

CUPID 코드와 MARS 코드를 이용한 기기/계통 다중스케일 연계 해석 코드 구현

박익규*

한국원자력연구원 열수력안전연구부

COMPONENT AND SYSTEM MULTI-SCALE DIRECT-COUPLED CODE IMPLEMENTATION USING CUPID AND MARS CODES

I.K. Park*

Thermal Hydraulics Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

In this study, direct code coupling, in which two codes share a single flow field, was conducted using 3-dimensional high resolution thermal hydraulics code, CUPID and 1-dimensional system analysis code, MARS. This approach provide the merit to use versatile capability of MARS for nuclear power plants and 3-dimensional T/H analysis capability of CUPID. Numerical Method to directly couple CUPID and MARS was described in this paper. The straight flow and manometer flow oscillation were calculated to verify conservation of coupled CUPID/MARS code in mass, momentum, and energy. This verification calculations indicates that the CUPID/MARS is coupled appropriately in numerical aspect and the coupled code can be applied to nuclear reactor thermal hydraulics after validation against integral transient experiments.

Key Words : 다중스케일(Multi-scale), 코드 연계(Code Coupling), CUPID, MARS

기호설명(Nomenclature)

알파벳

- D : 셀중심 사이 거리[m]
- e : 내부 에너지[J/kg]
- n : 셀면 수직 벡터[m]
- u : 속도[m/s]
- P : 압력[Pa]
- S : 표면적[m²]
- t : 시간[s]
- V : 부피[m³] 혹은 속도[m/s]
- x : 스칼라 변수

- X : 비응축성 기체 분율
- w : 거리역 가중치[-]

그리스문자

- a : 부피 분율[-]
- ρ : 밀도[kg/m³]
- ψ : 체적 유량[m³/s]

아래첨자 및 위첨자

- d : 포획 액상(액적)
- f : 포화수 또는 격자면
- g : 기상
- k : k-상(g, l, d)
- l : 연속액상
- n : 이전 시간 단계
- $n+1$: 다음 시간 단계
- NB : 이웃 격자 개수

Received: August 22, 2016, Revised: September 23, 2016,

Accepted: September 23, 2016.

* E-mail: gosu@kaeri.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.3.089>

© KSCFE 2016

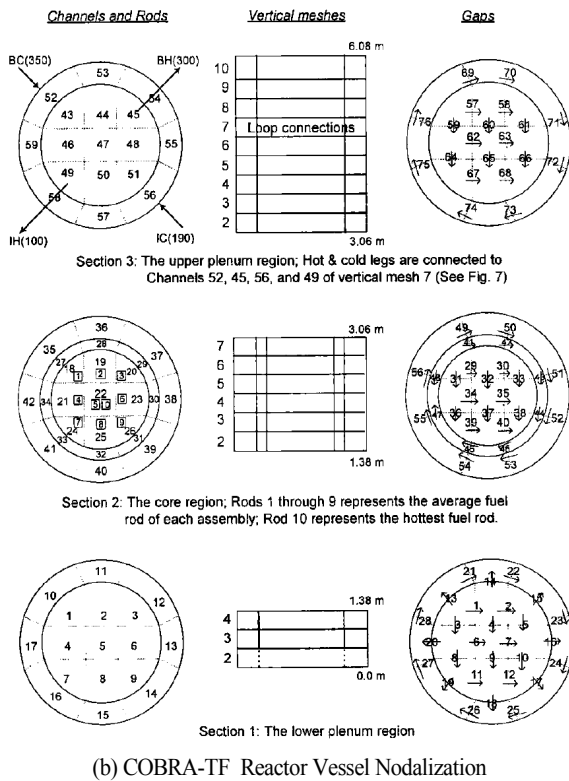
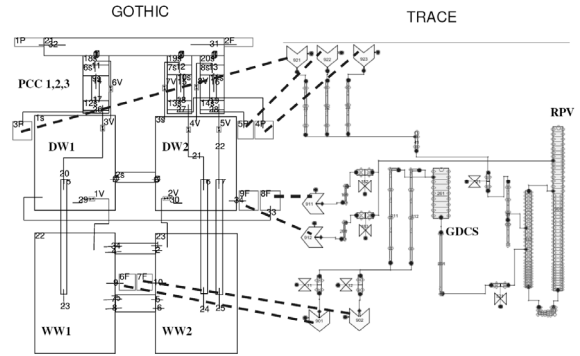
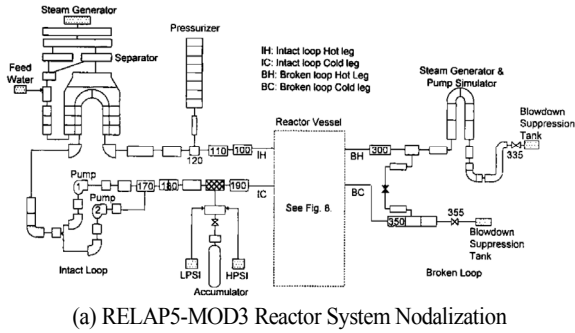


Fig. 1 Nodalization Concept in COBRA/RELAP5 3D/1D Coupled Calculation[1]

1. 서 론

코드 연계를 통한 다중스케일 열수력 해석은 같은 스케일 코드 연계를 통한 열수력 해석에서부터 출발하였다. 같은 스케일 코드의 연계는 스케일은 비슷하지만 서로 다른 열수력적 특성이 있는 코드를 연계하여 각각의 열수력적 특성을 이용하는 자는 취지이다. 원자로시스템의 일부를 다차원으로 해석하거나 아니면 격납용기와 원자로시스템을 연계 계산하려는

Fig. 2 Nodalization Concept of GOTHIC/TRACE 3D/1D Coupled PANDA PCCS Performance Calculation[2]

목적으로 코드 연계를 하였다. 이러한 연계 코드로는 COBRA/RELAP5, RELAP5/COSBWR, RELAP5/CONTAIN, RELAP5/CONTEMT4 등이 있다.

한국원자력연구원에서는 1997년도에 LBLOCA에서 원자로에서 주유동의 수직방향 유동해석을 개선하기 위해 RELAP5에 3차원 해석이 가능한 부수로 해석 코드 COBRA-TF를 연계하였다. Fig. 1에 COBRA/RELAP5를 활용한 LOFT L2-3 실험(LBLOCA 모사 실험)을 해석하기 위한 격자를 제시하였다. Fig. 1(a)는 원자로용기를 제외한 원자로시스템은 1차원적인 격자로 모의하고, 원자로용기는 Fig. 1(b)와 같은 3차원 격자를 이용하였다[1].

최근 2013년도에 스위스의 PSI는 국제 표준 문제 ISP-42, PHASE B문제, 스위스의 PANDA 실험 장치에서 수행한 PCCS(피동 격납건물 냉각 계통)의 성능을 실험을 모사하기 위하여 GOTHIC/TRACE 연계 코드를 활용하였다. Fig. 1-2에서 PANDA의 3차원 격납용기 모사 용기는 GOTHIC이 담당하고 TRACE는 PANDA의 원자로시스템을 담당한다[2].

최근에는 전산기기의 성능의 향상으로 국소 스케일 코드를 계통 코드와 연계하는 연구도 수행되고 있다. 한국원자력연구원에서는 3차원 정밀 열수력 해석 코드인 CUPID를 개발하여 기기스케일 혹은 국소스케일의 원자로 열수력 해석의 기반을 마련하였다.

본 연구에서는 정밀해석코드인 CUPID[3]를 계통코드인 MARS[4]에 연계하여 기기/계통 다중스케일 연계코드를 개발하고, 연계의 수치적 타당성을 검증하기 위하여 수치관 유동과 마노미터 진동 유동의 예제 계산을 수행하였다. 본 논문에서는 2장에서는 CUPID와 MARS의 수치해법을 설명한 다음 CUPID/MARS 직접연계 수치해법을 기술하였다. 3장에서는 CUPID/MARS 직접연계에 대해 수치관 유동 및 마노미터 진동유동 계산을 통하여 질량, 에너지, 운동량 보존 방식의

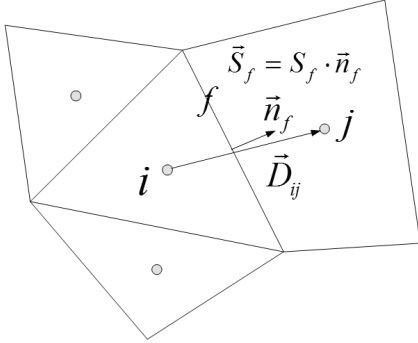


Fig. 3 Mesh Concept of CUPID Code

연계에 대한 타당성을 검토하였다.

2. 지배방정식과 상태방정식

2.1 CUPID 수치 해법[6]

2.1.1 운동량 방정식 적분

CUPID 코드는 셀중심격자법 및 유한체적법을 사용하고 있다. Fig. 3와 같은 격자에서 운동량 방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화한 뒤 정리하면 다음과 같은 벡터 식을 구할 수 있다.

$$u_{k,i}^{n+1} = s_{k,i} + \beta_{k,i} \nabla P_i^{n+1} \tag{1}$$

여기서, s 와 β 는 각각 생성항과 기하학적 비례계수이다. k 는 g, l 이고, i 는 계산격자이다. 한편, 이전단계의 압력구배를 이용하여 중간단계 속도를 구할 수 있다.

$$u_{k,i}^* = s_{k,i} + \beta_{k,i} \nabla P_i^n \tag{2}$$

식 (2)에서 식 (1)을 빼면 다음단계 속도와 압력수정 관계식은 다음과 같다.

$$u_{k,i}^{n+1} = u_{k,i}^* + \beta_{k,i} \nabla \delta P_i \tag{3}$$

식 (3)에 발산연산을 취한 뒤 적분을 하면 $\int_V \nabla \cdot \Phi dV = \int_S \Phi \cdot dS = \sum_f \Phi_f S_f$ 관계를 이용하여 다음과 같이 유량 (volume flux)를 얻는다.

$$\sum_f^{NB} \Psi_{k,f}^{n+1} \cong \sum_f^{NB} \Psi_{k,f}^* + \sum_f^{NB} \beta_{k,f} \frac{\delta P_j - \delta P_i}{D_{ij}} \cdot \frac{n_f}{n_f} S_f \tag{4}$$

여기서, $\beta_{k,f} = [w \beta_{k,i} + (1-w) \beta_{k,j}]$ 이고, i, j, f, NB 계산 격자, 이웃격자, 계산격자와 이웃격자와의 사잇면, 이웃격자 개수이다. 식 (4)의 우변 끝항은 격자면과 거리가 수직하지 않은 경우 근사값이 된다.

2.1.2 질량 및 에너지 방정식 적분

스칼라 방정식을 기체 에너지 방정식, 액체 에너지 방정식, 기체 연속 방정식, 액체 연속 방정식, 액적 연속 방정식, 비응축성기체 연속방정식으로 나열한 다음, 유한체적법으로 이산화하면 각 유한체적에 대해 다음 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{16} \\ r_{61} & r_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta e_g \\ \delta e_l \\ \delta \alpha_g \\ \delta \alpha_l \\ \delta X_n \\ \delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b + \sum_f^{NB} c_{g,f} \Psi_{g,f}^{n+1} \\ c + \sum_f^{NB} c_{l,f} \Psi_{l,f}^{n+1} + \sum_f^{NB} c_{d,f} \Psi_{d,f}^{n+1} \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서, b 와 c 는 각각 생성항과 대류항이다. 식 (5)를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\underline{A}_i x_i = \underline{b}_i + \sum_f^{NB} \sum_k^{g,l,d} c_{k,f} \Psi_{k,f}^{n+1} \tag{6}$$

식 (6)에 역행렬을 곱하고 식 (4)를 적용하면 다음과 같다.

$$x_i = \underline{A}_i^{-1} \underline{b}_i + \sum_f^{NB} \sum_k^{g,l,d} \gamma_{k,f} \left(\Psi_{k,f}^* - \beta_{k,f} \frac{\delta P_j - \delta P_i}{D_{ij}} \cdot \frac{n_f}{n_f} S_f \right) \tag{7}$$

여기서, $\gamma_{k,f} = \underline{A}_i^{-1} c_{k,f}$ 이다. 식 (7)의 6번째 열만을 쓰면 δP_i 와 δP_j (단, j 는 i 의 이웃셀)에 관한 식을 얻을 수 있고 모든 i 대해서 모으면 다음과 같이 크기가 N 인 압력수정행렬을 구할 수 있다.

$$\underline{A}_c \delta P = \underline{b}_c \tag{8}$$

식 (8)에서 압력수정을 구한 뒤에 식 (3), (4), (7)에 대입하면 각각 최신 셀중심 속도, 셀면 유량, 셀중심 스칼라량을 각각 구할 수 있다.

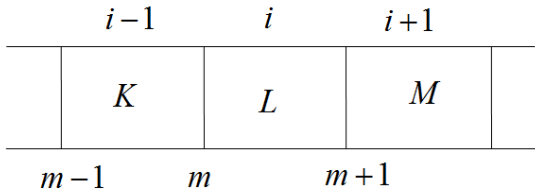


Fig. 4 Node Concept of MARS Code

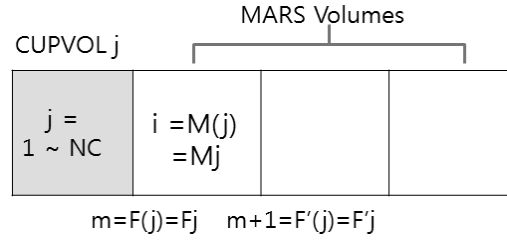


Fig. 5 CUPVOL Concept in MARS Code

2.2. MARS 수치해법[7]

MARS 코드에서는 엇갈림격자와 유한차분법을 사용하고 있다(Fig. 4). 격자면에서 속도와 압력은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$V_{k,m}^{n+1} = \underline{s}_{k,m} + \beta_{k,m}(P_K^{n+1} - P_L^{n+1}) \tag{9}$$

$$V_{k,m}^* = \underline{s}_{k,m} + \beta_{k,m}(P_K^n - P_L^n) \tag{10}$$

식 (9)에서 식 (10)을 빼면 속도와 압력관계식을 얻는다.

$$V_{k,m}^{n+1} - V_{k,m}^* = \beta_{k,m}(\delta P_K - \delta P_L) \tag{11}$$

5개의 스칼라 방정식을 비응축성기체 연속방정식, 기체 에너지 방정식, 액체 에너지 방정식, 기체 연속 방정식, 액체 연속 방정식으로 나열한 다음 차분하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{15} \\ r_{51} & r_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X_n \\ \delta e_g \\ \delta e_l \\ \delta \alpha_g \\ \delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{b} + \underline{c}_{g,m} V_{g,m}^{n+1} + \underline{c}_{l,m} V_{l,m}^{n+1} \\ \underline{c}_{g,m+1} V_{g,m+1}^{n+1} + \underline{c}_{l,m+1} V_{l,m+1}^{n+1} \end{bmatrix} \tag{12}$$

식 (12)는 다음과 같이 행렬 및 벡터로 간단히 할 수 있다.

$$\underline{A}_i x_i = \underline{b}_i + \sum_k (\underline{c}_{k,m} V_{k,m}^{n+1} + \underline{c}_{k,m+1} V_{k,m+1}^{n+1}) \tag{13}$$

식 (13)에 역행렬을 곱하고 식 (11)의 속도와 압력과의 관계식을 사용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} x_i = \underline{A}_i^{-1} \underline{b}_i + \sum_k \gamma_{k,m} [V_{k,m}^* - \beta_{k,m}(\delta P_{i-1} - \delta P_i)] \\ + \sum_k \gamma_{k,m+1} [V_{k,m+1}^* - \beta_{k,m+1}(\delta P_{i+1} - \delta P_i)] \end{aligned} \tag{14}$$

여기서, $\gamma_{k,m} = \underline{A}_i^{-1} \underline{c}_{k,m}$ 이다. 식 (14)의 5번째 열만을 쓰면 $\delta P_{i-1}, \delta P_i, \delta P_{i+1}$ 에 관한 식을 얻을 수 있고, 이 식을 모든 i 에 대해서 모으면 크기가 N 인 압력수정방정식을 얻을 수 있다.

$$\underline{A}_M \delta P = \underline{b}_M \tag{15}$$

식 (15)에서 압력수정을 구한 뒤에 식 (9)와 식 (14)에 대입하면 최신 셀면 속도, 셀중심 스칼라량을 각각 구할 수 있다.

2.3 CUPID/MARS 수치 해법

2.3.1 MARS에서 연계면 압력수정관계식 도출

CUPID와 MARS 각각 단독 계산의 경우에는 압력수정방정식은 식 (8)과 식 (15)와 같다. 식 (13) 혹은 식 (14)의 5번째 열은 연계면을 갖는 MARS 격자에 대해서 다음과 같이 쓸 수 있다(Fig. 5).

$$\begin{aligned} x_{Mj}^5 = \left(\underline{A}_{Mj}^{-1} \underline{b}_{Mj} \right)^5 \\ + \sum_k \left[\underline{A}_{Mj}^{-1} (\underline{c}_{k,Fj} V_{k,Fj}^{n+1} + \underline{c}_{k,F'j} V_{k,F'j}^{n+1}) \right]^5 \end{aligned} \tag{16}$$

여기서, $j, Mj, Fj, F'j$ 는 각각 연계격자 일련번호(1 ~ NC), 연계 이웃격자 번호, 연계 격자면 번호, 비연계 격자면 번호를 나타낸다. 식 (14)의 5번째 열을 전체 격자에 모으면 연계 격자를 이웃 격자로 갖는 경우에 대해서는 식 (16)으로 대체하면 식 (17)과 같이 크기가 N 인 행렬 및 벡터 방정식을 얻을 수 있다.

$$\underline{A}'_M \delta P = \underline{b}'_M + \sum_{j=1}^{NC} \sum_k (\gamma_{k,Fj} V_{k,Fj}^{n+1}) \tag{17}$$

여기서, NC 는 연계격자(CUPVOL)의 개수 이고, $\gamma_{k,Fj}$ 는 non-

zero 항이 M_j 번째인 크기가 N 인 벡터이다. 위 식에서 연계 격자 일련번호 j 를 이용하여 CUPID와 MARS에서 격자 번호와 격자면 번호를 추적해야 한다.

식 (17)의 오른쪽항을 식 (11)을 사용하여 연계면에서 중간 단계 속도 및 압력수정으로 바꿀 수 있다.

$$\underline{\underline{A}}'_M \delta P = \underline{\underline{b}}'_M + \sum_{j=1}^{NC} \sum_k \left\{ \gamma_{k,Fj}^* [V_{k,Fj}^* + \beta_{k,Fj} (\delta P_{Cj} - \delta P_{Mj})] \right\} \quad (18)$$

여기서, j, Cj 는 연계격자 일련번호, 연계격자 CUPID 격자번호를 δP_{Mj} 는 MARS 압력행렬의 대각성분에 해당하고, δP_{Cj} 는 MARS 압력행렬의 비대각성분에 해당한다. δP_{Mj} 는 식 (7)의 좌변으로 옮겨 압력수정행렬에 넣고, 우변에는 생성항 벡터와 δP_{Cj} 를 남긴다.

$$\underline{\underline{A}}''_M \delta P = \underline{\underline{b}}''_M + \sum_{j=1}^{NC} \sum_k \gamma_{k,Fj} \beta_{k,Fj} \delta P_{Cj} \quad (19)$$

식 (19)에 역행렬을 곱한 다음 CUPID 압력수정이 0이 아닌 열을 쓰면 다음과 같다.

$$\delta P^{Mf} = \left(\underline{\underline{A}}''_M \underline{\underline{b}}''_M \right)^{Mf} + \sum_{j=1}^{NC} \sum_k \left(\underline{\underline{A}}''_M \gamma_{k,Fj} \beta_{k,Fj} \right)^{Mf} \delta P_{Cj} \quad (20)$$

여기서, $f(1 \sim NC), Mf$ 는 각각 MARS에서 연계격자 일련번호와 f 에 해당하는 연계 이웃격자 격자번호를 나타낸다. 위 식을 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$\underline{\underline{\delta P}}^{Mf} = \underline{\underline{\xi}}^{Mf} + \sum_{j=1}^{NC} \sum_k \underline{\underline{\eta}}_{k,j}^{Mf} \delta P_{Cj} \quad (21)$$

$\sum_k \underline{\underline{\eta}}_{k,j}^{Mf} = \underline{\underline{\eta}}_j^{Mf}$ 연산을 취하며, MARS 코드와 CUPID 코드에서 $f(1 \sim NC)$ 에 따른 CUPID 및 MARS 압력을 PC, PM 으로 표시하여 나타낼 수 있다.

$$\delta P^{Mf} = \xi^{Mf} + \sum_{j=1}^{NC} \eta_{Mj}^{Mf} \delta P_{Cj} \quad (22)$$

$$\delta P M^f = \xi^f + \sum_{j=1}^{NC} \eta_j^f \delta P_{Cj} \quad (23)$$

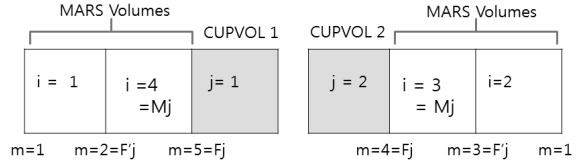


Fig. 6 MARS Nodalization with CUPVOLs

식 (23)에서 MARS 코드에서는 압력 수정 방정식을 사용하여 연계면 $f(=1 \sim NC)$ 에 대해서 ξ_f 와 $\eta_j^f(j=1 \sim NC)$ 를 구하였다. 식 (20)의 행렬을 Fig. 6의 격자에서 다음과 같이 구현할 수 있다.

Fig. 6와 같이 MARS 격자 2개의 사이로 CUPID 코드가 연계되어 있다. 이때의 식 (20)을 구성하는 MARS의 행렬과 벡터와 연계격자 이웃의 격자번호 및 연계격자면 번호는 다음과 같이 정의된다. $\gamma_{k,F1}$ 과 $\gamma_{k,F2}$ 는 각각 $Mj = 4,3(j=1,2)$ 에서 non_zero항이 나오는 크기 4인 벡터이다.

$$\underline{\underline{A}} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{A}}^{-1} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & a_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & a_{33} & c_{34} \\ a_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{pmatrix},$$

$$\gamma_{k,F1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{k,F1} \end{pmatrix}, \quad \gamma_{k,F2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma_{k,F2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{Mj}} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{Fj}} = \begin{pmatrix} 5 \\ 4 \end{pmatrix}$$

식 (20)은 다음과 같은 행렬식으로 구체화 된다.

$$\begin{pmatrix} \delta P_1 \\ \delta P_2 \\ \delta P_{3,f=2} \\ \delta P_{4,f=1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{14} \\ c_{41} & c_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{14} \\ c_{41} & c_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \gamma_{k,1} \beta_{k,1} \end{pmatrix} \delta P_{C1}$$

$$+ \begin{pmatrix} c_{11} & c_{14} \\ c_{41} & c_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \gamma_{k,2} \beta_{k,2} \\ 0 \end{pmatrix} \delta P_{C2}$$

위 행렬식을 정리하면 다음과 같이 압력수정을 위한 벡터 및 행렬을 구할 수 있다.

$$\underline{\underline{\delta P M}} = \begin{pmatrix} \delta P^4 \\ \delta P^3 \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{\delta P}}_{Cj} = \begin{pmatrix} \delta P_{C1} \\ \delta P_{C2} \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{\xi}} = \begin{pmatrix} b^4 \\ b^3 \end{pmatrix},$$

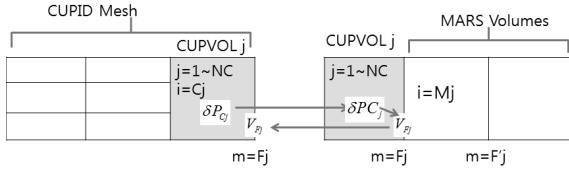


Fig. 7 Information Exchange between CUPID and MARS

$$\underline{\underline{q}}^1 = \begin{pmatrix} c_{44}\gamma_{k,1}\beta_{k,1} \\ c_{34}\gamma_{k,1}\beta_{k,1} \end{pmatrix}, \quad \underline{\underline{q}}^2 = \begin{pmatrix} c_{44}\gamma_{k,2}\beta_{k,2} \\ c_{34}\gamma_{k,2}\beta_{k,2} \end{pmatrix},$$

$$\underline{\underline{q}}_j^f = \begin{pmatrix} c_{44}\gamma_{k,1}\beta_{k,1} & c_{44}\gamma_{k,2}\beta_{k,2} \\ c_{34}\gamma_{k,1}\beta_{k,1} & c_{34}\gamma_{k,2}\beta_{k,2} \end{pmatrix}$$

2.3.2 연계면 압력수정관계식으로 CUPID 입력수정풀이

연계면에서 MARS로 계산한 압력수정방정식 계수를 사용하여 CUPID로 압력수정을 계산한 후에, 이를 MARS에 전달하여 MARS의 압력수정을 계산하고 연계면에서 속도를 계산한다(Fig. 7). CUPID 코드에서 식 (6)과 식 (8)에서 연계면의 유량을 압력수정방정식의 우변에 남기면 다음과 같게 된다.

$$\underline{\underline{A}}'_C \delta P = \underline{\underline{b}}'_C + \sum_{f=1}^{NC} \sum_k^{q,l} \gamma_{k,EF} \Psi_{k,EF}^{n+1} \quad (24)$$

식 (24)에 식 (4)를 적용하면 다음과 같다.

$$\underline{\underline{A}}'_C \delta P = \underline{\underline{b}}'_C + \sum_{f=1}^{NC} \sum_k^{q,l} \gamma_{k,EF} \left(\Psi_{k,CF}^* - \beta_{k,EF} \frac{\delta P_{EF} - \delta P_{CF}}{D_{CF}} \circ \underline{\underline{n}}_{EF} S_{EF} \right) \quad (25)$$

여기서, $\gamma_{k,EF}$ 는 non-zero항이 C^f 항인 크기가 N 인 벡터이다.

$$\underline{\underline{A}}'_C \delta P = \underline{\underline{b}}''_C + \sum_{f=1}^{NC} \sum_k^{q,l} \gamma_{k,CF} \beta_{k,EF} S_{EF} (\delta P_{CF} - \delta P_{EF}) \quad (26)$$

$\sum_k^{q,l} \gamma_{k,EF} \beta_{k,EF} S_{EF} = \underline{\underline{H}}_{EF}$ 의 연산을 취하고, 위 식 δP_{EF} 대신에 식 (23)을 대입하면 다음과 같다.

$$\underline{\underline{A}}'_C \delta P = \underline{\underline{b}}''_C + \sum_{f=1}^{NC} \underline{\underline{H}}_{EF} \left(\delta P_{CF} - \xi^f - \sum_{j=1}^{NC} \eta_j^f \delta P_{Cj} \right) \quad (27)$$

우변의 생성항과 압력수정항을 정리하면 다음과 같이

CUPID 격자만의 압력수정행렬을 얻을 수 있다.

$$\underline{\underline{A}}''_C \delta P = \underline{\underline{b}}'''_C \quad (28)$$

위 시스템 행렬을 풀면 다음단계의 경계면 유량을 구할 수 있다.

$$\Psi_{k,EF}^{n+1} = \Psi_{k,EF}^* + \underline{\underline{H}}_{EF} \left(\delta P_{CF} - \xi^f - \sum_{j=1}^{NC} \eta_j^f \delta P_{Cj} \right) \quad (29)$$

CUPID에서 나머지 물리량은 식 (3), (4), (7)에 압력수정을 대입하여 구한다. 한편, δP_{CF} 를 MARS 코드에 넘겨서 MARS 코드의 압력수정을 계산한 후 연계 셀면에서의 속도를 제외한 MARS의 물리량은 MARS의 압력수정을 식 (9)와 식 (14)에 대입해서 구한다. 한편, MARS에서 연계면의 속도와 압력수정 관계식은 다음과 같다.

$$V_{k,EF}^{n+1} = V_{k,EF}^* + \beta_{k,EF} (\delta P_{CF} - \delta P_{MF}) \quad (30)$$

위 식에 식 (23)에 넣어서 MARS의 압력수정을 제거하면, CUPID 압력수정으로 MARS의 연계 셀면속도를 구할 수 있다.

$$V_{k,EF}^{n+1} = V_{k,EF}^* + \beta_{k,EF} \left(\delta P_{CF} - \xi^f - \sum_{j=1}^{NC} \eta_j^f \delta P_{Cj} \right) \quad (31)$$

2.3.3 연계격자 정보교환

위와 같이 연계된 CUPID/MARS는 1차원 연계격자를 CUPID와 MARS가 각각 공유하면서 코드는 2개이지만 1개의 압력수정방정식을 풀게 된다. 1차원 연계격자는 MARS 입장에서는 압력 경계로 인식하게 되고 CUPID 입장에서는 입구 경계로 인식하게 된다. 즉, MARS에서 계산한 속도를 사용하여 CUPID의 압력수정방정식을 푼다. 그리고 수정된 압력을 이용하여 MARS가 다시 속도를 구하게 된다.

1차원 연계격자는 MARS 코드에는 CUPVOL 이라는 시간 종속 상수압력볼륨의 일종으로 정의되어 있다. MARS는 모든 열수력 입력과 볼륨 입력을 하나의 텍스트 입력으로 정의하는데 이 부분에 1차원 연계격자를 정의할 때 다른 볼륨과 마찬가지로 면적 및 길이 등과 같은 기하학적 정보가 필요하다. CUPID에서 연계부분에 1차원격자를 만들면 이 1차원 연계격자에 대한 기하학적정보를 MARS에 알려주어야 한다.

또한, MARS에서 계산한 정보를 CUPID에 넘겨주기 위해 CUPID에서 정의된 1차원 연계격자의 CUPID에서의 일련번호

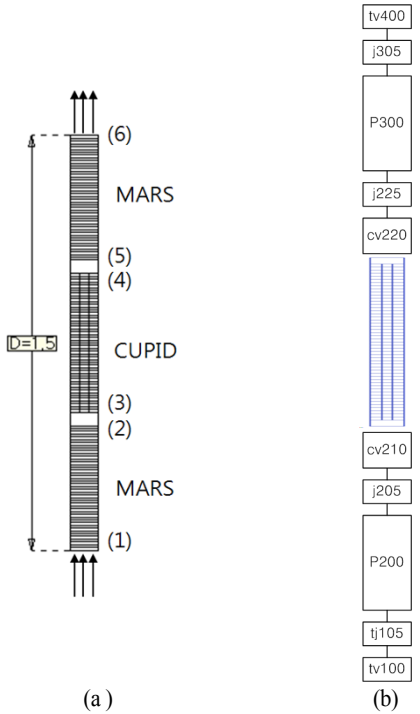


Fig. 8 Coupled Mesh Configuration in Straight Tube Flow

를 MARS에 입력하여야 한다. 이렇게 1차원 연계격자가 CUPID와 MARS에서 각각 정의되면 각각 코드에서 계산한 압력과 속도를 서로 교환할 수 있게 된다.

3. 검증 계산

3.1. 수직관 단상유동

CUPID/MARS의 기기/계통 직접 연계 계산의 타당성을 검토하기 위하여 수직관 단상 및 이상유동, 마노미터 진동 유동에 대한 계산을 수행하였다.

기기/계통 직접 연계 수직관 단상 및 2상 유동에서는 기기/계통 직접 연계 계산에서 질량유량의 보존을 검토하였다. 계산 영역은 Fig. 8(a)과 같이 가로 길이가 0.02 m이고 길이가 1.5 m인 2차원 덕트이다. 이 2차원 덕트의 맨 아래 입구에서 유체가 0.1 m/s의 속도로 들어와서 맨 위 출구로 나가게 된다. 상하 각 0.5 m는 MARS가 계산을 담당하고 가운데 0.5 m는 CUPID가 계산을 담당한다. CUPID 계산부분의 양 끝단은 MARS와 연결하기 위한 1차원 격자 CUPVOL이 있다.

MARS의 격자 구성은 Fig. 8(b)과 같이 시간중속 압력볼륨과 시간중속 속도정성인 tv100과 tj105가 입구를 이룬다. 그리고 길이 45 cm인 파이프 p200과 연결부 j205 및 길이 5 cm인

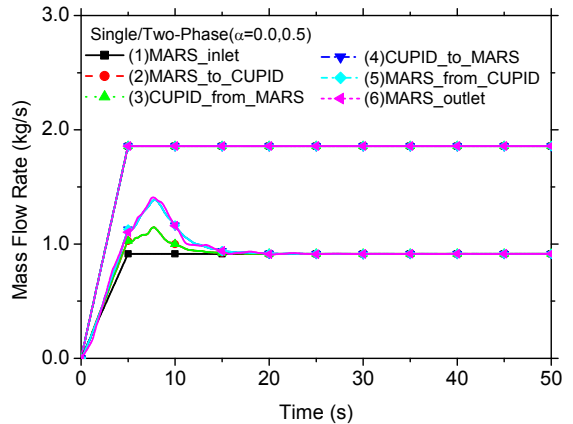


Fig. 9 Mass Flow Comparison in Straight Tube Flow

CUPVOL cv210이 있다. CUPVOL cv210은 여기에 해당하는 CUPID 1차원 격자와 연결이 된다.

CUPID 계산 격자는 3 x 50개의 2차원 격자 150개로 구성되어 있고, CUPID 격자 상단에는 MARS CUPVOL과 연결하기 위한 1차원 격자가 있다. CUPID의 1차원 격자는 MARS CUPVOL과 쌍둥이 격자로 길이와 면적이 각각 연결되는 CUPVOL과 같다. 이 1차원 격자는 길이 5cm MARS CUPVOL cv220과 연결이 되고, 연결부 j225를 사용하여 길이 45 cm 파이프 p300으로 연결된다. MARS격자의 맨 상단은 시간중속 압력볼륨을 사용하여 압력경계로 만든다.

전체 계통의 압력은 1.0 MPa이고 단상 유동의 경우에는 온도가 430 K이고 이상 유동의 경우에는 온도가 453.05 K이다. 이상 유동의 경우에 입구에서 증기분율은 0.5로 하였다. 질량 보존을 확인하기 위하여 Fig. 8(a)에서와 같이 다음의 6개의 지점에서 질량 유속을 출력하였다.

- (1) 전체 계통 입구의 MARS 격자
- (2) MARS 에서 CUPID로의 연결부의 MARS 격자
- (3) MARS 에서 CUPID로의 연결부의 CUPID 격자
- (4) CUPID에서 MARS로의 연결부의 CUPID 격자
- (5) CUPID에서 MARS로의 연결부의 MARS 격자
- (6) 전체 계통 출구의 MARS 격자

유체의 속도는 계산 시작 0초에서 5초까지 0.0 m/s에서 0.1 m/s까지 증가시켰다. 단상의 경우에는 유동이 곧바로 완전 발달하였으나, 이상 유동의 경우에는 15초가 되어야 유동이 완전 발달하였다. 유동이 완전 발달되었을 경우 6지점에서 유량은 모두 일치하였으며, 단상의 경우 소수 11자리까지 그리고 2상의 경우에는 10자리수까지 유량이 일치하였다(Fig. 9).

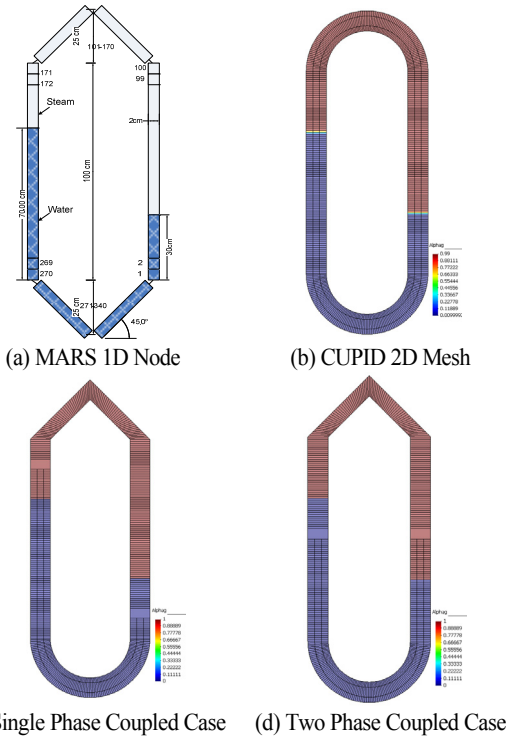


Fig. 10 Various Meshes for Manometer Flow Calculation

Fig. 9에서 단상 유동의 경우는 질량 유속이 1.8 kg/s이고, 2상 유동의 경우는 0.9 kg/s에 해당한다. 2상 유동의 경우 중력이 있는 수직관 내부에서 초기조건으로 일정한 압력과 증기 분율을 가지고 정지한 상태에서, MARS 입구로 증기분율 0.5인 냉각수를 주입하였기 때문에 과도상태를 거쳐 정상상태에 도달하였다.

3.2. 마노미터 진동 2상 유동

운동량 보존성과 관련하여 마노미터 진동 유동을 계산하였다. 검증의 방법은 마노미터 진동 유동을 MARS 단독, CUPID 단독 계산을 수행한 뒤 CUPID/MARS 기기/계통 연계 계산을 수행하여 계산 결과를 비교하였다. 계산 영역은 아래 그림과 같이 아래와 위쪽에 반경 0.25 m인 반원고리 튜브를 갖고 그 사이에 1.0 m의 튜브를 갖는다. 전체 영역의 튜브의 직경은 0.02 cm로 일정하다. MARS의 경우 편이상 반원 고리 튜브를 모의하는 격자를 45도의 기울기는 갖는 파이프 2개를 사용하여 모의하였다. CUPID의 경우에는 2차원 격자를 사용하였는데, 튜브 두께 방향으로는 3개, 길이 방향으로는 402개 총 1206개의 격자를 사용하였다. 계산 초기에 1.0 MPa의 포화상태인 물이 좌측 튜브 직선부에는 70 cm가 채워져 있고, 우측 튜브 직선부에는 30 cm 채워져 있다. 즉, 좌측 튜브와 우측

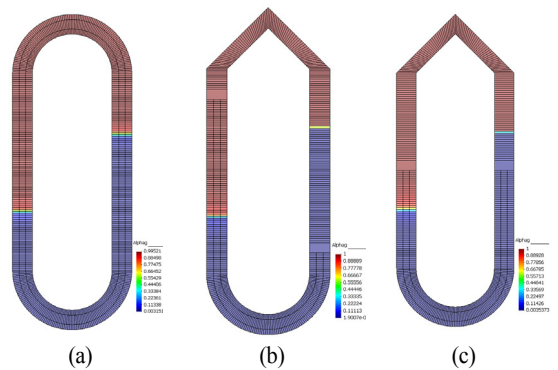


Fig. 11 Void Fraction Contours: (a) CUPID (b) Single Phase Coupled CUPID/MARS (c) Two Phase Coupled CUPID/MARS

튜브의 수두 차이가 40 cm가 나기 때문에 중력에 의해서 물이 좌우를 왕복하게 된다. 만약, 벽면 마찰 손실이 없다면 마노미터 진동은 멈추지 않고 계속 될 것이다.

CUPID/MARS 기기/계통 연계 계산을 위하여 MARS의 1차원 격자와 CUPID의 2차원 격자를 사용하였다. 먼저 Fig. 8과 같이 2가지 종류의 격자의 양끝이 1차원 격자로 축소된 2차원 CUPID 격자를 마련하였다. 양끝의 1차원 격자는 MARS CUPVOLs과 쌍둥이 격자가 된다. 즉, MARS의 1차원 격자를 CUPID의 2차원 격자를 제외한 부분만을 만들고 CUPVOL들을 이용하여 두 격자를 연결하면 마노미터 유동 진동 연계 계산을 수행할 수 있다.

CUPVOL연계 격자의 위치에 따라 단상 연계(Fig. 10(c)) 혹은 2상 연계 계산(Fig. 10(d))능력을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 10(c)에서는 연계 격자가 단상 수증기 혹은 단상 물만 통과하는 위치에 있는데 반해서 Fig. 10(d)에서는 연계 격자가 2상 유체가 통과하는 위치에 있다. CUPVOL 연계 격자의 크기는 2.0 cm × 2.5 cm, CUPID 2차원 격자의 크기는 2/3 cm × 1.0 cm, 그리고 MARS 격자의 크기는 2.0 cm × 1.0 cm 이다.

Fig. 11에는 계산이 시작된 뒤 1초 후에 마노미터 내부의 수증기분율을 제시하였다. 왼쪽 및 오른쪽의 수직관 내부의 수면이 초기 상태와는 정반대로 왼쪽은 낮고 오른쪽은 높다. Fig. 10(c)와 Fig. 11(b)를 비교하면 MARS의 연계 격자인 CUPVOL 두 개에 각각 기상과 액상만이 통과하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 10(d)와 Fig. 11(c)를 비교하면 CUPID와 MARS의 연계 격자인 CUPVOL 두 개에 액상과 기상이 모두 통과하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11을 통해서 CUPID/MARS의 연계 기법이 기상, 액상은 물론이고 2상에서 잘 작동하고 있음을 정성적으로 확인하였다. CUPID/MARS 연계 기법의 정량적 확인을 위하여 마노미터 튜브의 바닥에서 액상의 X방향(가로 방향) 속도를 Fig.

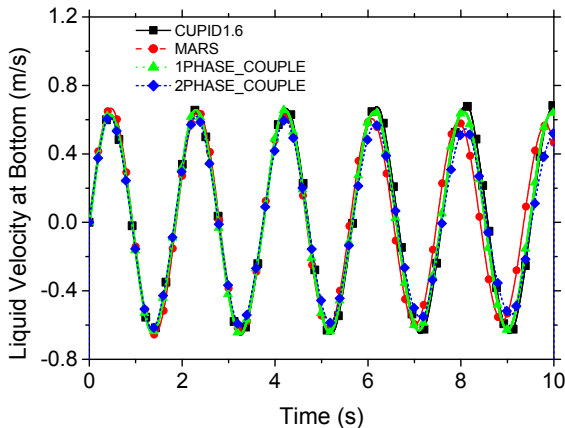


Fig. 12 X-direction Velocity at Manometer Bottom

12에 비교하였다. 마노미터 튜브 바닥에서 액상의 속도는 일정한 주파수와 진폭을 가진 파동의 형태를 지닌다. 즉, 액상의 튜브 바닥에서 x 방향 속도는 왼쪽 수두가 최고일 때 0이고, 왼쪽 수두가 내려감에 따라 점점 커져서 왼쪽 수두가 중간값일 때 최고의 속도를 보이다 점점 감소하여 왼쪽 수두가 최저점일 때 다시 0이 된다. 왼쪽 수직관의 수두가 다시 증가할 때는 속도는 음의 값을 갖게 된다.

Fig. 12에는 CUPID 단독, MARS 단독, 단상 연계, 2상 연계의 경우에 대해 마노미터 진동 유동에서 바닥위치에서 x 방향의 속도를 비교하였다. 단상 연계의 경우에는 CUPID 단독 계산과 MARS 단독 계산의 중간값에 해당하는 진폭과 진동수를 보이고 있는 반면에, 2상 연계의 경우에는 MARS 단독 계산에 비해서 진폭과 진동수에서 감쇠가 일어나는 것을 알 수 있다. 이것은 2상연계에 있어서 CUPID코드와 MARS 코드간의 EOS, 압력 강하 특성, 수치확산의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 3차원 정밀해석 코드인 CUPID와 1차원 계통해석 코드인 MARS를 하나의 압력수정방정식을 푸는 방식으로 유동장을 직접 연계하였다. 연계된 CUPID/MARS의 확인 및 검증계산을 위하여 수직관 유동과 마노미터 진동유동에 적용하였고, 질량, 에너지, 운동량 보존성에 문제점이 없는 것으로 확인하였다. 연계한 CUPID/MARS는 다중스케일 개념이 강한 원자로 시스템에서 일부 기기의 다차원현상을 포함한 계통해석이 가능하다는 장점이 있다. 즉, 계통의 열수력

적 과도 상태를 반영하여 기기에서 3차원 정밀 계산을 수행할 수 있는 장점이 있다. 연계된 CUPID/MARS의 활용성은 CUPID와 MARS의 각각의 성능에 의존할 수밖에 없는데, MARS는 이미 성숙된 계통코드이므로 CUPID의 성능향상을 통해 연계 계산의 정밀도도 향상될 것으로 기대한다. CUPID/MARS 연계코드로 실증시험 검증계산 후에 실제 원전 안전해석에 적용할 수 있다.

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).

References

- [1] 1997, Jeong, J.J., Sim, S.K. and Lee, S.Y., "Development and Assessment of the COBRA/RELAP5 Code," *J. of Nuclear Science and Technology*, 34(11), pp.1087-1098.
- [2] 2013, Adamsson, C., Papini, D., Zerkak, O. and Prasser, H.-M., "Simulation of International Standard Problem ISP-42, Phase B, Using In-house Coupled Code GOTHIC-TRACE," *NURETH-15*, Pisa, Italy, May 12-17.
- [3] 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*, 42(6), pp.636-655.
- [4] 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* 26, pp.1611-1642.
- [5] 1992, Lee, S.Y., Jeong, J.J. and Kim, S.-H., COBRA/REALP5: A Merged Version of the COBRA-TF and RELAP5/MOD3 CODES, *Nuclear Technology*, Vol.99, pp.177-187.
- [6] 2015, Yoon, H.Y., CUPID Code Manuals Vol.1: Mathematical Models and Solution Methods, KAERI/TR-6101.
- [7] 2004, Thermal Hydraulic Safety Research Department, MARS code manual Vol. I: Code structure, system models, and solution methods, *Korea Atomic Energy Research Institute*.