에 구현한 붕소 수송 모델의 확인 계산 및 실제 적용 계산을 수행하였다. 일정 붕소 농도 입구 조건 문제를 사용하여 붕소 농도의 보존성을 확인하였다. 계산식 붕소 농도 입구 조건을 활용하여 붕소의 수송 및 수치확산을 확인한 뒤, 2차 정확도 대류항의 효과를 시험하였다. 또한, 냉각수 혼합현상을 모의한 ROCOM TEST1 계산을 통하여 붕소 농도 수송 모델의 실제 적용 계산을 수행하였다.

## 2. 붕소 수송 모델

### 2.1 CUPID 코드 지배 방정식

CUPID 코드는 Isshi and Hibiki[7]가 유도한 시간 평균 2유체 모델과 유사한 2유체 3장 모델을 채택하고 있다. 여기서 3장은 연속액상, 기상, 액적을 나타낸다. k 상에 대하여 질량, 운동량, 에너지 방정식은 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) \\ = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha \nabla (\mu + \mu_T) \underline{u}_k] + \alpha_k \rho_k \underline{g} \\ + M_k^{mass} + M_k^{drag} + M_k^{VM} + M_k^{ndrag} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k e_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k e_k \underline{u}_k) \\ = \nabla \cdot (\alpha_k \underline{q}_k) - P \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k - P \nabla \cdot (\alpha_k \underline{u}_k) + I_k + Q_k''' \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\alpha_k, \rho_k, \underline{u}_k, P, \Gamma_k, I_k$ 는 각각 k 상의 부피 분율, 밀도, 속도, 압력, 계면 질량 전달률, 계면 에너지 전달률을 나타낸다.

난류 유동을 모의하기 위하여 연속 액상에 대해서  $k-\epsilon$  난류 모델을 구현하였다[8]. 2상 유동에서 연속 액상의 유효 점성도는 액상의 분자 점성도, 난류 점성도, 기포 요동 효과의 합이다. 분산 기상에 대해서는 동점성도(kinematic viscosity)

가 액상과 기상에 대해서 각각 같다는 가정을 사용하였다.

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_{l,T} + \mu_{b,T} \tag{4}$$

$$\mu_{l,T} = C_\mu \rho_l \frac{k_l^2}{\epsilon_l} \tag{5}$$

$$\mu_{b,T} = 0.6 d_b \alpha_g |u_g - u_l| \tag{6}$$

$$\mu_{g,eff} = \mu_{l,eff} \frac{\rho_g}{\rho_l} \tag{7}$$

연속액상에 대한  $k-\epsilon$  수송 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l k_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l k_l \underline{u}_l) \\ &= \nabla \cdot \left[ \alpha_l \nabla \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right)_l \nabla k_l \right] + \alpha_l P_k - \alpha_l \rho_l \epsilon_l \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_l \rho_l \epsilon_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \epsilon_l \underline{u}_l) \\ &= \nabla \cdot \left[ \alpha_l \nabla \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right)_l \nabla \epsilon_l \right] + \frac{\alpha_l \epsilon_l}{k_l} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho_l \epsilon_l) \end{aligned} \tag{9}$$

$$P_k = \mu_l (\nabla \underline{u}_l + \nabla^T \underline{u}_l) : \nabla \underline{u}_l \tag{10}$$

여기서 표준  $k-\epsilon$  모델에서  $C_\mu, \sigma_\epsilon, \sigma_k, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ 는 각각 0.09, 1.3, 1.0, 1.44, 1.92이다.

CUPID 코드에서 벽함수는 Launder and Spalding[9]의 방법을 사용하였고, 벽면속도에 대한 로그 관계식은 다음과 같다.

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} (C y^+) = \frac{1}{\kappa} \ln \left( C \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu} \right) \tag{11}$$

여기서  $u^+, u_\tau, U_t, y^+, \kappa, C$ 는 각각 무차원 속도, 벽면 마찰 속도, 벽면에서  $\Delta y$  떨어진 곳에서 벽면 접선방향 속도, 무차원 벽면 거리, von Karman constant 그리고 벽면 거칠기에 따른 상수이다.

### 2.2 붕소 수송 방정식

서론에서 언급한 바와 같이 붕소는 액상(liquid phase)에 용해되어 전파되는데, 분자단위의 확산(diffusion)을 고려하지 않고 단지 평균적인 액체의 속도와 동일한 속도로 이송되는 것으로 간주하여 모델링한다. 그런데, CUPID 코드에서 다차원 2상 유동을 모의하기 위해 과도 상태, 3차원, 2유체, 3장 모델을 사용하고 있으므로, 붕소는 연속 액체 및 액적에 균일하게

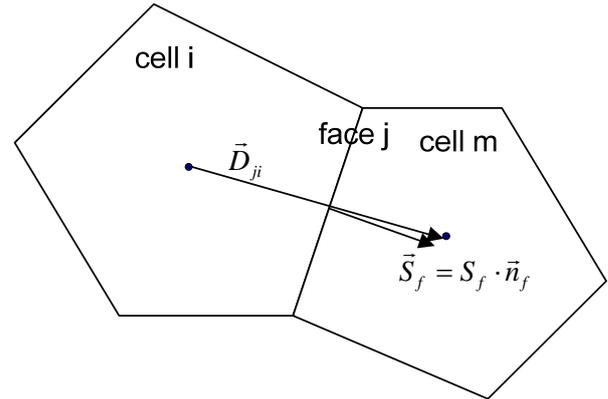


Fig. 1 Control volume for discretization

용해되어 용매와 같은 속도로 이송된다고 가정한다. 이와 함께 다음과 같은 3가지 가정을 추가적으로 사용한다. (1) 붕소의 용해에 따른 물의 물성치 변화는 무시해도 될 만큼 작다. (2) 용해된 붕소에 의해 수송되는 에너지는 무시해도 될 만큼 작다. (3) 용해된 붕소의 운동량은 무시해도 될 만큼 작다.

이와 같은 가정을 쓰면 용해된 붕소가 석출되는 경우 등의 극단적인 상황을 모의할 수는 없다. 위의 가정을 전제로 붕소 수송 지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha_g) \rho_l C_B] + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l C_B \underline{u}_l) \\ & + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_l C_B \underline{u}_d) = 0 \end{aligned} \tag{12}$$

여기에서  $C_B = (\text{붕소질량})/(\text{물의 질량})$ 이다. 붕소의 존재로 인한 운동량 및 에너지의 변화는 없다고 가정하였으므로 운동량 및 에너지 보존방정식의 변화는 없다. 따라서, 식 (12)만 이 기존의 2유체 3장 모델에 추가되며, 이때 새로운 변수  $C_B$ 가 새로 추가된다.

### 2.3 붕소 수송 방정식 이산화

붕소 수송 모델에 유한 체적법(finite volume method)을 적용하여 이산화(discretization)하였다. Fig. 1은 CUPID 코드의 지배방정식의 이산화를 위한 제어체적을 나타낸다.

식 (12)를 격자 i에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha_g) \rho_l C_B] + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l C_B \underline{u}_l) + \nabla \cdot (\alpha_d \rho_l C_B \underline{u}_d) \right\} dV = 0 \tag{13}$$

식 (13)의 좌변 첫 항을 다음과 같이 이산화한다.

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha_g)\rho_l C_B] dV = \left\{ [(1-\alpha_g)\rho_l C_B]^{n+1} - [(1-\alpha_g)\rho_l C_B]^n \right\} \frac{V_i}{\delta t} \quad (14)$$

식 (13)의 대류항을 다음과 같이 이산화한다.

$$\int_V \{ \nabla \cdot (\alpha_i \rho_l C_B \vec{u}_i) \} dV = \sum_f (\alpha_i^n \rho_l^n C_B^m \vec{u}_i^{n+1}) \cdot \vec{S}_f \quad (15)$$

$$\int_V \{ \nabla \cdot (\alpha_d \rho_d C_B \vec{u}_d) \} dV = \sum_f (\alpha_d^n \rho_d^n C_B^m \vec{u}_d^{n+1}) \cdot \vec{S}_f \quad (16)$$

식 (14)~(16)으로부터 붕소수송모델의 이산화 방정식은 다음과 같이 나타난다.

$$\left\{ [(1-\alpha_g)\rho_l C_B]^{n+1} - [(1-\alpha_g)\rho_l C_B]^n \right\} \frac{V_i}{\delta t} = \sum_f (\alpha_i^n \rho_l^n C_B^m \vec{u}_i^{n+1}) \cdot \vec{S}_f + \sum_f (\alpha_d^n \rho_d^n C_B^m \vec{u}_d^{n+1}) \cdot \vec{S}_f \quad (17)$$

CUPID 코드에서 식 (17)을 2유체 3장 모델의 지배 방정식을 한 시간 단계를 풀고 난 다음에 마지막으로 처리한다. 이 경우, 식 (17)에서 붕소농도  $C_B^{n+1}$ 를 제외한 모든 변수는 이미 계산된 값이므로, 식 (17)은 외제적인 방법으로 해가 구해진다.

$$C_B = \frac{\left\{ \sum_f (\alpha_i^n \rho_l^n C_B^m \vec{u}_i^{n+1}) \cdot \vec{S}_f + \sum_f (\alpha_d^n \rho_d^n C_B^m \vec{u}_d^{n+1}) \cdot \vec{S}_f \right\} + [(1-\alpha_g)\rho_l C_B]^n V_i / \delta t}{[(1-\alpha_g)\rho_l C_B]^{n+1}} \quad (18)$$

식 (18)에서 기포율이 1에 근접하면, 앞 절의 물리적인 가정이 더 이상 유효하지 않으므로 식 (18) 또한 물리적 의미를 상실한다. 이 경우에는 오류 메시지를 출력하되 붕소농도는 전 단계의 값을 그대로 쓰기로 한다. 한편, 식 (18)의 대류항에서 격자 면에서 정의되는 값은 1차 혹은 2차 상류 도식을 써서 구한다.

CUPID 코드에서는 연속 방정식의 대류항을 다음과 같이 적분한다. 연속 방정식의 대류량은 n단계의 밀도와 부피 분율을 사용하여 계산하고, 대류 속도는 압력 수정을 거친 후 구

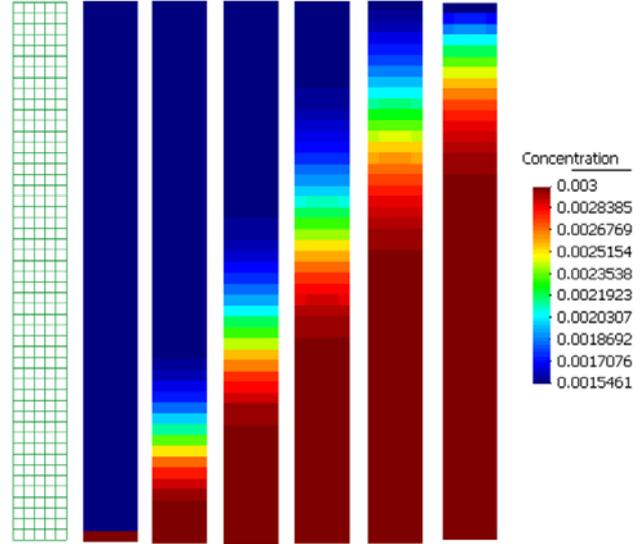


Fig. 2 Calculation Grid and time dependent boron concentration contours (0, 5, 10, 15, 20, 25 s)

한 n+1 체적 유량을 사용하여 계산한다. 붕소 수송방정식의 대류항도 연속 방정식의 대류항을 구하는 것과 유사하게 대류량은 n단계의 밀도, 부피분율, 붕소 농도를 사용하여 계산하고, 대류 속도는 압력 수정을 거친 후 구한 n+1단계의 체적 유량을 사용하여 계산한다.

$$\sum_f (\alpha_i^n \rho_l^n C_B^m \vec{u}_i^{n+1}) \cdot \vec{S}_f = \sum_f (\alpha_i^n \rho_l^n C_B^m)_f (\psi_i)_f^{n+1} \quad (19)$$

$$\sum_f (\alpha_d^n \rho_d^n C_B^m \vec{u}_d^{n+1}) \cdot \vec{S}_f = \sum_f (\alpha_d^n \rho_d^n C_B^m)_f (\psi_d)_f^{n+1} \quad (20)$$

또한 대류항 계산에 있어서 내부 격자셀, 입구 격자셀, 출구 격자셀, 벽면 격자셀의 조건에 따라서 경계조건을 부여한다.

### 3. 검증 계산 및 응용 계산

#### 3.1 붕소 수송 모델 검증 계산

##### 3.1.1 검증 계산 격자 조건

0.5 m × 5 m의 2차원 단상 유동을 상정하였다. 이때 난류 모델은 사용하지 않았다. 격자는 Fig. 2와 같이 5 × 50 (=250)개로 하였다. 유로의 아랫변은 입구, 윗변은 출구, 두 옆변은 벽이다. 유로의 입구로부터 각각 거리가 0.5 m, 2.5 m, 4.5 m인 곳에서 붕소 농도를 출력하여 분석에 활용하였다.

##### 3.1.2 입구조건 문제

일정 붕소농도 입구조건하에서 입구의 붕소농도 및 출구의

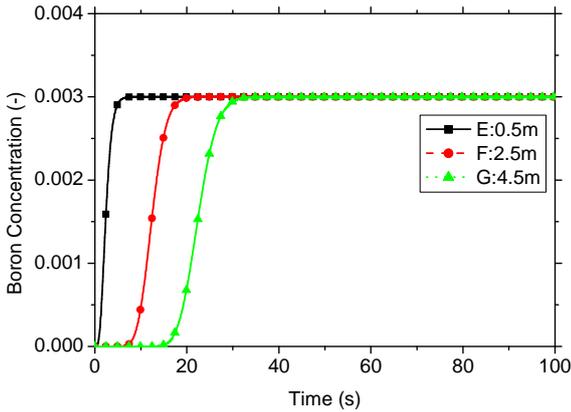


Fig. 3 Boron concentration at three positions

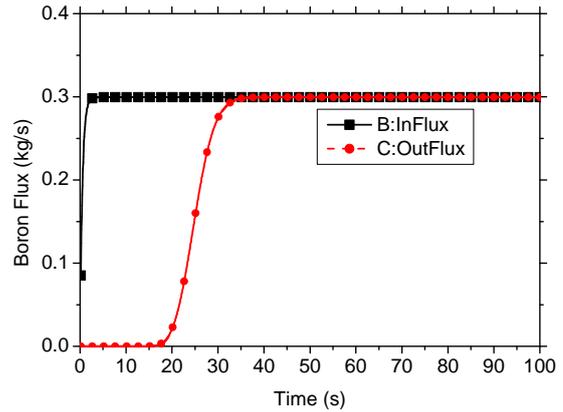


Fig. 5 Boron mass fluxes at inlet and exit

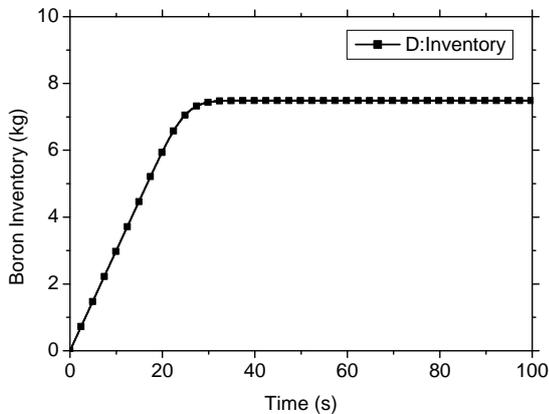


Fig. 4 Time dependent boron inventory

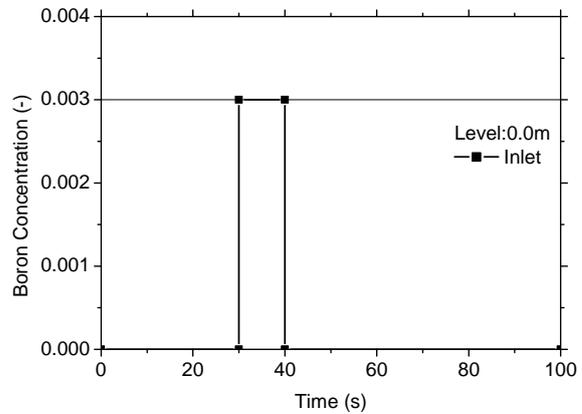


Fig. 6 Stepwise boron inlet concentration

붕소농도가 같은지를 비교하기 위하여 0.003 (3000 ppm)의 붕소를 0.2 m/s의 냉각수에 실려 보냈다. Fig. 2와 같이 붕소 농도는 0.2 m/s 속도의 냉각수의 유동에 맞추어 증가하였다. Fig. 3에는 0.5 m, 2.5 m, 4.5 m에서 붕소농도의 변화를 제시하였다. Fig. 3에서 붕소농도는 0 ppm에서 입구조건인 3000 ppm까지 증가하였다.

Fig. 4에는 유로 내부에 존재하는 붕소의 질량을 시간에 따라 제시하였다. 붕소의 질량은 0초의 0 kg에서 30초의 7.5 kg까지 증가하였다. 30초 이후에는 입구로 들어오는 붕소량과 출구에서 나가는 붕소량이 평형을 이루어 유로 내부의 붕소 질량이 일정하다.

Fig. 5에는 일정 붕소농도 입구조건 문제에서 입구와 출구의 붕소 유량을 제시하였다. 계산이 시작된 0초에서 입구의 붕소 유입량은 급격히 증가하여 0.3 kg/s에 이르렀으나, 출구의 붕소 유출량은 아직 입구의 영향이 미치지 않아서 0 kg/s을 유지하고 있다. 계산이 시작된 후 20초가 지나면 출구의 붕소 유출량이 나타나기 시작해 30초에 이르면 입구의 붕소

유입량과 동일한 0.3 kg/s에 이르렀다. 계산 시간 100초에 입구와 출구에서 붕소 유입량 및 붕소 유출량은 각각 0.299496811242212와 0.299496811256347로 소수 11자리까지 일치하였다. 입구와 출구에서 붕소 유량의 오차는  $4.7 \times 10^{-9}\%$ 이다.

Fig. 3에서 입구의 붕소 농도를 상수 형태로 부여하였음에도 붕소의 농도가 확산되어 전진하는 것을 볼 수 있다. 이것은 수치 확산으로 보여지는데 다음 절에서 2차 정확도 계산을 통하여 붕소 농도의 수치 확산 문제를 논하고자 한다.

3.1.3 대류항 2차 정확도 기법 시험

Fig. 2와 같은 유로에서 입구의 붕소농도를 0초부터 30초까지는 0 ppm을 유지하였다가 30초에서 40초까지 10초간 0.003 (3000 ppm)을 유지한 다음 40초부터는 다시 0을 유지하는, 시간적으로 보았을 때 사각형인 붕소 농도 입구 조건을 활용하여 2차 정확도가 수치 확산을 줄일 수 있는지 시험을 하였다. Fig. 6에는 이와 같은 붕소농도의 입구조건을 제시하였다.

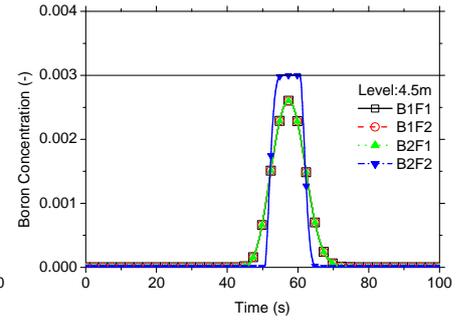
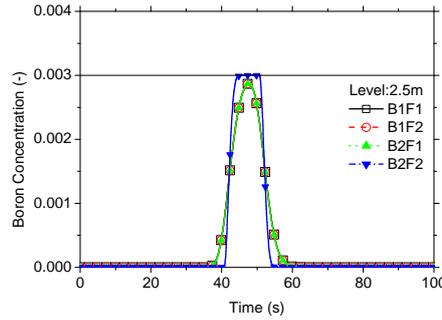
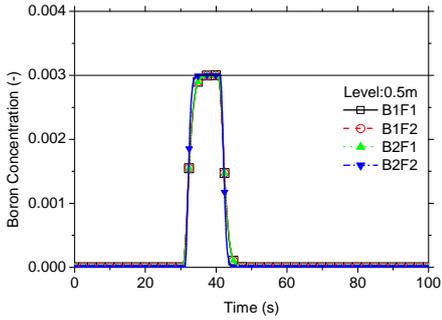


Fig. 7 Boron concentration at 0.5-m elevation Fig. 8 Boron concentration at 2.5-m elevation Fig. 9 Boron concentration at 4.5-m elevation

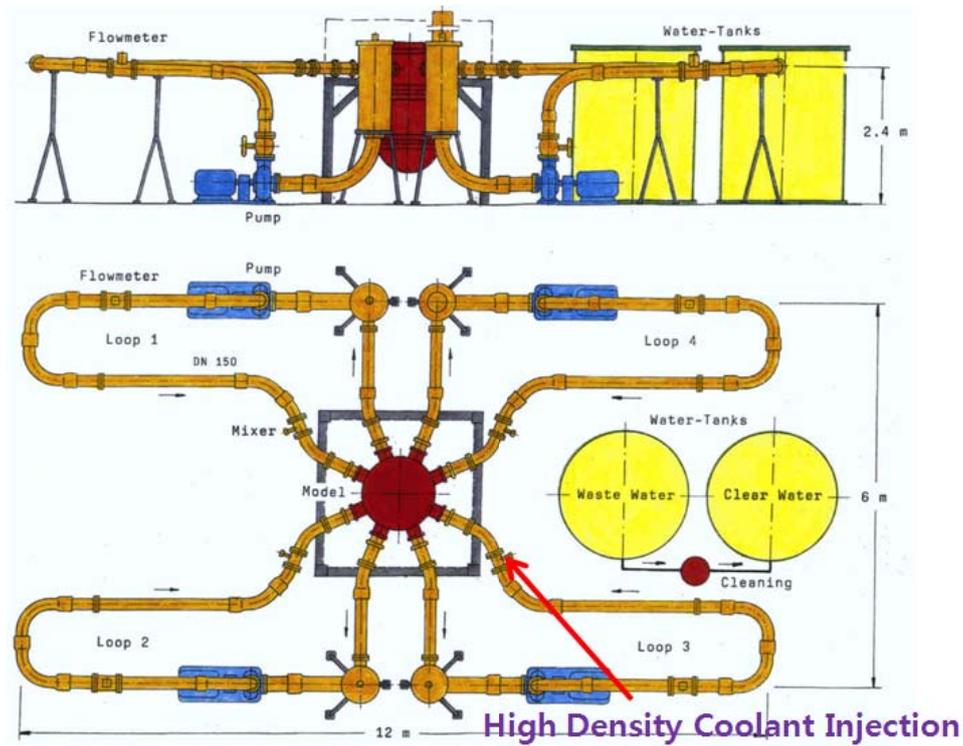


Fig. 10 ROCOM test facility[10]

Table 1과 같이 붕소수송모델과 유동방정식에 대해서 1차 정확도와 2차 정확도의 4가지 계산을 수행하였다. Fig. 7~9에는 높이 0.5 m, 2.5 m, 4.5 m에서 4가지 계산에 대한 붕소농도를 제시하였다. 이 그림들의 범례에서 BxBy는 x차 정확도 붕소방정식과 y차 정확도 일반 유동 방정식을 의미한다. 4가지 계산 모두 붕소의 수송 속도는 일치하였다. 그러나 B2F2

계산, 즉 붕소 방정식 및 유동 방정식이 모두 2차 정확도일 때 수치확산은 다른 계산들에 비해 현저히 줄었다.

### 3.2 붕소수송모델의 응용문제

#### 3.2.1 ROCOM 실험 소개

Fig. 10에는 ROCOM 실험 장치 개략도가 제시되어 있다. ROCOM 실험장치는 4 순환루프를 갖는 원자로 압력용기를 모사한 것이다[10]. 원자로 압력용기는 상반구가 없고 평평하게 처리되었다. 각 순환루프는 펌프에 의해서 작동한다. 정상운전을 모사할 때 4 순환 루프의 유량은 거의 일정하게 유지된다. 실제 원전에서는 2차측의 증기발생기 배관에 파단이 일어나면 해당 1차측 루프에서 냉각이 심하게 발생한다. 이러한

Table 1 Calculation set for second order convection scheme test

Calculation number	Accuracy of convective terms	
	Boron convection	Flow convection
CASE 1	1 <sup>st</sup> order	1 <sup>st</sup> order
CASE 2	1 <sup>st</sup> order	2 <sup>nd</sup> order
CASE 3	2 <sup>nd</sup> order	1 <sup>st</sup> order
CASE 4	2 <sup>nd</sup> order	2 <sup>nd</sup> order

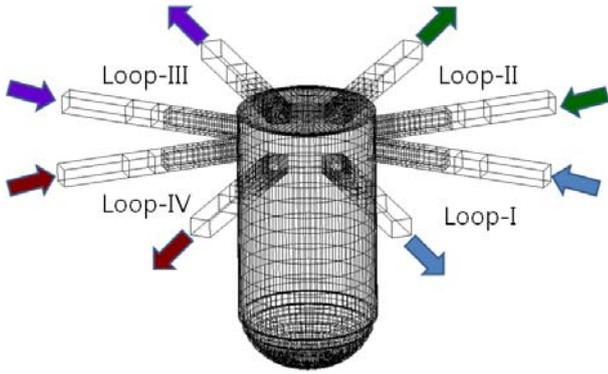


Fig. 11 37068 cells from ROCOM vessel with 0.5 m legs

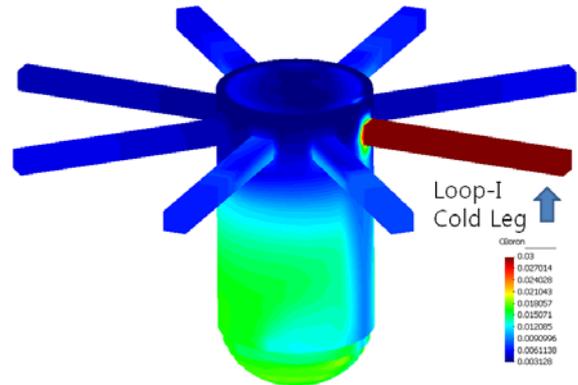


Fig. 12 Boron concentration distribution at ROCOM vessel (time=180 s)

상황을 모사하기 위해서 펌프를 정지한 후 다른 3개의 순환 루프에 비해 고전해질 냉각수를 4배의 유량으로 밀어 넣는다. 이때 고전해질의 냉각수가 저전해질의 냉각수와 혼합된 정도를 강수부 내벽과 외벽 그리고 노심의 입구에서 전기전도도로 측정한다. 그리고, 이 전기전도도 값을 궁극적으로 온도로 환산하여 냉각수의 열적 혼합 현상을 모사하였다. Table 2 에는 온도로 환산된 저온관 유량 및 저온관 온도를 ROCOM-TEST1에 대해 제시하였다.

3.2.2. ROCOM 실험 계산

Fig. 11에는 ROCOM 원자로 모사 용기를 수치적으로 모의 하기 위한 3차원 격자를 제시하였다. ROCOM 용기의 길이는 2 m이고 외경은 1 m이다. Fig. 11에서 화살표는 유동 방향을 나타내고, 로마 숫자 I, II, III, IV는 각각 저온관과 고온관이 한 쌍인 순환루프를 나타낸다. ROCOM 실험에서는 각 순환 루프에 펌프를 설치하여 저온관으로 냉각수를 밀어 넣고 고온관으로 냉각수를 뽑아낸다. ROCOM 실험장치의 펌프와 배관 부분과 펌프는 ROCOM 용기의 저온관과 고온관의 경계조건으로 처리하였다.

Table 2와 같이 저온관은 유동 경계조건으로 하였고, 고온관은 압력 경계조건으로 처리하였다. II, III, IV번 순환루프의 저온관 입구의 유량은  $1.62 \times 10^{-3} m^3/s$ 고, I번 순환루프 저온관의 유량은 이것의 4배인  $6.27 \times 10^{-3} m^3/s$ 이다. 저온관 입구의 온도 및 물성치는 각 순환루프의 고온관 출구의 값을 사용하였다. 고온관 출구에는 압력경계를 사용하였기 때문에 각 저온관으로 유입되는 유량만큼 각 고온관으로 유출되도록

맞추기 어렵다. 따라서, 각 고온관의 경계 압력 값을 각 저온관의 입구 유량만큼 유출 유량이 되도록 매 계산 간격마다 미세 조정하였다. 본 계산에서는  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였다.

계산은 처음 0초부터 100초까지는 II, III, IV번의 순환루프만을 유량  $1.62 \times 10^{-3} m^3/s$ 로 순환시켜 정상상태에 도달시킨다. 100초부터는 I번 루프의 유량을 다른 순환루프의 유량의 4배를 순환시키되 I번 저온관으로는 저온의 고봉소 냉각수를 유입시키고 I번 고온관으로는 I번 저온관으로 유입되는 양만큼의 물을 순환루프 외부로 배출시킨다. 그리고 190초가 되면 I번의 저온관 및 고온관을 정지시키고 250초까지 II, III, IV번의 순환루프 유량만을 유지한 상태로 계산을 한 뒤 계산을 마친다.

Fig. 12에는 전체 해석 영역에서 붕소 농도 분포를 제시하였다. 이 분포도를 보면 붕소는 강수부에서부터 혼합되고 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 고농도의 붕소수가 다른 저온관보다 4배의 유량을 가진 오른쪽 하단의 저온관을 통해서 들어오기 때문이다. 즉, 비대칭으로 인해 강수부에서 혼합현상이 활발한 것으로 판단된다.

Fig. 13과 Fig. 14에서는 노심 입구에서 계산시간 173초부터 180초 사이에 평균한 붕소 농도 분포를 ROCOM 실험에서 획득한 전기 전도도 분포를 활용하여 변환한 온도분포와 비교하였다. 계산된 붕소 농도의 분포가 I번 저온관 쪽에서는 높지만, 그 옆쪽에서는 낮으며 오히려 I번 저온관의 반대쪽에서 높아지는 것이 실험에서 측정된 온도 분포와 유사하다.

Table 2 Boundary conditions of ROCOM TEST1

Loop	I	II	III	IV
Flow rate in cold legs ( $\times 10^{-3} m^3/s$ )	6.27	1.62	1.62	1.62
Temperature in cold legs (K)	426	509	509	509
Boron concentration in cold legs (ppm)	0.03	0.003	0.003	0.003
Pressure in hot legs (bar)	38	38	38	38

4. 결 론

본 연구에서는 가압경수로의 붕소 농도를 모사하기 위하여 붕소 수송 모델을 원자로 기기열수력 해석코드인 CUPID에 이식하였다. 붕소는 연속 액체 및 액체에 균일하게 용해되어

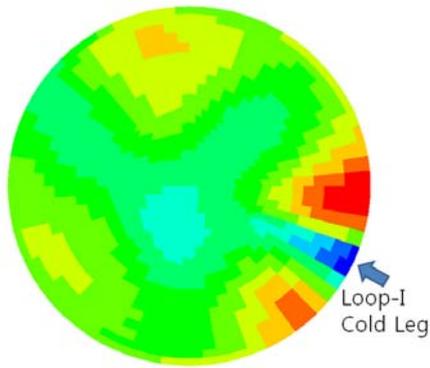


Fig. 13 Calculated boron concentration at core inlet (time=173~183 s)

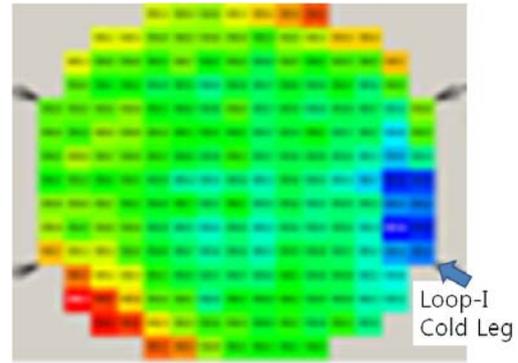


Fig. 14 Measured temperature distribution at core inlet (time=173~183 s)

용매와 같은 속도로 이송된다고 가정하였다. CUPID 코드에서 사용하는 비정렬 격자 기반 유한체적법을 붕소수송방정식에 적용하여 외재적인 방법으로 붕소농도를 계산하였다.

개발된 붕소수송방정식은 일정 붕소농도 입구조건 문제를 통하여 붕소의 입구와 출구에서 농도가 동일함을 확인하였다. 또한 시간상 사각형의 붕소농도 입구조건 문제를 통하여 수치 확산을 대류항에 대한 2차 정확도 기법으로 완화할 수 있음을 확인하였다.

이렇게 개발된 붕소 수송 모델을 바탕으로 ROCOM 냉각수 혼합 실험을 바탕으로 응용계산을 수행하였다. 계산된 붕소 농도 분포를 ROCOM 실험에서 측정된 냉각수의 온도 분포와 비교하였다. 전체적인 혼합 거동은 실험 결과와 유사하나 정밀한 계산을 위해서는 격자 수 및 난류 모델에 대한 추가적인 계산이 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부 및 원자력안전위원회)의 재원으로 한국연구재단 및 한국방사선안전재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구개발사업 No. 2012M2A8A4025647, 원자력안전연구센터사업).

## References

[1] 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(3), pp.279-296.  
 [2] 2010, Jeong, J.J., Yoon, H.Y., Park, I.K. and Cho, H.K., "The CUPID Code Development and Assessment Strategy,"

*Nuclear Engineering and Technology*, Vol.42(6), pp.636-655.  
 [3] 2012, Yoon, H.Y., Cho, H.K., Lee, J.R., Park, I.K. and Jeong, J.J., "Multi-Scale Thermal-Hydraulic Analysis of PWRs using the CUPID Code," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.44(8), pp.831-846.  
 [4] 2006, Yun, B.J., Euh, D.H. 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.  
 [5] 2012, Lee, J.R., Cho, H.K., Yoon, H.Y. and Jeong, J.J., "Coupled Simulation of the Reactor Core using CUPID/MASTER," *Proceedings of ICAPP '12 Chicago*, Paper 12099, USA.  
 [6] 2013, Park, I.K., Lee, J.R., Lee, S.W., Yoon, H.Y. and Jeong, J.J., "An Implicit Code Coupling of 1-D System Code and 3-D In-house CFD Code for Multi-scaled Simulations of Nuclear Reactor Transients," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.59, pp.80-91.  
 [7] 2006, Isshii, M. and Hibiki, T., *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, Springer, Chapter 12, pp.155-169.  
 [8] 2013, Park, I.K. and Chun, K.H., "Verification of Turbulence and Non-drag Interfacial Force Modles of a Computational Multi-Fluid Dynamics Code," *J. Comput. Fluids Eng.*, Vol.18(2), pp.99-108.  
 [9] 1974, Launder, B.E. and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3(2), pp. 269-289.  
 [10] Kliem, S. and Franz, R., Quick-look Report of the ROCOM Tests 1.1 and 1.2 Conducted within the OECD PKL2 Project, Institutsbericht FZD\FWS\2010\07.