

과도 다차원 2상 유동 해석을 위한 비정렬 격자계에서의 Semi-Implicit 수치 해법 개발

조형규[†] · 박익규 · 윤한영 · 김종태 · 정재준

한국원자력연구원

(2008년 7월 17일 접수, 2008년 11월 6일 수정, 2008년 11월 6일 채택)

The Semi-Implicit Numerical Scheme for Transient Two-Phase Flows on Unstructured Grids

H. K. Cho[†], I. K. Park, H. Y. Yoon, J. Kim, J. J. Jeong

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 20 July 2008, Revised 6 November 2008, Accepted 6 November 2008)

요 약

가압 경수로의 주요 기기에서 발생할 수 있는 과도 2상 유동(Two-phase flow) 현상에 대한 해석을 수행하기 위해 원자로 기기 열수력 해석 코드를 개발 중에 있다. 개발 중인 기기 열수력 해석 코드는 지배 방정식으로 Two-phase, three-field model을 사용하고 있으며, 복잡한 기하학적 형상의 원자로 기기를 모사하기 위해 비정렬 격자계(Unstructured grid)를 활용하고 있다. 수치해석 기법으로는, 원자로 계통 해석코드 RELAP5가 사용 중이며 대부분의 원자로 내 2상 유동 조건에서 안정적이며 정확하다고 알려진 Semi-implicit 방법을 적용하였다. 그러나 기존의 Semi-implicit 방법은 1차원, 엇갈림격자(Staggered grid)에 대해 개발되었기 때문에, 이를 다차원, 비정렬, 비엇갈림 격자(Non-staggered grid)에 적용하기 위해 기존의 Semi-implicit 방법을 수정하였다. 본 논문에서는 수정된 Semi-implicit 방법을 소개하고 이를 이용해 수행한 예비 계산결과를 수록하였다.

주요어 : 원자로 열수력, 2상유동, 반내재적 기법, 비정렬 격자계

Abstract — A component-scale two-phase analysis code has been developed for a realistic simulation of two-phase flow transients in a light water nuclear reactor component. In the code, a two-fluid three-field model is adopted and the governing equations are solved on an unstructured mesh. For the numerical solution scheme, the semi-implicit method used in the RELAP5 code was selected, which has been proved to be very stable and accurate for most of practical applications. However, some modifications were needed for its application to an unstructured non-staggered grid. This paper presents the modified semi-implicit numerical method for unstructured grid and the preliminary results of the calculations.

Key words : Nuclear thermal hydraulics, Two-phase flow, Semi-implicit scheme, Unstructured meshes

1. 서 론

전통적으로 원자력 발전소의 안전성 평가는 1차원 2상 유동 모델에 기반을 둔 계통 분석 코드로 수행해왔다. 그러나 원자력 안전성의 최적 평가 및 피동 안전성 개념을

도입한 신형 원자로의 개발 등에 따라 열수력 거동의 사실적 평가가 중요해지고, 결과적으로 다차원 2상 유동 해석의 필요성이 자연스럽게 부각되었다⁽¹⁻⁵⁾. 이와 같은 맥락에서 대다수의 최신 계통 분석 코드는 다차원 2상 유동 해석 기능을 구비하고 있다. TRAC-PFI⁽⁶⁾, CATHARE 2⁽⁷⁾, MARS⁽⁸⁾, RELAP5-3D⁽⁹⁾ 등은 3차원 2상 유동 해석 모듈을 보유하고 있다. 그런데, 이들 3차원 열수력 모듈은 공통적으로 직교 좌표계나 원통형 좌표계에 기반을 둔

[†]To whom correspondence should be addressed
1045, Daeduk-daero, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-353
E-mail : hkcho@kaeri.re.kr

정렬 격자를 쓰며, 사용할 수 있는 격자수가 수백~수천 개 내외로 제한적이기 때문에 원자로 등과 같이 복잡한 기기 내부의 유체 거동을 정확하게 모의하기에는 본질적인 한계가 있다. 한편, 기존의 전산 유체역학 코드들을 원자력 안전성 평가에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되었으나, 이들의 2상 유동 계산 기술은 계통 분석 코드에 비해 아직 뒤떨어져 원자로 안전해석에 직접 활용하기에는 어려움이 있다⁽¹⁰⁾. 특히, 원자로 계통과 같은 대형 유체 계통에서 발생하는 긴 시나리오의 과도현상을 모의할 경우에는 많은 계산 비용이 필요하기 때문에, 당분간 전산 유체역학 코드가 기존의 안전해석 코드의 기능을 직접 대체하기에는 어려울 것으로 보고되었다⁽⁴⁾.

이와 같은 배경과 한계에 의거하여, 다중 스케일 해석 개념이 점차 부각되고 있다^(11,12). 다중 스케일 열수력 해석이란, 아래와 같은 세 개의 길이 스케일을 이용한 해석들을 상호 보완하여 좀 더 정교한 열수력 해석을 수행함을 의미한다.

- (1) 계통 스케일 계산 : 1차원 계통 분석 코드를 이용한 해석을 의미하며, 일반적으로 격자의 길이가 $\sim 10^0$ m 정도이다.
- (2) 기기 스케일 계산 : 3차원 기기 열수력 코드를 이용한 해석을 의미하며, 일반적으로 격자의 길이가 $\sim 10^2 - \sim 10^1$ m 정도이다.
- (3) 국소 스케일 계산: 전산 유체역학 코드를 이용한 해석을 의미하며, 격자의 길이는 $\sim 10^3 - \sim 10^2$ m 정도이나 유동 상태에 따라 이 보다 더 작거나 큰 경우도 있다.

하위 스케일 계산에서는 상세한 유동 정보를 상위 스케일 계산에 공급할 수 있고, 그 반대로 상위 스케일 계산에서는 경계 조건 등을 하위 스케일 계산에 공급할 수 있어 서로 상보적인 역할을 할 수 있다.

다중 스케일 계산 체계 구축을 위해서는 다차원 과도 2상 유동 해석 체계 수립이 필수적이다. 현재 계통 스케일의 과도 2상 유동 해석 기술은 성숙한 단계에 이르렀으나, 1차원적 접근이라는 본질적 한계를 갖고 있다. 이에 반해, 기기 및 국소 스케일의 2상 유동 해석 기술은 계통 스케일의 2상 유동 해석 기술에 비해 상대적으로 낙후되어 있다. 즉, 수치해의 정확도 등에서는 우위에 있으나 복잡한 유동 상황 및 상변화 (Phase change) 등에 대한 수치적 강건성(Robustness)은 상대적으로 뒤떨어져 있다고 할 수 있다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 다차원 과도 2상 유동 해석을 위한 기기 해석 코드를 개발하고자 한다. 그 일환으로 Two-fluid, three-field model에 기존의 Semi-implicit

방법을 개선하여 적용하였다. 본 논문에서는 다차원 과도 2상 유동 해석을 위한 비정렬 격자계에서의 Semi-implicit 방법 개발 및 예비 평가 결과에 관해 논한다.

2. 지배 방정식

본 연구에서는 과도 2상 유동 현상을 해석하기 위해 지배 방정식으로 Two-phase, three-field model을 사용하고 있다. 여기서 Two-phase란 기체 및 액체, Three-field란 기체, 연속 액체 및 액적을 의미한다. 유동 특성이 상이한 연속 액체와 액적의 유동을 독립적으로 고려함으로써, 냉각재 상실사고 등에서 발생하는 원자로 내 2상 유동 현상을 좀 더 정밀하게 계산할 수 있다는 장점이 있다.

2.1 Three-field model의 보존 방정식

Two-phase, three-field model에서는 질량, 에너지 및 운동량 방정식을 각 상 (기체, 연속 액체, 액적)에 대해 독립적으로 수립한 후, 계면 전달항 (Interfacial transfer term)을 통해 각 상 간의 질량, 에너지 및 운동량 교환을 모델링한다. 즉, 3 개의 질량 방정식, 3 개의 에너지 방정식 그리고 3차원 유동에 대해 총 9 개의 운동량 방정식으로 구성된다. 이때, 본 연구에서는 연속 액체와 액적의 열적 평형 (Thermal equilibrium)을 가정하여 2 개의 에너지 방정식만을 사용하였다. 이는 대부분의 원자로 2상 유동 조건에 부합하는 가정으로 원자로 열수력 해석코드인 COBRA-TF에도 적용된 가정이다⁽¹³⁾.

k 상의 질량 방정식은 다음과 같다.

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

여기서 k : 기체(g), 연속액체(l) 또는 액적(d),

$$\Omega_g = \Gamma_g,$$

$$\Omega_l = -(1-\eta)\Gamma_g - S_E + S_{DE},$$

$$\Omega_d = -\eta\Gamma_g + S_E - S_{DE},$$

$$\eta = \alpha_d / (\alpha_l + \alpha_d).$$

k 상의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{u}_k \underline{u}_k) \\ & = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\underline{\tau}_k + \underline{\tau}_k^T)] + \alpha_k \rho_k \underline{g} + \underline{M}_{ik}. \end{aligned} \quad (2)$$

기체와 액체의 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g e_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g e_g \underline{u}_g) = E_g^D - P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - P \nabla \cdot (\alpha_g \underline{u}_g) + Q_{ig} - Q_{gl}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial((1-\alpha_g)\rho_l e_l)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d)\rho_l e_l] \\ & = E_l^D - P \frac{\partial(1-\alpha_g)}{\partial t} - P \nabla \cdot (\alpha_l \underline{u}_l + \alpha_d \underline{u}_d) + Q_{il} + Q_{gl}. \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 계면 전달항

질량 방정식의 계면 전달항에는 상변화항 (Γ_g)을 포함하고 있다. 상변화항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_g = -\frac{H_{ig}(T_{sat} - T_g) + H_{il}(T_{sat} - T_l)}{h_g - h_l}. \quad (5)$$

운동량 방정식의 계면 운동량 전달항은 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{M}_{ig} = F_{gl}(\underline{u}_l - \underline{u}_g) + F_{gd}(\underline{u}_d - \underline{u}_g) + \Gamma_g \underline{u}_{gl}, \quad (6)$$

$$\underline{M}_{il} = F_{gl}(\underline{u}_g - \underline{u}_l) - (1-\eta)\Gamma_g \underline{u}_{il} - S_E \underline{u}_l + S_{DE} \underline{u}_d, \quad (7)$$

$$\underline{M}_{id} = F_{gd}(\underline{u}_g - \underline{u}_d) - \eta\Gamma_g \underline{u}_{di} + S_E \underline{u}_l - S_{DE} \underline{u}_d, \quad (8)$$

여기서 \underline{u}_{ki} : 계면 속도, 상변화 이전 상의 속도 사용.
 에너지 방정식에 나타나는 계면 에너지 전달항은 Q_{ig} , Q_{il} 및 Q_{id} 이다. 여기서 Q_{ig} , Q_{il} 은 상변화가 존재하는 물-증기 유동을 계산할 때, Q_{gl} 은 상변화가 없는 2상 유동, 즉 물-공기 유동을 모의할 때 사용된다. 각 항은 아래와 같이 표현된다.

$$Q_{ig} = H_{ig}(T_{sat} - T_g) + \Gamma_g h_g, \quad (9)$$

$$Q_{il} = H_{ig}(T_{sat} - T_l) - \Gamma_g h_l, \quad (10)$$

$$Q_{id} = H_{gl}(T_g - T_l). \quad (11)$$

한편, 식 (5)~(11)의 계면 전달항을 닫힌 문제로 만들기 위해서는 H_{ig} , H_{il} , H_{gl} , F_{gl} , F_{gd} , S_E , S_{DE} 등의 항들에 대한 구성 방정식이 요구된다. 이 항들은 2상 유동 양상 (Flow regime)에 따라 변하는 경험적 상관식들로서, 수치해석 방법론을 시험하기 위해 이들을 유동양식에 상관 없는 아래와 같은 형태의 단순 모델로 대입하여 계산을 수행하였다.

$$A = a \cdot \alpha_l \cdot \alpha_g$$

여기서, a : 상수 (마찰계수인 경우 12,000, 계면열전달인 경우 10^7)

2.3 상태 방정식

본 연구의 Semi-implicit 방법은 5개의 스칼라 변수 (α_g , α_d , e_g , e_l , P)를 독립 상태 변수 (Independent state variable)로 다루며, 상태 방정식을 통해 각 상의 온도 및 밀도, 그리고 포화 온도를 계산한다.

$$\rho_k = \rho_k(P, e_k),$$

$$T_k = T_k(P, e_k),$$

$$T_{sat} = T_{sat}(P).$$

3. 비정렬 격자를 사용한 Semi-implicit 방법

RELAP5 코드에서 사용 중인 Semi-implicit 방법은 1차 정확도 상류 차분법 (First order upwind scheme), 엇갈림 격자를 사용한 유한차분 방법 (Finite-difference method)을 채택하였다. 본 논문에서는 이러한 기존의 방법을 유한체적 방법 (Finite volume method)으로 수정하고, 이를 비정렬 격자에 적용하였다. 또한 비엇갈림 격자를 사용하여, 모든 독립 상태 변수 및 속도들이 셀 중심에서 정의된다. 그림 1은 비정렬 격자의 예를 제시한 그림으로서, c1, c2 및 c3는 셀 c0의 이웃한 셀을, \underline{S}_f 는 면 f 의 면적 벡터, dr_{01} 는 셀 c0와 이웃한 셀의 중심 간 거리 벡터를 의미한다.

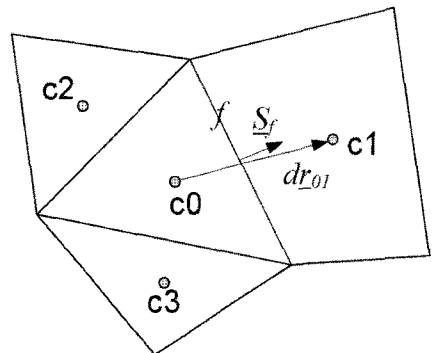


그림 1. 제어체적 형상

3.1 중간 단계 속도 계산 (Intermediate velocity, \underline{u}^{exp})

Semi-implicit 방법의 첫 단계는 운동량방정식을 풀어 중간 단계 속도를 계산하는 것이다. 이를 위해 식 (2)의 운동량 방정식을 비보존형으로 전개한다.

$$\alpha_k \rho_k \frac{\partial \underline{u}_k}{\partial t} + \alpha_k \rho_k \nabla \cdot (\underline{u}_k \underline{u}_k) - \alpha_k \rho_k \underline{u}_k \nabla \cdot \underline{u}_k = -\alpha_k \nabla P + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_k^T)] + \alpha_k \rho_k \underline{g} + \underline{M}_{ik} - \underline{u}_k \Omega_k \quad (12)$$

이 식을 제어체적에 대해 적분하고 이산화하면, 각 방향에 대해 3개의 연립방정식을 얻을 수 있다. 이때, 운동량 방정식의 대류항 및 압력 구배 항은 외재적 (Explicit)으로, 계면 운동량 전달항은 내재적 (Implicit)으로 다룬다. 연립 방정식을 풀면 각 상에 대해 중간 단계 속도를 얻을 수 있다.

$$\underline{u}_{k,c0}^{exp} = \underline{\gamma}_{k,c0}^n + \beta_{k,c0} \nabla p_{c0}^n \quad (13)$$

한편, 새로운 시간 단계의 속도는 새로운 시간 단계의 압력강하로 표현할 수 있다.

$$\underline{u}_{k,c0}^{n+1} = \underline{\gamma}_{k,c0}^n + \beta_{k,c0} \nabla p_{c0}^{n+1} \quad (14)$$

식 (13) 및 (14)으로부터 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$\underline{u}_{k,c0}^{n+1} = \underline{u}_{k,c0}^{exp} + \beta_{k,c0} \nabla \hat{p}_{c0} \quad (15)$$

여기서 $\hat{p}_{c0} (= p_{c0}^{n+1} - p_{c0}^n)$: 압력수정 (pressure correction).

3.2 셀 면에서의 속도 (Cell face velocity)

Semi-implicit 방법은 질량 및 에너지 방정식의 대류항에 나타나는 속도를 내재적 방법으로 다루기 때문에, 이 방정식들의 해를 얻기 위해서는 셀 면에서의 내재적 속도 ($\underline{u}_{k,f}^{n+1}$)에 대한 관계식이 요구된다. 이는 식 (15)를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \underline{u}_{k,f}^{n+1} &= \underline{u}_{k,f}^{exp} + [\xi \beta_{k,c0} + (1 - \xi) \beta_{k,c1}] \frac{(\hat{p}_{c1} - \hat{p}_{c0})}{|d_{L01}|} \underline{n}_f \\ &= \underline{u}_{k,f}^{exp} + \beta_{k,f} \frac{(\hat{p}_{c1} - \hat{p}_{c0})}{|d_{L01}|} \underline{n}_f \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $\underline{u}_{k,f}^{exp}$ 는 앞서 계산된 중간 단계 속도를 식 (17)

과 같이 내삽하여 얻는다.

$$\underline{u}_{k,f}^{exp} = \xi \underline{u}_{k,c0}^{exp} + (1 - \xi) \underline{u}_{k,c1}^{exp} \quad (17)$$

식 (16)은 셀 면에서의 내재적 속도를 주변 셀의 압력으로 표현한 것으로서, 양변에 면적 벡터를 내적하여 식 (18)과 같이 셀 면에서의 체적유량 (volume flow rate, $\Psi_{k,f}^{n+1}$)을 얻는다.

$$\Psi_{k,f}^{n+1} = \Psi_{k,f}^{exp} + \beta_{k,f} \frac{\hat{p}_{c1} - \hat{p}_{c0}}{|d_{L01}|} \underline{n}_f \cdot \underline{S}_f \quad (18)$$

여기서 $\Psi_{k,f} = \underline{u}_{k,f} \cdot \underline{S}_f$.

한편, 식 (15)~(17)로 부터 식 (19)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{u}_{k,f}^{n+1} &= \xi \underline{u}_{k,c0}^{n+1} + (1 - \xi) \underline{u}_{k,c1}^{n+1} + \beta_{k,f} \frac{\hat{p}_{c1} - \hat{p}_{c0}}{|d_{L01}|} \underline{n}_f \\ &\quad - \xi \beta_{k,c0} \nabla \hat{p}_{c0} - (1 - \xi) \beta_{k,c1} \nabla \hat{p}_{c1} \end{aligned} \quad (19)$$

이 식은 비엇갈림 격자 사용 시 발생할 수 있는 압력 진동을 막기 위해 Rhie and Chow⁽¹⁴⁾가 제안한 내삽 방법과 동일한 의미를 갖는 결과로서, 식 (15) 및 (16)의 계산이 Rhie and Chow 방법의 특성을 고유하게 포함하고 있음을 의미한다.

3.3 질량 방정식 및 에너지 방정식의 이산화

Semi-implicit 방법의 다음 단계는 질량 및 에너지 방정식을 적분, 이산화하고 이를 2-3절에 소개된 바와 같이 독립 상태 변수들 ($\alpha_g, \alpha_d, e_g, e_l, P$)로 선형화하는 것이다. 이산화 시 대류항의 속도, 계면 질량 및 열 전달항은 내재적 방법으로, 그 외의 변수 및 항은 외재적 방법으로 이산화하였다. 이산화된 기체 질량 방정식은 식 (20)과 같으며, 이를 선형화하면 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} &[\alpha_g (\rho_g^{n+1} - \rho_g) + \rho_g (\alpha_g^{n+1} - \alpha_g)] V \delta t^{-1} + \sum_f (\alpha_g \rho_g)_f (\psi_g)_{f_j}^{n+1} \\ &= -\frac{V}{h_g - h_l} [H_{ig} (T_{sat}^{n+1} - T_g^{n+1}) + H_{il} (T_{sat}^{n+1} - T_l^{n+1})] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} V_{c0} \Delta t^{-1} &\left\{ \alpha_g \left[\left(\frac{\partial \rho_g}{\partial P} \right) \delta P + \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial e_g} \right) \delta e_g \right] + \rho_g \delta \alpha_g \right\} + \sum_f (\alpha_g \rho_g)_f (\psi_g)_{f_j}^{n+1} \\ &= -\frac{1}{(h_g - h_l)_{c0}} V_{c0} H_{ig} \left[T_w - T_g + \left(\frac{\partial T_{sat}}{\partial P} \right) \delta P + \left(\frac{\partial T_{sat}}{\partial e_g} \right) \delta e_g - \left(\frac{\partial T_g}{\partial P} \right) \delta P - \left(\frac{\partial T_g}{\partial e_g} \right) \delta e_g \right]_{c0} \\ &\quad - \frac{1}{(h_g - h_l)_{kv}} V_{c0} H_{il} \left[T_{sat} - T_l + \left(\frac{\partial T_{sat}}{\partial P} \right) \delta P + \left(\frac{\partial T_{sat}}{\partial e_g} \right) \delta e_g - \left(\frac{\partial T_l}{\partial P} \right) \delta P - \left(\frac{\partial T_l}{\partial e_l} \right) \delta e_l \right]_{c0} \end{aligned} \quad (21)$$

이와 같은 방법으로 다른 4 개의 스칼라 방정식을 이산화, 선형화 한 후 행렬 형태로 정리하면 식 (22)와 같다.

$$\underline{A}\underline{x} = \underline{s} + \sum_{j=1}^{nb(c0)} \underline{g}\Psi_{v,j}^{n+1} + \sum_{j=1}^{nb(c0)} \underline{l}\Psi_{l,j}^{n+1} + \sum_{j=1}^{nb(c0)} \underline{d}\Psi_{d,j}^{n+1}, \quad (22)$$

여기서 \underline{A} : 5×5 행렬, $\underline{x} = col(\delta\epsilon_g, \delta\epsilon_l, \delta\alpha_g, \delta\alpha_d, \delta P)$, $\underline{s}, \underline{g}, \underline{l}, \underline{d}$: 계수 벡터.

3.4 압력 수정 방정식 및 후치환 (back substitution)

식 (22)의 양변에 \underline{A}^{-1} 을 곱하고 여기에 식 (18)을 대입하여 대류항을 압력 수정에 대한 식으로 치환하면, 스칼라 방정식의 5번째 방정식은 미지수가 셀 $c0$ 및 이에 인접한 셀들의 압력수정 (δP) 뿐인 방정식으로 표현된다. 모든 셀에 대해 이러한 방정식을 도출하여 한데 모으면, N 개의 δP 가 미지수인 압력수정 방정식을 얻을 수 있다. 이때 나타나는 $N \times N$ 행렬의 역행렬을 압력수정 방정식의 양변에 곱하면 모든 셀에 대해 압력수정을 얻을 수 있으며, 식 (16)과 식 (17)을 이용하여 각각 $u_{k,c0}^{n+1}$ 및 $\Psi_{k,f}^{n+1}$ 을 얻을 수 있다. 마지막으로 식 (22)로부터 남아있는 4개의 스칼라 변수들을 후치환 할 수 있다. 이로서 한 시간 단계에서의 계산이 마무리되며, 새로운 시간 단계에 대해 동일한 과정이 반복된다.

4. 예비 평가 계산 결과

수정한 Semi-implicit 방법이 다양한 2상 유동 현상을 적절히 모의할 수 있는지의 여부를 평가하기 위한 예비 계산을 수행하였다. 수행한 계산은 비등 (Boiling), 감압에 의한 기화 현상 (Flashing), 상분리 (Phase separation)

및 물-공기 2상 유동 등을 포함한다. 계산의 주 관점은 수치해법의 강건성과 보존성에 두었으며, 정성적 측면에서 계산 결과의 물리적 타당성을 평가하였다. 앞서 2-2절에 기술한 바와 같이 수치해법을 평가하기 위하여 단순한 물리 모델을 사용하였으며, 이는 추후 보완할 예정이다.

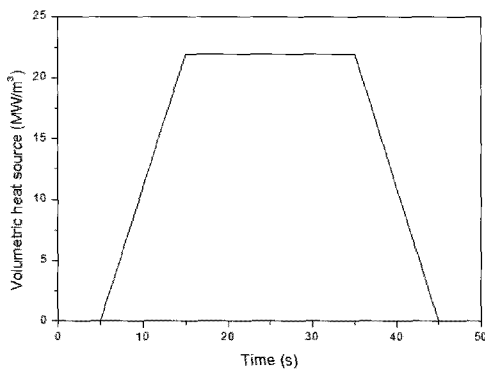
4.1 1차원 수직관 내의 유동 천이 모의

폭 0.1m, 높이 6m의 수직관에 대한 계산으로, 과냉각 액체가 주입되어 위로 흐르며 가열되어, 상변화가 발생하는 현상을 모의하였다. 액체 주입 온도는 450.95K이며, 입구와 출구의 압력은 각각 1.06MPa 및 1.0MPa이다. 그림 2-a와 같이 시간에 따라 체적 열원이 변하는 조건을 적용하였다. 본 계산에는 총 20개의 격자를 사용하였다.

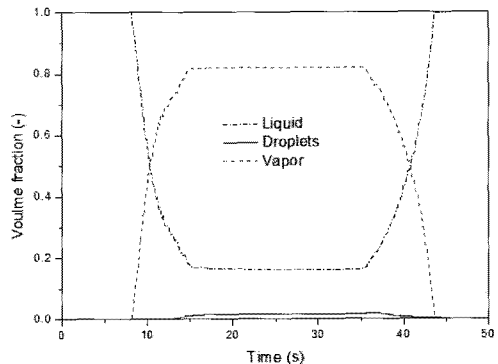
그림 2-b는 출구 셀에서 계산된 기체, 연속 액체 그리고 액적의 체적비를 도시한 그림이다. 약 8초간 단상 액체 유동이 유지되며, 그 후 비등이 발생하여 기체의 체적비가 점차 증가한다. 12초에는 액적이 생성되며, 그 후 세 개의 상이 모두 존재하는 상태로 정상 상태에 도달한다. 35 초부터는 체적 열원이 감소하므로 다시 단상 액체 유동으로 천이되며 계산이 종료된다. 이러한 계산 결과는 넓은 영역의 기포율 변화가 안정적으로 계산되고 있음을 보여준다.

4.2 1차원 수직관 내의 상분리 현상 모의

액체와 기체의 혼합체가 중력에 의해 분리되는 현상을 모의하는 개념문제로서, 개발된 수치해법이 역류유동 (Counter-current flow)을 모의할 수 있는지를 평가하기 위한 계산이다. 폭 0.1m, 높이 2m인 수직관 내에 기체 체적비가 0.5인 물-공기 혼합체가 채워져 있는 초기 조건을 적용하였다. 계산이 시작되면, 밀도 차이에 의해 물은 아래로 하강하며 공기는 위로 상승하는 역류유동이 형성



(a) 시간에 따른 체적 열원의 변화



(b) 출구에서의 각 상의 체적비 계산결과

그림 2. 1차원 수직관 내의 유동 천이 모의의 계산결과

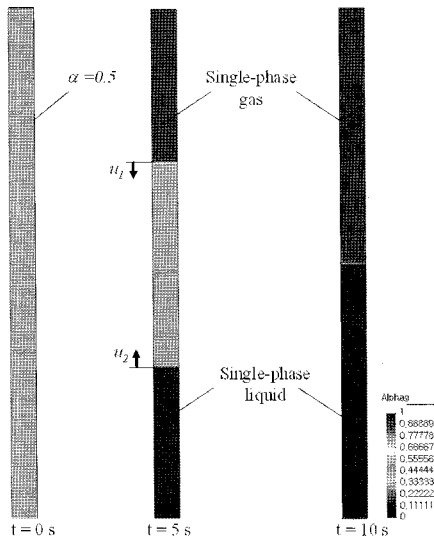
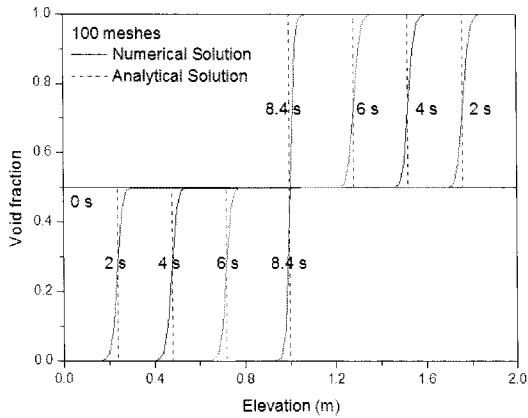
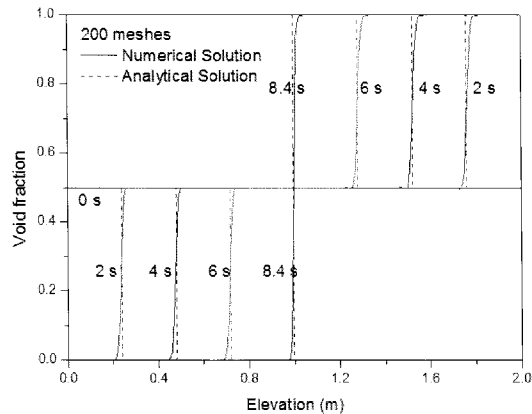


그림 3. 1차원 상분리 계산 결과 (기포율)



(a) 격자수 : 100 개



(b) 격자수 : 200 개

그림 4. 1차원 상분리 계산 결과: 수치해 및 해석해 비교

된다. 이에 따라 물 및 공기와 혼합체간의 경계면이 각각 상승 및 하강하며, 정상상태에 도달하면 수직관 정 중앙에서 물과 공기의 경계가 만나 각 상이 완전히 분리된다. 그림 3은 0초, 5초, 10초일 때의 기포율을 나타낸 계산결과로서, 상분리 과정이 본 연구에서 개발된 수치해법에 의해 안정적으로 모사됨을 확인하였다.

한편, 동일한 계산을 100개 및 200개의 격자를 활용하여 계산하였으며, 기포율 계산 결과를 각각 상분리 문제의 해석해 (Analytical solution)와 비교하였다⁽¹⁵⁾. 격자 크기가 큰 경우 수치 확산이 크게 나타나지만(그림 4-a), 격자 크기가 작아지면서 해석해와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다(그림 4-b).

4.3 2차원 수직관 내의 상분리 현상 모의

4-2절의 상분리 계산을 2차원 수직관에 대해서 수행하였다. 직경 1m, 높이 1m의 수직관에 대해 계산을 수행했으며, 각각 정렬 격자와 비정렬 격자를 사용하여 격자를 생성하였다. 그림 5는 정상 상태에 도달했을 때의 기포율을 나타낸 계산결과로서, 그림 5-c에서 보이는 바와 같이 정렬 격자 및 비정렬 격자에 대해 동일한 결과를 얻었다. 이러한 계산으로부터 제시된 Semi-implicit 방법론이 비정렬 격자에서도 잘 작동함을 확인하였다.

4.4 감압에 의한 기화 (Flashing) 모의

감압에 의한 기화 현상은 원자로의 과도상태 또는 사고 시 매우 중요한 열수력 현상의 하나이다. 이러한 현상을 본 연구의 수치해법으로 모의할 수 있는 지 평가하기 위한 계산을 수행하였다. 폭 0.1m, 길이 2m인 수평관을 250개의 정렬 격자를 이용하여 모의하였다. 입구 액체 속도는 4m/s이며, 입구 온도는 450K이다. 출구 압력은 초기 10초 동안에는 1.0MPa이며 시간에 따라 선형적으로 감소하여 0.854MPa에서 상수로 고정되었다. 1.0MPa 및 0.854MPa에서의 포화 온도는 각각 453.034K 및 446.270K이며, 따라서 입구로 들어오는 액체는 초기에는 과냉 상태이나 계산 후기에는 과열 상태이다. 결과적으로 그림 6과 같이 기화가 발생하여, 2상 유체가 형성되는 것을 볼 수 있다. 이는 정성적으로 타당한 결과로서, 본 수치기법이 기화 현상을 모의할 수 있음을 의미한다.

4.5 3차원 물-공기 2상 유동 모의

2상 유동 현상 연구에 널리 사용되는 물-공기 강제 대류 유동을 본 연구의 수치해석 방법이 안정적으로 모의할 수 있는지를 평가하기 위한 계산을 수행하였다. 지름 1m, 높이 10m인 수직관을 2160개의 프리즘 (Prism) 격자를 이용하여 모의하였다. 입구 유체 속도, 기포율 및

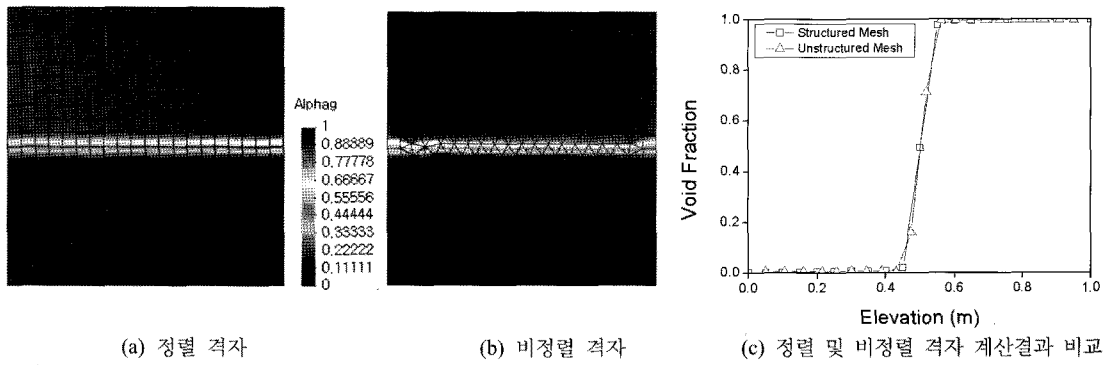


그림 5. 2차원 상분리 계산 결과

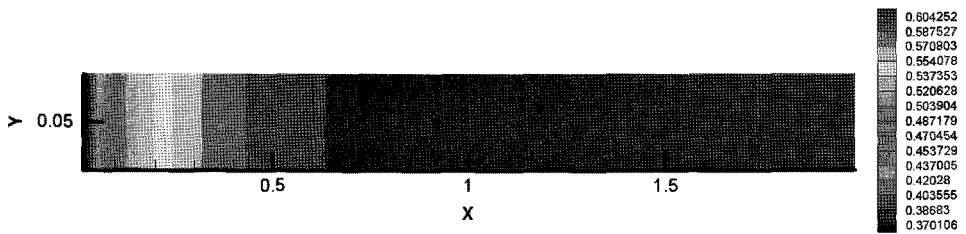
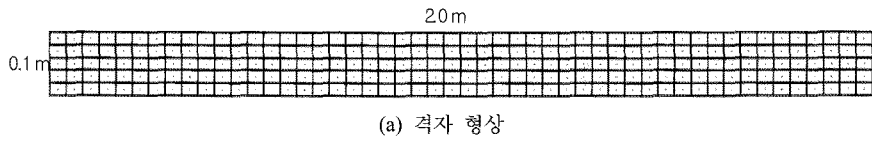


그림 6. 감압에 의한 기화 모의 계산 결과

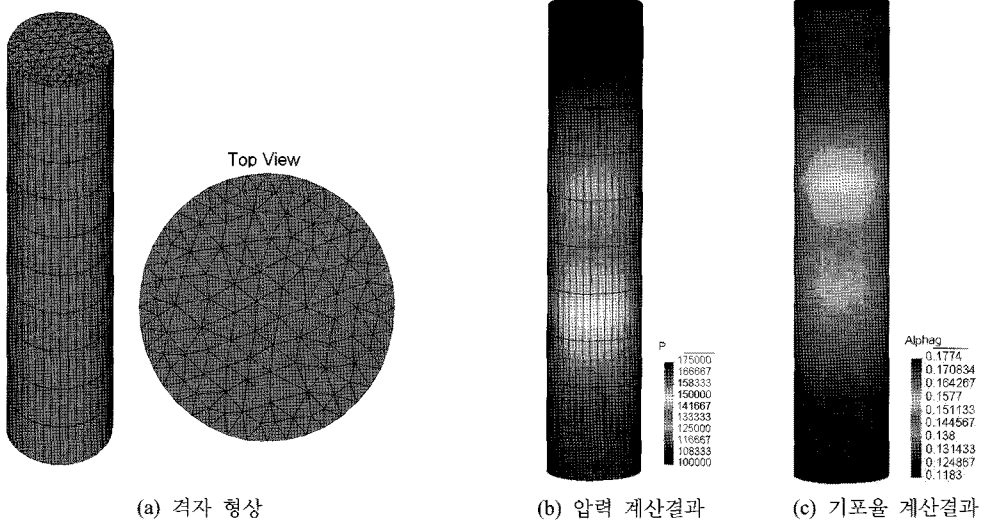


그림 7. 물-공기 2상 유동 해석 결과

온도는 각각 m/s, 0.1 및 303 K이며 출구 압력은 0.1MPa이다. 그림 7은 정상상태 도달 시 압력과 기포율 분포 결과이다. 중력수두의 영향으로 출구 부근의 압력이 입구 압력보다 약 0.08 MPa 정도 작으며(그림 7-b), 압력 감소의 영향으로 공기가 팽창하여 기포율이 상부로 갈수록 커지는 것을 볼 수 있다(그림 7-c). 또한 기포율의 상승으로 부력이 증가하며, 결과적으로 기체속도가 상부로 갈수록 커지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 물리적으로 타당한 결과로서 본 연구의 수치해석 기법이 물-공기 2상 유동 현상을 정성적으로 잘 모의할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

가압 경수형 원자로 열수력 해석을 보다 정확하고 상세하게 하기 위해 기기 열수력 해석 코드를 개발 중에 있다. 개발 중인 코드는 2상 유동 해석을 위해 Two-fluid, three-field 모델을 사용하고 있으며, 수치해석 방법으로 Semi-implicit 방법을 채택하였다. 기존의 Semi-implicit 방법을 개선한 새로운 수치해법을 시험하기 위해 다양한 평가 계산을 수행하였다. 계산결과로부터 본 연구에서 개발한 수치해법이 다양한 2상 유동 현상을 안정적이며 정성적으로 타당하게 해석할 수 있음을 확인하였다.

향후 좀 더 다양한 개념 문제에 대한 해석을 통해 수치해법을 평가 및 개선해 나갈 계획이며, 계면 전달 모델, 난류 모델 등의 물리 모델들을 적용할 예정이다. 그 후 다양한 2상 유동 현상에 대한 체계적인 검증 계산 (Validation)을 수행하고, 수치해법의 정확도 및 계산 효율성을 증가시키기 위한 연구도 병행하여 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 지원하는 원자력연구개발사업의 일환으로 진행되었다.

기 호

A	계면 전달 모델
C	셀
dr	셀 간의 거리 벡터 [m]
e	내부 에너지 [J/kg]
E	에너지 확산항 [W/m^3]
F	계면 운동량 전달 계수 [$kg/s\cdot m^3$]
g	중력 가속도 [m/s^2]
H	계면 열 전달항 [W/K]

M	계면 운동량 전달항 [N/m^3]
n	셀 경계면 직교 벡터
P	압력 [Pa]
Q	체적 열원 [W/m^3]
S	셀 경계면 면적 [m^2]
S_{DE}	액적 소실률 (De-entrainment rate) [kg/s]
S_E	액적 생성률 (Entrainment rate) [kg/s]
t	시간 [s]
u	속도 [m/s]
V	체적 [m^3]

Greek

α	기포율, 기체 체적비
β	계수
γ	생성항 계수
Γ	계면 질량 전달율 [$kg/s\cdot m^3$]
η	액체 중 액적의 체적비
Ψ	체적 유량 [m^3/s]
ρ	밀도 [kg/m^3]
τ	전단력 [Pa]
ξ	거리 가중 함수
Ω	총 질량 전달율 [$kg/s\cdot m^3$]

상첨자

D	확산
exp	중간 단계
n	시간 단계

하첨자

c	셀 번호
d	액적
f	셀 경계면
g	기체
i	계면
k	기체, 연속 액체 또는 액적
l	연속 액체
sat	포화상태

참고문헌

1. Yadigaroglu, G., Andreani, M., Dreier, J. and Coddington, P., 2003. Trends and needs in experimentation and numerical simulation for LWR safety. *Nuclear Engineering and Design*, **221**, pp. 205-223.
2. Scheuerer, M. et al., 2005. Evaluation of computational

- fluid dynamic methods for reactor safety analysis (ECORA). *Nuclear Engineering and Design*, **235**, 359-368.
3. Bestion, D. et al., 2006. Extension of CFD Codes to Two-phase Flow Safety Problems. NEA/SEN/SIN/AMA(2006)2, OECD Nuclear Energy Agency.
 4. Smith, B. L. et al., 2007. Assessment of CFD for Nuclear Reactor Safety Problems. Final for Approval by CSNI, OECD Nuclear Energy Agency.
 5. Anderson, N., Hassan, Y., Schultz, R. 2008. Analysis of the hot gas flow in the outlet plenum of the very high temperature reactor using coupled RELAP5-3D system code and a CFD code. *Nuclear Engineering and Design*, **238**, 274-279.
 6. Liles, D.R. et al., 1988. TRAC-PF1/MOD Correlations and modes, NUREG/CR-5069, LA-11208-MS, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA.
 7. Bestion, D., 1994. General Description of CATHARE2 v1.3, STR/LML/EM/94-265.
 8. Jeong, J.J., Ha, K.S., Chung, B.D. and Lee, W.J., 1999. Development of a multi-dimensional thermal-hydraulic system code, MARS 1.3.1. *Annals of Nuclear Energy*, **26**(18), pp. 1611-1642.
 9. The RELAP5-3D Code Development Team, 2001. RELAP5-3D Code Manual Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
 10. The RELAP5-3D Code Development Team, 2001. RELAP5-3D Code Manual Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory.
 11. Yadigaroglu, G., 2005. Computational fluid dynamics for nuclear applications: From CFD to multi-scale CMFD. *Nuclear Engineering and Design*, **235**(2-4), pp. 153-164.
 12. Guelfi, A. et al., 2007. NEPTUNE: A new software platform for advanced nuclear thermal hydraulics. *Nuclear Science and Engineering*, **156**(3), pp. 281-324.
 13. Yhurgood, M. J. et al., 1983. COBRA/TRAC - A Thermal-Hydraulic code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems, NUREG/CR-3046.
 14. Rhie, C.M. and Chow, W.L., 1983. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA Journal*, **21**(11), pp. 1525-1532.
 15. Staedtke, H., 2006. Gas dynamic aspects of two-phase flow, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim, pp. 143-147.