

발전소 계통해석을 위한 MARS 코드의 다차원 이상 난류 유동 모델 검증계산

이석민 · 이은철 · 배성원^{*†} · 정법동^{*}

서울대학교 원자핵공학과, *한국원자력연구소

(2005년 5월 30일 접수, 2005년 12월 28일 채택)

Assessment of MARS Multi-dimensional Two-phase Turbulent Flow Models for the Nuclear System Analysis

S.M. Lee, U.C. Lee, S.W. Bae^{*†} and B.D. Chung^{*}

Seoul National University, *Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 30 May 2005, Accepted 28 December 2005)

요 약

원자력발전소의 다차원 이상 유동 현상을 적절히 모사하기 위해 일차원 계통해석 코드에 삼차원 유동모형을 적용하였다. 그 중 다차원모델에 새롭게 적용된 이상 난류모델을 검증하기 위해 사각 slab 내부의 단상유동을 계산하여 상용 CFD 코드의 계산결과와 비교하였다. 그 결과 단상유동의 경우 난류 모델의 계산이 적절히 수행됨을 알 수 있었다. 또한 다차원 이상 유동 계산을 검증하기 위해서 RPI에서 수행된 물-공기 다차원 실험의 기포율 분포를 비교하였다. 그 결과 다차원 모델의 이상 유동 계산을 위해서는 일차원 기반의 유동양상 맵 중 수평 분리 유동양상이 제거 되어야 함을 알 수 있었다. 이와 같이 유동양상 맵을 수정하여 모사한 계산결과가 실험에서 측정된 기포율의 경향을 잘 따르는 것으로 계산되었다.

주요어 : 다차원 모델, 계통해석 코드, 기포율, MARS 코드

Abstract — The multi-dimensional two-phase flow models were developed for analyze the multi-dimensional behaviors of nuclear systems. To verify the simple turbulence model, The single phase mixing problem in a rectangular slab was calculated and compared with the commercial CFD code results. That result shows a good agreement with the CFD result. And the RPI Air-water experiments were simulated to assess the two-phase turbulence model in the multi-dimensional component. The first calculated distribution of void-fraction is highly dispersed and diffusive. It was revealed that the main reason is undesirable stratification force in a horizontal stratified flow regimes. Therefore the horizontally stratified flow regime is deleted because the stratified flow regime is not expected in multi-dimensional flow. With the modification of the flow regime, the predicted flow patterns and void fraction profiles are in good agreement with the measured data.

Key words : Multi-dimensional model, System analysis code, Void fraction

[†]To whom correspondence should be addressed.
Korea Atomic Energy Research Institute
Tel: 042-868-2639
E-mail: bswon@kaeri.re.kr

1. 서 론

지금까지 열수력 안전해석에 주로 사용되어온 일차원 계통분석 코드로는 노심 및 강수관에서의 비대칭 유동, 원자로 격납건물내 재장전수 탱크(IRWST)와 같은 대형 탱크에서의 유동과 같은 다차원 유동현상을 적절히 묘사할 수 있는 기능을 갖고 있지 못하였다. 국외에서는 이러한 다차원 해석능력의 확보를 위한 코드개발이 오래 전부터 수행되어왔는데, 미국의 TRACE 코드^[1], RELAP5-3D^[2], 프랑스의 CATHARE 코드^[3], 독일의 ATHLET 코드^[4] 등은 다차원 열수력 모듈을 이미 개발하여 구비하고 있다. 국내에서는 이상유동의 다차원 해석을 위하여 MARS 코드^[5] 개발 초기에서부터 3차원 해석이 가능한 COBRA-TF^[6] 모듈을 근간으로 3D모듈을 개발 한 바 있다. COBRA-TF의 모델에 근간을 둔 MARS 3D 모듈은 액적장 모델이 있는 3유체 이상 유동 모델로서 노심 모델시 채널분리가 가능하여 열유동 특성에 따라 노심의 노딩을 자유스럽게 할 수 있는 등 여러가지 장점이 있다. 그러나 동시에 이러한 특징으로 인한 제약으로 원통형 좌표계가 필요한 원형 수조에서의 다차원적인 유동이나 노심채널 간의 난류혼합이 아닌 난류유동모델 적용에는 코드 구조상 많은 무리가 있음이 밝혀졌다. 또한 MARS 일차원 모듈의 cross flow junction을 이용하여 열수력의 다차원 현상을 어느 정도 모의할 수 있으나 근본적으로 횡방향 운동량, 전단 응력항을 모델하고 있지 않기 때문에 full-3D 분석은 불가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 제약을 탈피하기 위하여 RELAP5-3D코드나 CATHARE 코드에서 수행한 바와 유사하게 MARS코드의 일차원 모듈을 확장하여 다차원 유동에 적용할 수 있는 다차원 컴포넌트를 개발하였다^[7].

본 논문에서는 위와 같은 목적으로 개발된 다차원 컴포넌트의 이상 난류모델 검증에 위해 2D 사각 slab에서의 혼합모델 평가계산과 RPI에서 수행된 공기-물 실험^[8]을 검증 계산하였다. 사각 slab에서의 혼합모델은 단상 유동의 난류혼합을 계산한 것으로 상용 CFD 해석코드인 FLUENT 코드를 사용하여 그 계산결과와 비교하였으며, 이상유동의 다차원 혼합을 검증하기 위해 RPI 공기-물 실험의 결과와 비교하였다.

2. 다차원 이상 유동 방정식 및 난류모델

2-1. 다공성 모델을 적용한 3차원 이상 유동 방정식

다차원 모델에 적용된 3차원 방정식은 기존의 1차원 운동량 및 에너지 방정식에 3차원 이상 유동 방정식을 도입하여 다차원해석이 가능하도록 개발하였다. 계산격자를 다차원 모델의 사용에 맞게 다공성을 고려한 체적

으로 정의하였으며, 이에 따른 체적 및 면적의 다공성은 전체 볼륨에 대한 유체의 볼륨비(V_p/V)와 전체 면적에 대한 유체의 면적비(A_p/A)로 정의된다. 이러한 다공 매질 방식은 부수로 방법과 달리 반경방향 운동량 방정식이 불필요하고 이에 따른 계산격자의 가정이 줄어들어 그 적용범위를 확대할 수 있다^[9].

질량 보존 및 에너지 방정식의 경우는 각 방향에 따른 질량 및 에너지가 이미 보존되도록 설계되어 있어 특별한 모델 도입이 필요 없으나, 운동량 방정식은 기존의 일차원 방정식을 3차원으로 확장할 필요가 있다. 위와 같은 정의를 적용하여 유도된 운동량 방정식은 아래와 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial}{\partial t} \alpha_k \rho_k v_k + \nabla \cdot (\gamma_s \alpha_k \rho_k v_k v_k) + \gamma_v \nabla \cdot \alpha_k p = \gamma_v \alpha_k \rho_k g + \nabla \cdot (\gamma_s \alpha_k \underline{\tau}) - \gamma_v F_i - \gamma_v F_w \quad (1)$$

운동량 방정식의 경우 식(1) 좌변의 두 번째 대류항의 경우 직각좌표계 및 원통형 좌표계 모두를 고려하여 3차원으로 확장하였으며, 그간 영향이 작아 고려되지 않았던 우변 두 번째 확산항 역시 직각 및 원통형 좌표계 모두에서 난류점성이 계산 가능하도록 설계하였다(원통형좌표계 관련식 생략). 결론적으로 식(1)을 3차원으로 확장한 MARS 코드의 다차원 이상 유동 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_g \rho_g \frac{\partial u_g}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_v} \left(\frac{1}{2} \alpha_g \rho_g \gamma_{a,x} \frac{\partial u_g^2}{\partial x} + \alpha_g \rho_g \gamma_{a,y} v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} + \alpha_g \rho_g \gamma_{a,z} w_g \frac{\partial u_g}{\partial z} \right) \\ = -\alpha_g \frac{\partial p}{\partial x} + \alpha_g \rho_g B_x - \alpha_g \rho_g (FWG) u_g + \Gamma_g (u_{g1} - u_g) \\ - \alpha_g \rho_g (FIG) (u_g - u_f) - C \alpha_g \alpha_f \rho_m \left[\frac{\partial (u_g - u_f)}{\partial t} + u_f \frac{\partial u_g}{\partial x} - u_g \frac{\partial u_f}{\partial x} \right] \\ + \frac{\alpha_g (\mu_g + \mu_{g,T})}{\gamma_v} \left[\gamma_{a,y} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \gamma_{a,z} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

2-2. 이상 난류 모델 개발

현재 가장 일반적으로 사용되는 난류모델은 표준 k-ε 모델이다. 표준 k-ε 모델은 2방정식모델로서 난류 에너지(k) 및 소산(ε)에 대해 두 개의 수송방정식을 구하여 난류항을 계산한다. 이 모델은 난류의 생성, 소멸, 대류, 확산을 모두 고려하는 모델로서 현재 까지 가장 잘 검증된 모델이나 이상 유동을 해석하는 계통코드에 사용된 사례는 드물다^{[9][10]}. 표준 k-ε 모델을 적절히 사용하기 위해서는 격자의 크기가 매우 작아야 적절한 난류 해석이 가능하기 때문에, coarse mesh로 해석하는 대부분의 계통코드에서는 그 효율성이 낮다.

레이놀드 응력 텐서항 및 난류 혼합항은 그 영향이 매우 작거나 미미하여 계통 분석 코드에서는 무시되거나

매우 작은 상수 값이 적용되어 왔다. 그러나 Thurgood 등은 Ishii 등이 제안한 deformation 텐서를 이용하여 Prandtl의 혼합 길이 모델을 COBRA 코드의 난류모델에 적용하였다⁶⁾. 혼합길이 모델은 간단한 대수식을 사용하여 난류 점성항을 계산하는 모델로 그 사용이 간편하지만 혼합길이에 대한 경험식이 필요하고, 속도구배가 없을 경우에는 난류를 잘 예측하지 못하는 단점이 있으나 속도 구배가 잘 정의되는 많은 상황에서는 유용하게 사용될 수 있다. 또한 그 모델이 단순하여 이상 유동 모델에 적용이 간편하며 계산시간이 크게 늘어나지 않는 장점을 갖고 있다. 따라서 이를 MARS의 다차원 모델의 난류 응력계산에 적용하였다. 혼합길이 모델의 일반적 형태는 다음 식(3)과 같다.

$$\frac{\mu_t}{\rho_k} = l_m^2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (3)$$

이를 코드에 적용하기 위해 제시된 속도 구배항인 bulk deformation 텐서는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\underline{D}_{k_B}^* = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 0 & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

위에서 제시된 bulk deformation 텐서를 이용하여 식(3)을 다시 표시하면 아래 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, 식(1)의 확산항에 사용되는 난류 응력 텐서는 식(6)과 같다.

$$\underline{\mu}_T = \rho_k l_m^2 \sqrt{2 \underline{D}_{k_B}^* : \underline{D}_{k_B}^*} \quad (5)$$

$$\underline{\tau}^T = 2 \underline{\mu}_T \underline{D}_{k_B}^* \quad (6)$$

위에서 제시된 텐서에는 운동량 혼합길이(l_m)가 쓰여지고 있다. 이러한 혼합 길이에 대해서는 유동특성에 따른 경험식이 주어지고 있다¹¹⁾. 그러나 일반적인 2차원 유동에 대해서만 제시되어 있으며, 벽함수가 없는 MARS의 경우 그 효용성이 떨어진다. 따라서 민감도 계산을 통하여 식(7)과 같이 노드에 따라 제한조건을 두도록 하였다.

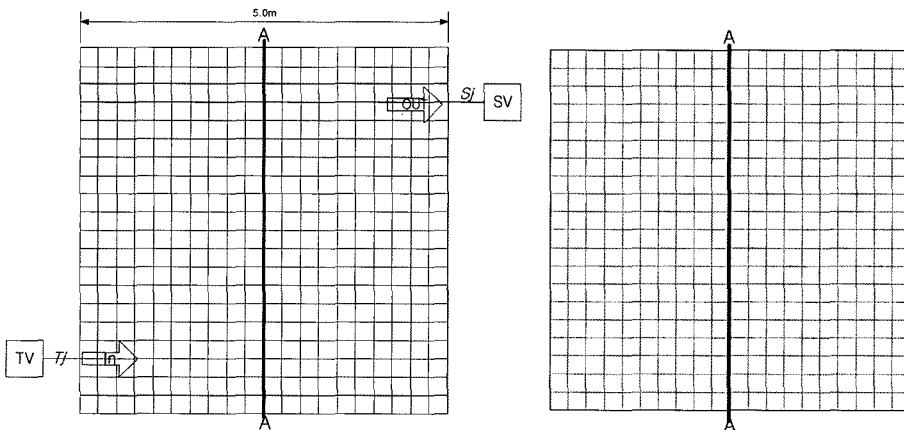
$$\frac{\Delta x}{5} \leq l_m \leq \Delta x \quad (7)$$

결과적으로 운동량 방정식의 혼합 길이는 유동특성에 따른 경험식과 식(7)을 참고하여 사용자가 입력하여 사용하도록 모델 되어 있다.

3. 평가 검증 계산

3-1. 사각 slab에서의 단상 난류 혼합 계산

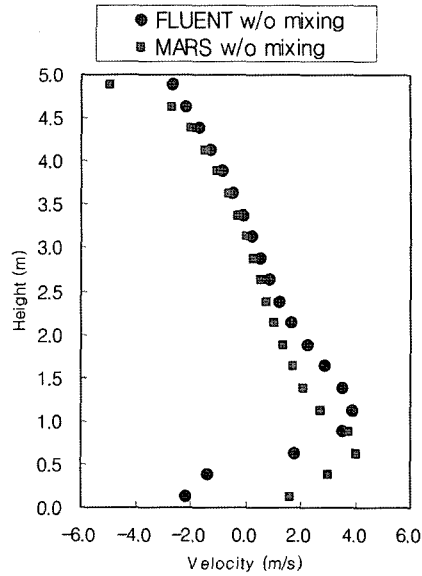
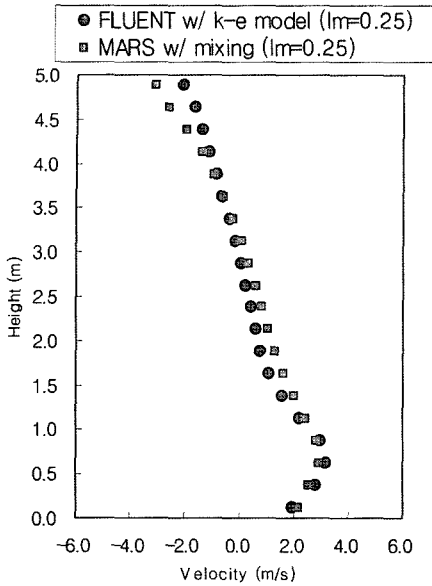
혼합모델을 평가하기 위한 MARS 모델은 그림 1(a)과 같이 20개의 x방향 노드와 20개의 y방향 노드로 높이와 길이가 각각 5 m인 사각 slab으로 구성하였다. 좌측 하단부와 우측 상단부에 입·출구를 두었으며 경계조건을 위해 입·출구는 각각 time-dependent 볼륨 및 single 볼륨으로 연결되어 있다. MARS 코드의 계산결과와 비교하기 위해 사용된 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.0¹²⁾의 노드는 그림 1(b)와 같이 MARS 노드와 동일하게 구성하였고 난류 혼합 모델로는 표준 k-ε 모델을 사용하였다.



a) MARS 노드

b) FLUENT 노드

그림 1. 단상유동 검증계산을 위한 2차원 slab의 모델링.



a) 난류확산항을 포함한 경우

b) 난류확산항을 배제한 경우

그림 2. 단상 2차원 slab 유동의 수평방향 속도비교.

운동량 혼합 정도를 확인하기 위하여 slab 내부 온도 보다 높은 온도의 물을 빠르게 주입하여 내부에서의 유동 변화와 출구부의 온도 변화를 비교하였다. 입구의 주입속도 및 온도는 각각 5 m/s, 588 K로 하였으며 이 경우 내부 slab의 온도는 524.08 K를 초기 온도로 하였다. 내부 압력은 15 MPa로 두어 계산하였으며, 난류 혼합 길이는 주입관 지름의 1/2의 크기인 0.25 m를 사용하였다.

그림 2는 50초 경과상태에서 A-A 평면상의 수평방향 유체속도를 비교한 것이다. 난류확산항이 포함된 그림 2(a)에서는 상부 벽면에 접한 노드의 유체속도가 차이를 보이고 있으나 slab 내부와 하부의 유체속도가 유사한 값을 나타내고 있다. 그림 2(b)는 난류확산항을 제외한 계산결과이다. 난류확산항이 배제된 FLUENT 계산 결과를 보면 slab 하부에서 역류현상을 보이고 있으며 수평 주입된 유체의 관성이 주변 유체에 잘 전달되지 않고 유지 되고 있음을 알 수 있다. MARS 계산 결과는 난류확산항이 포함된 경우와 크게 다르지 않으나 유체 주입에 의한 관성의 영향 때문에 수평방향 속도가 상승하였고 높이 1 m 지점에서 속도구배가 난류확산항이 포함된 경우보다 크게 나타나는 차이점을 보이고 있다. FLUENT 계산에서 slab 하부 유동 양상이 난류확산항의 포함여부에 따라 크게 변화하는 것은 다차원 해석에서의 난류확산항의 중요성을 잘 설명해 주고 있다.

그림 3은 slab 출구에서의 유체 온도를 비교한 것이

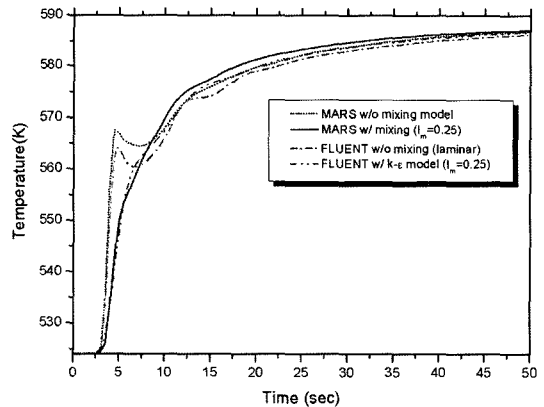
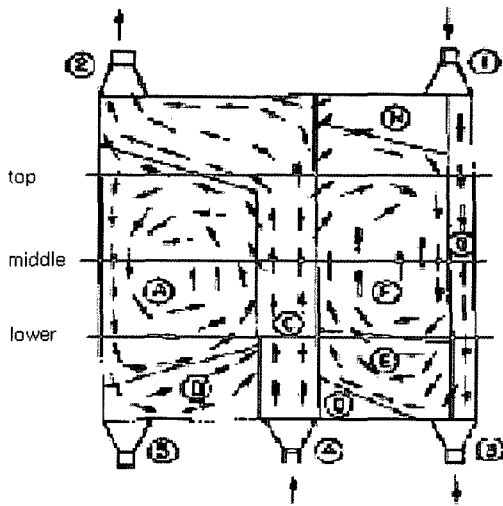


그림 3. 단상 2차원 slab 유동의 출구 유체 온도 비교.

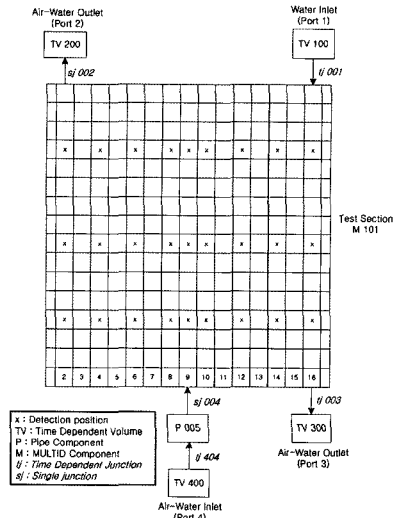
다. MARS의 계산결과가 혼합모델의 적용 여부와 상관 없이 모두 FLUENT결과와 근사한 결과를 보여주고 있어 운동량 방정식에 의한 내부 유동 혼합이 적절히 계산됨을 알 수 있다.

3-2. RPI 물-공기 다차원 유동 실험 평가

RPI 물-공기 실험은 1983년 RPI(Rensselaer Polytechnic Institute)에서 수행된 2D 이상 유동 다차원 개별 효과실험으로서 이상유동의 비대칭 다차원 효과를 측정할 실



(a) 영역별 유동양상 및 기포율 측정위치



(b) MARS 노딩

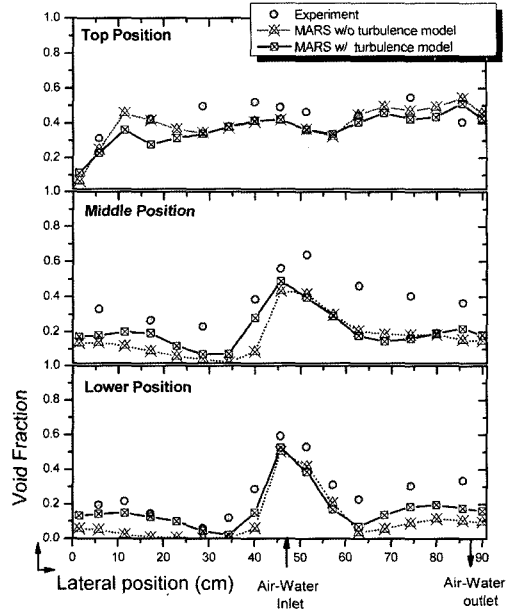
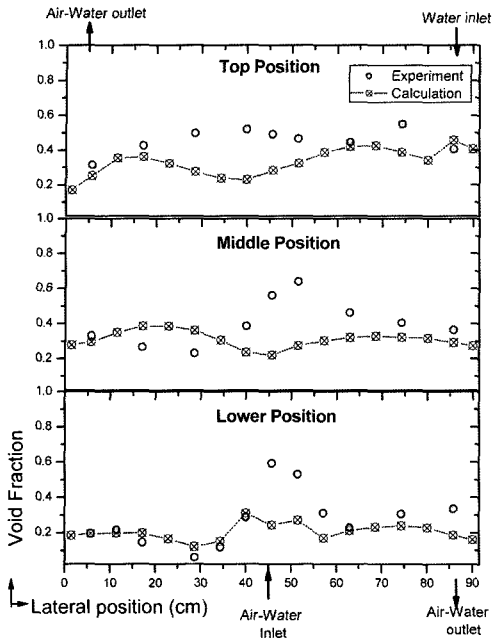
그림 4. RPI 물-공기 이상유동 실험의 유동양상과 MARS 노딩.

험이다⁸⁾. 실험장치의 높이와 너비는 0.91 m이며 폭이 0.013 m의 크기로 매우 얇은 수직 채널로 구성되어 있다. 그림 4(a)에 보인 그림처럼 5개의 포트에서 유동이 유출입 된다. 실험에서 측정된 변수로는 각 포트의 유출입 유량과 실험장치 내부 압력 및 세군데 높이에서의 기포율이 측정 되었으며 측정된 기포율의 최대 오차는 ± 0.014 이다. 실험은 물이 가득 찬 slab의 포트 1과 4에 물을 주입하여 일단 정상상태를 만든 후, slab 하단 중앙에 위치한 포트 4의 제어 밸브를 통해 공기를 주입하여 진행된다. 그 후 각 포트의 유량이 정상상태가 되면 측정위치에서 기포율 및 압력을 측정하였다. 포트 4의 공기 주입유량을 변화시켜 가면서 수행된 실험 중 포트 1과 4로 주입되는 물의 유량이 각각 0.905 kg/s이고 포트 4를 통해 주입되는 공기의 quality가 0.6%인 경우를 모사하였다. 이 경우 일부의 이상 유체가 포트 3을 통해 빠져나가며 대부분의 공기는 포트 2를 통해 배출 된다. 이 때 실험장치 내부에서 관찰되는 유동양상을 그림 3(a)와 같이 (A)영역에서 (G)영역까지 8개의 영역으로 근사하였다. (C)영역이 주 유동을 형성하는 영역으로 상승 유동을 형성하여 대부분이 포트 2로 빠져나간다. 오른쪽 영역에서 시계 방향으로 회전한 유동은 포트 1에서 주입된 단상의 하향유로와 결합하여 포트 3으로 빠져나가거나 다시 회전하여 포트 4의 상향 유로와 만나게 된다. 이 경우 (A), (B), (E), (F) 영역에서 회전유동이 발생하게 되며, 포트 2로 빠져나가지 못하고 오른쪽 회전유로에 합류하게 되는 일부의 공기가 (H)영역에 모

여 air-pocket을 이루게 된다.

그림 4(b)는 위의 실험을 모사하기 위한 MARS 다차원 모델 노드를 나타낸 것으로 17x16의 사각 slab으로 구성하였다. 이 때 기포율이 측정된 위치에 각 노드의 볼륨 중심이 일치하도록 하여 기포율 비교가 용이하도록 하였다. 유동양상 맵의 수정을 거치지 않고 공기 주입 quality가 0.6%인 실험에 대해 모사한 결과, 그림 5(a)에서와 같이 계산결과가 실험에서 측정된 기포율의 경향을 전혀 예측하지 못하였다. 그 원인은 MARS 코드에서는 유동양상 모델이 수평유동과 수직유동으로 유동의 방향에 따라 나뉘어 사용되는데, 다차원 모델에서는 유동특성상 수평분리(horizontal stratification)가 일어나지 말아야 하는 유동양상 및 위치에서도 수평분리가 발생하는 것으로 해석하기 때문이다. 따라서 다차원모델의 경우 기존의 수평유동양상 맵에서 수평 분리 유동양상 맵을 제거해주어 이를 보완하였다. 그림 5(b)는 유동양상 맵 보완후의 기포율 계산결과를 이상난류모델 적용 여부에 따라 비교한 것이다.

두 경우 모두 유동양상 맵 수정 전의 결과인 그림 5(a)에 비해 향상된 기포율 예측 결과를 나타낸다. 또한 그림에서 보듯이 이상 난류 모델을 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비해 강한 난류가 형성되는 중심부 좌측 영역 및 하부 좌측 영역에서 기포율 예측이 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 기포율 계산이 실험과 약간의 차이는 발생하나 대부분 일치하는 것으로 보어, MARS의 다차원 모델이 기포율 계산을 적절히 수행함



(a) 유동양상 맵 수정 전의 높이별 기포율

(b) 유동양상 맵 수정 후의 높이별 기포율

그림 5. 유동양상 맵의 수정 여부에 따른 각 높이별 기포율 계산 결과 비교.

을 알 수 있다. 반면에 최상부 노드중 (H)영역의 기포율은 평균적으로 0.8 이상의 높은 계산 결과를 보이고 있으나 실험에서 관찰된 물-공기의 상분리는 보이지 않는다. 따라서 RPI 실험에서 보이는 것과 같은 국소적인 물-공기의 상분리를 포함하는 예측을 위해서는 일차원 유동양상 맵의 수정 보완이 아닌 근본적인 다차원 유동양상 연구가 수반되어야 할 것이다.

4. 결 론

원자력 발전소의 다차원 이상 유동 현상을 적절히 모사하기 위해 일차원 계통해석 코드에 삼차원 유동모델을 개발하고 이상 난류 모델로 Prandtl's 혼합 길이 모델을 적용하였다. 다차원모델에 적용된 이상 난류모델을 검증하기 위해 단상유동의 사각 slab 혼합현상을 계산하여 상용 CFD 코드의 계산결과와 비교하였다. 그 결과 단상유동의 경우 모델의 계산이 적절히 수행됨을 알 수 있었다. 나아가 이상유동의 다차원 유동 계산을 검증하기 위해서 RPI에서 수행된 물-공기 다차원 실험을 검증하였다. 그 결과 다차원 모델을 위해서는 일차원 유동 계산을 위해 사용되던 유동양상 맵에서 수평 분리 유동양상이 제거 되어야 함을 알 수 있었다. 이와 같은 수

정을 거쳐 모사한 결과, MARS 코드의 계산결과가 실험에서 측정된 기포율의 경향을 잘 따르는 것으로 나타났다. 그러나 다차원적인 유동양상 맵의 개발 및 상간 경계 현상에 관한 물리적 모델링 등도 함께 수반되어야 함을 알 수 있었다. 이러한 노력과 함께 분리효과 실험과 발전소 계통을 모사한 종합 효과 실험 및 발전소 계통에 대한 검증이 완료되면, 원자력 발전소 내 다차원 현상을 적절히 모사하는 계통 해석 코드로 발전 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Kelly, J.M. "TRAC-M Code Consolidation and Development", Fall 2002 CAMP Meeting, Alexandria, Virginia Sponsored by USNRC, Oct. 31, 2002.
2. RELAP5-3D Development Team, "RELAP5-3D Code Manuals, Volumes I, II, IV, and V", Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL-EXT-98-00834, Revision 1.1b, 1999.
3. Bestion, D., "The physical closure laws in the CATHARE code", Nuclear Engineering and Design, 1990, 124, 229-245.
4. Teschendorff, V.; Augstregesilo, H.; Lerchl, G.

- Methodology, Status and Plans for Development and Assessment of the Code ATHLET, GRS, OECD/CSNI Workshop on Transient Thermal-Hydraulic & Neutronic Codes Requirements, 5-8 Nov., 1996.
5. 이원재 외. “원자력 열수력 실증실험 및 평가기술개발/최적열수력계통분석코드 개발”, KAERI/RR-2235/2001, 한국원자력연구소, 2002.
 6. Thurgood, M.J.; Kelly, J.M.; Guidotti, T.E.; Kohrt, R.J.; Crowell, K.R. “COBRA/TRAC A Thermal Hydraulics Code for Transient Analysis of Nuclear Reactor Vessels and Primary Coolant Systems”, NUREG/CR-3046, 1983.
 7. 정법동; 배성원; 이영진. 열수력 계통분석코드 MARS의 다차원 컴포넌트, MULTID의 개발, 2003 한국원자력학회 추계 학술 발표회, 2003.
 8. Bukhari, K.M.; Lahey, Jr. R.T. The Measurement of Countercurrent Phase Separation and Distribution in a Two-Dimensional Test Section, NUREG/CR-3577, Jan, 1984.
 9. Hotta, A.; *et al.* “Three dimensional evaluation of two-phase flow in BWR fuel bundles based on compressible two fluid-one pressure and k-ε turbulence models”, Ann. Nucl. Energy, 1998, 25(7), 437-463.
 10. Stewart, C.W.; *et al.* Improvements to the COBRA-TF(EPRI) Computer Code for Steam Generator Analysis, NP-1509, 1980.
 11. Versteeg, H.K.; Malalasekera, W. An introduction to computational fluid dynamics - the finite volume method, Longman Group Ltd, p.66, 1995.
 12. FULENT6.0 User’s Guide. FLUENT Inc, 2001.