

일체형원자로 3차원 유동장 해석코드 개발

Development of a 3-D Flow Analysis Computer Program for Integral Reactor

윤한영, 이규형, 김희경, 황영동, 김희철  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART와 같이 복잡한 유동장을 가진 일체형원자로 계통의 열수력 해석을 목적으로 일체형원자로 3차원 열유동해석 전용 전산해석프로그램 TASS-3D를 개발하고 있다. 또한 격자생성 및 해석 조건 설정을 위한 전처리 작업, 계산 결과 확인을 위한 후처리 작업의 효율성을 고려하여 일체형원자로 열수력 해석 전용 전/후처리 프로세서를 개발하고 있다. TASS-3D는 복잡한 형상에서의 유동현상을 해석하기 위하여 일반 비 직교좌표계를 사용하였으며 유한체적법에 근간을 둔 비엇물림 격자계를 사용하였다. TASS-3D프로그램은 일체형원자로의 물리적 현상을 모사하기 위한 다양한 모델이 내장 되며 노심 동특성 코드, 이차계통 코드 모듈 및 노심열수력 코드와 연계된다. 현재 TASS-3D는 단상 3차원 열유동 해석에 적용이 제한되고 있으나 일체형원자로의 정상 및 과도상태에서 예상되는 2-상유동을 포함하는 일체형원자로 3차원 열유동해석 전용코드 개발을 최종목표로 현재 관련 연구를 수행 중에 있다.

Abstract

A 3-D computational fluid dynamics program TASS-3D is being developed for the flow analysis of primary coolant system consists of complex geometries such as SMART. A pre/post processor also is being developed to reduce the pre/post processing works such as a computational grid generation, set-up a analysis conditions and analysis of the calculated results. TASS-3D solver employs a non-orthogonal coordinate system and FVM based on the non-staggered grid system. The program includes the various models to simulate the physical phenomena expected to be occurred in the integral reactor and will be coupled with core dynamics code, core T/H code and the secondary system code modules. Currently, the application of TASS-3D is limited to the single phase of liquid, but the code will be further developed including 2-phase phenomena expected for the

normal operation and the various transients of the integrator reactor in the next stage.

## 1. 서론

최근 전산해석 기술의 발전과 컴퓨터 성능의 향상으로 일체형원자로 SMART와 같이 복잡한 형상을 가진 원자로냉각재 계통의 3차원 유동 해석이 가능하게 되었다. 일체형원자로는 복잡한 유로 형상 때문에 1차원적 해석과 3차원적 해석은 많은 차이가 있다. 특히, 열 과 물질 혼합이 3차원 유동장에서 발생하는 경우 1차원적 해석으로는 유동특성의 확인이 어려워 3차원 열유동 해석의 중요성이 증가하고 있다.

일체형원자로의 유동장은 주냉각펌프, 증기발생기 카세트, 원자로 하향유로, 노심하부, 노심 및 노심지지원통을 지나 주냉각펌프로 순환하는 폐 유로이다. 해석하고자 하는 유로는 가변단면을 가지며, 심한 곡률을 수반하고 다중벽면을 동반하게 된다. 유동특성은 정상 운전시 자연대류를 수반하고 레이놀즈수 난류유동이다. 현재 국내에서는 Fluent, CFX, STAR-CD, CFD-ACE 등의 상용 전산해석프로그램을 3차원 열 유동해석에 이용되고 있다. 그러나 이들 전산해석코드는 범용 코드로 일체형원자로 내부의 국부적인 열 유동현상에 대한 해석에 적용이 가능하나 일체형원자로 계통의 열 수력적 현상을 모사하는 데에는 현실적으로 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 이러한 복잡한 유동장을 가진 일체형원자로 계통의 열수력 해석을 목적으로 비정렬격자계를 이용한 일체형원자로의 3차원 유동해석을 위한 전용 코드 TASS-3D를 개발하고 있다. TASS-3D에는 일체형원자로의 물리적 현상을 모사하기 위한 다양한 모델이 내장되며 노심동특성 코드, 이차계통 코드 모듈 및 노심열수력 코드와 연계된다. 또한 일체형원자로의 3차원 해석은 계산에 사용되는 격자의 구조가 매우 복잡하고 그 수가 방대하게 되어 계산 격자생성 및 계산조건 설정을 위한 전처리 작업과 계산 결과 확인을 위한 후처리작업의 효율성을 고려하여 다양한 기능을 가진 전/후처리 프로세서를 개발하고 있다.

현재 TASS-3D는 단상유동 해석에 적용이 제한되고 있으나 일체형원자로의 정상 및 과도상태에서 예상되는 2-상유동을 포함하는 일체형원자로 3차원 열유동해석 전용코드 개발을 최종목표로 현재 관련 연구를 수행 중에 있다.

## 2. TASS-3D 코드 구조 및 해석 방법

본 연구에서는 대부분의 상용 전산유체해석 코드에서 채택하고 있는 특성을 유지하고 일체형원자로의 특성을 반영하여 일체형원자로 계통의 3차원 열수력적 거동을 모사할 수 있는 전용 프로그램을 개발하고 있다. 즉, 복잡한 형상에서의 유동현상을 해석하기 위하여 일반 비 직교좌표계를 사용하였으며 유한체적법 (FVM, Finite Volume Method)에 근간을 둔 비엇물림격자계(non-staggered grid)를 사용하였다.

압력방정식은 ICCG (Incomplete Conjugate Gradient) 방법을 사용하였으며 압력의 Decoupling 현상을 방지하기 위하여 Rhie-Chow 운동량 보간법<sup>1)</sup>을 사용하였다.

## 2.1 지배 방정식

일차계통의 열수력 해석을 위하여 질량, 운동량 및 에너지에 대한 3차원 지배 방정식을 적용한다.

### - 질량 지배 방정식

일차계통 가운데에서 가압기를 제외한 영역은 단상 액체로서 비압축성 유동을 가정할 수 있다. 이러한 경우 질량 지배방정식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

여기서  $\bar{u} = (u_x, u_y, u_z)$ 는 직교좌표계에서의 속도 벡터를 나타낸다.

### - 운동량 지배 방정식

비압축성 유동의 운동량 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \bar{g} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력,  $\mu_{eff}$ 는 유효점성,  $\bar{g}$ 는 중력 가속도 벡터를 나타낸다. 유효점성은  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 에 의하여 계산되는데  $\mu$ 는 액체 점성이고  $\mu_t$ 는 난류에 의한 점성이다.  $\mu_t$ 계산을 위하여 난류모델이 사용되는데 이를 위하여 추가의 지배 방정식들이 적용되는데 이는 추후에 기술한다.

### - 에너지 지배 방정식

비압축성 유동의 에너지 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \nabla \cdot (\bar{u} T) = \kappa \nabla^2 T + \dot{Q}_{core} - \dot{Q}_{sg} \quad (3)$$

여기서  $C_p$ 는 비열,  $T$ 는 온도,  $\kappa$ 는 열확산계수,  $\dot{Q}_{core}$ 는 노심의 열생성율,  $\dot{Q}_{sg}$ 는 증기발생기에 의한 열제거율을 나타낸다.

한편, 유체의 열팽창 및 수축에 의한 밀도의 변화를 고려하여야 하는데 이를 위하여 일반적으로 많이 사용되는 모델은 Boussinesq 근사식이다. 이 모델에서는 밀도를 상수로 취급하는 대신에 온도에 의한 팽창계수를 사용하여 부력을 계산하도록 한다. 그러나 이 모델의 적용범위는 밀도의 변화량이 10%미만인 경우로 일체형원자로의 일차계통 냉각재의 밀도 변화에는 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 상태방정식을 이용한 weak compressibility 모델을 사용한다. 즉 밀도계산을 위하여  $\rho = \rho(p, T)$ 의 상태 방정식을 사용하는데 압력에 의한 압축성은 무시하여  $\rho = \rho(p_{ref}, T)$ 로 가정한다. 여기서  $p_{ref}$ 는

상수 압력이다.

## 2.2 수치 해법

비압축성 유동을 위한 수치해법은 크게 나누어서 완전 음해법 (fully implicit method) 및 반 음해법 (semi implicit method)으로 구별할 수 있다. 완전 음해법의 대표적인 방법은 SIMPLE (Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations)<sup>2)</sup> 및 이의 변형된 방법들이 있다. 이 방법의 계산 순서를 간략히 나타내면 다음과 같다.

① 가정된 압력 ( $p^{m*}$ ) 및 이전 차분 시간에서의 속도를 이용하여 운동량 방정식 계산 (음해법 적용)

$$u^{m*} = f(u^{m*}, p^{m*}) \quad (4)$$

여기서  $u^{m*}$ 은 반복 계산 수  $m$ 에서의 속도로 \*는 질량 보존 방정식을 만족하지 않음을 나타낸다.

② ①에서 계산된 속도장이 질량 보존 방정식을 만족하도록 압력 및 속도 수정

$$p^m = p^{m*} + p', u^m = u^{m*} + u' \quad (5)$$

여기서  $p'$  및  $u'$ 는 질량보존 방정식을 만족시키기 위한 압력 및 속도이다.

③ ②에서 계산된 압력과 속도장이 운동량 방정식을 만족하면 새로운 차분시간 진행

$$p^{n+1} = p^m, u^{n+1} = u^m \quad (6)$$

여기서  $n+1$ 은 새로운 차분시간을 나타낸다.

④ ②에서 계산된 압력과 속도장이 운동량 방정식을 만족하지 않으면 ①부터의 반복계산을 수행한다. 이때,  $p^{m*} = p^m$  및  $m = m + 1$ 의 값을 사용한다.

이 계산 방법은 정상상태뿐만 아니라 과도상태의 유동장을 비교적 큰 차분시간으로 계산 할 수 있어서 전산 유체해석에 널리 사용되고 있다. 그러나 본 연구의 주 목적인 일체형 원자로의 급격한 과도현상 계산 시 반복계산의 수가 증가하고 운동량 방정식을 음해법으로 계산하는 과정에서 사용되는 under-relaxation factor의 값들이 경험적으로 결정되는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 운동량 계산을 양해법으로 수행하여 반복계산 과정을 피하도록 하는 SMAC (Simplified Marker And Cell)<sup>3)</sup> 방법을 적용하였다. 이 방법의 계산 순서는 SIMPLE의 반복 계산을 제외한 것과 유사하다.

① 이전 차분 시간에서의 속도( $u^n$ ) 및 압력( $p^n$ )을 이용하여 운동량 방정식 계산 (양해법 적용)

$$u^* = f(u^n, p^n) \quad (7)$$

여기서, 첨자 \*는 질량 보존 방정식을 만족하지 않음을 나타낸다.

② ①에서 계산된 속도장이 질량 보존 방정식을 만족하도록 압력 및 속도 수정

$$p^{n+1} = p^n + p', u^{n+1} = u^n + u' \quad (8)$$

여기서  $p'$  및  $u'$ 는 질량보존 방정식을 만족시키기 위한 압력 및 속도이다.

③ 새로운 차분시간 진행

### 2.3 차분 방법

2.1 절에서 기술된 지배 방정식들은 시간 및 공간에 대한 차분화 과정을 거쳐서 선형 연립 방정식의 형태로 나타낸다. 차분 방법으로는 유한 체적법을 적용하였다. 유한 체적법에서는 계산공간을 정렬 격자(structured grid) 및 비정렬 격자(unstructured grid)로 분할하여 각각의 계산 셀(cell)에 대하여 지배 방정식을 적분한다. 이 방법은 일반적인 유한 차분법 (FDM, Finite Difference Method)에 비하여 격자 형태를 자유롭게 구성할 수 있으므로 복잡한 기하학적 형상을 가진 계산공간을 효과적으로 차분할 수 있다.

지배 방정식들은 각각의 계산 셀에 대하여 다음과 같이 적분을 적용한다. 여기서는 편의상 x성분에 대한 식을 나타내었다. 그림 1은 계산 셀의 예를 나타낸다.

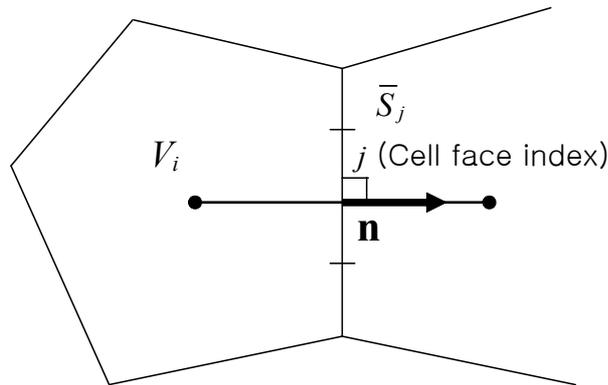


그림 1 차분 적분을 위한 계산 셀

- 비정상항

$$\int_{V_i} \frac{\partial u}{\partial t} dV \approx V_i \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (9)$$

- 대류항

대류항, 구배항 및 확산항은 Gauss 정리를 이용하여 면적분으로 변환하여 계산한다.

$$\int_{V_i} \nabla \cdot (\bar{u}u) dV = \int_{S_j} \bar{u} \bar{u} \cdot \bar{n} dS \approx \sum_j u_j (\bar{u}_j \cdot \bar{S}_j) \quad (10)$$

- 구배항

$$\int_{V_i} \nabla p dV = \int_{S_j} p \bar{i}_x \cdot \bar{n} dS \approx \sum_j p_j (\bar{i}_x \cdot \bar{S}_j) \quad (11)$$

- 확산항

$$\int_{V_i} \nabla \cdot \nabla u dV = \int_{S_j} \nabla u_j \cdot \bar{n} dS \approx \sum_j \nabla u_j \cdot \bar{S}_j \quad (12)$$

- 체력항

$$\int_{V_i} g_x dV \approx V_i g_x \quad (13)$$

유한 체적법에서 격자의 형태는 자유롭게 선택할 수 있으나 계산의 안정성을 위하여 한 가지 중요한 조건을 만족하여야 한다. 이는 이웃하는 격자들이 직교성 (orthogonality)을 유지하여야 한다는 점이다. 그림 1은 직교성을 만족하는 계산 셀을 나타내는데, 이웃하는 두 셀의 중심점을 이은 선은 셀면과 직각으로 만나며 셀면의 중심점을 통과하여야 한다. 이러한 조건을 만족하는 격자 구조는 계산의 효율성 및 수렴성 측면에서 매우 중요하다.

속도 및 압력 변수의 배치는 엇물림 격자 (staggered grid)의 경우 셀 중앙에 압력 변수를 배치하고 셀 면에 속도변수를 정의하지만 본 연구에서는 유한 체적법을 적용함에 따라 비엇물림 격자를 사용하게 되고 이에 따라 속도 및 압력 변수가 셀 중앙에 위치하게 된다. 이러한 격자구조를 collocated 격자라고 부르는데, 이러한 격자구조에서는 속도 및 압력의 진동 현상이 흔히 발생한다. 이를 방지하기 위하여 Rhie-Chow 보간법을 사용하였다. 이 방법에 의하면 셀  $i1$ 과  $i2$  사이의 셀면의 속도  $\bar{u}_f$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{u}_f = w(\bar{u}_{i1} + \frac{\Delta t V_{i1}}{\rho_{i1}} \nabla p_{i1}) + (1-w)(\bar{u}_{i2} + \frac{\Delta t V_{i2}}{\rho_{i2}} \nabla p_{i2}) - \frac{\Delta t S_f}{\rho_f} (p_{i2} - p_{i1}) \frac{\bar{r}_{i2i1}}{|r_{i2i1}|} \quad (14)$$

식 (14)의 우변의 세 번째항은 이웃한 두셀의 압력 진동을 감지하여 셀면 속도를 보정하는 역할을 한다.

### 3. 물리현상 모델

일체형 원자로의 성능해석을 수행하기 위해서는 여러 가지 물리적 현상을 모사할 수 있는 수학적 모델이 필요하다. 이들은 구체적으로 주냉각재 펌프 모델, 노심 동특성 모델, 노심 열전달 모델, 증기 발생기 열전달 모델, 이차 계통 모델 등이다. 또한 압력 용

기 내부의 구조물들을 위한 다공 매질 모델 및 고 레이놀즈 유동영역을 해석할 수 있는 난류 모델이 추가 되어야 한다.

주냉각재 펌프 모델 및 다공매질 모델은 지배방정식에 추가적인 변수를 도입함으로써 계산되도록 한다. 예를 들어 운동량 방정식은 다음과 같이 수정된다.

$$\rho\gamma\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho\nabla \cdot ((\bar{K} \cdot \bar{u})\bar{u}) = -\gamma(\nabla p - \nabla p_{MCP}) + \nabla \cdot (\mu_{eff}(\bar{K} \cdot \nabla \bar{u})) + \gamma\bar{g} - \gamma\bar{R} \cdot \bar{u} \quad (15)$$

여기서  $\gamma$ 는 다공매질 밀도,  $\bar{K}$ 는 다공매질 면적 tensor,  $\bar{R}$ 은 다공매질 저항 벡터,  $\nabla p_{MCP}$ 는 주냉각재 펌프에 의한 압력 구배를 나타낸다.

노심 동특성 모델을 위하여 3차원 노심 모사 코드 별도로 개발되어 연계되며, 노심열 전달 모델, 증기발생기 열전달 모델 및 이차계통 모델은 TASS/SMR 코드<sup>4)</sup>의 1차원 모델이 사용된다.

#### 4. 프로그램 검증

TASS-3D 코드의 개발의 주요한 목적 중의 하나는 일체형원자로 일차계통의 비대칭 유동현상 해석으로 특히 유량이 적은 자연대류 운전 중의 유동 해석이다. 따라서 개발된 코드는 이와 같은 현상을 모사할 수 있는가에 대한 검증이 수행되어야 한다. 본 연구에서는 2차원 및 3차원 자연 대류에 대한 검증계산을 수행하여 그 예측능력을 평가하였다.

##### 4.1 2차원 자연대류 검증

2차원 자연대류의 검증계산을 위하여 De Vahl Davis<sup>5)</sup>에 의하여 제안된 표준 문제에 대한 해석을 수행하였다. 계산 조건은 그림 2에 나타낸 바와 같다. Prandtl 수는 0.71이고 Raleigh 수는  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ , 및  $10^6$ 인 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 계산 격자는  $20 \times 20$  정렬 격자 및 3702개의 비정렬 격자를 사용하였다. 그림 3은 계산 격자를 나타낸다. Ra 수가 인 경우 온도 및 속도 분포는 그림 4에 나타나 있다.

TASS-3D 코드에 의한 계산 결과는 De Vahl Davis의 계산 결과 및 Akiyama 및 Yakawa의 계산 결과와 비교하여 표 1에 나타내었다. TASS-3D에 의한 계산 결과는 De Vahl Davis의 계산 결과에 비하여 1% 내외의 오차를 보이고 있는데 이는 다른 계산 결과에 비하여 정확한 것으로 나타났다.

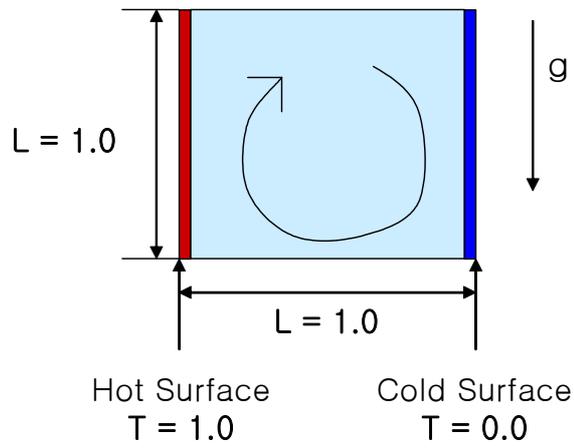


그림 2 2차원 자연대류 계산 조건

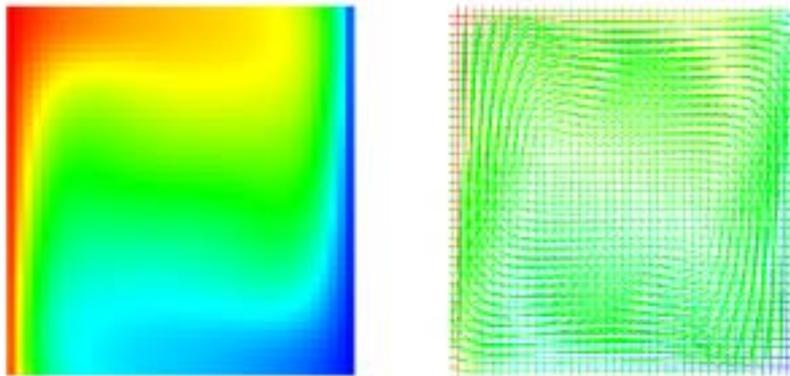
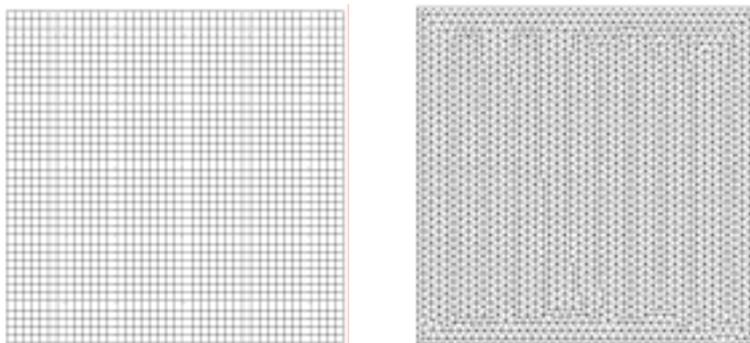


그림 3  $Ra = 105$  인 경우의 온도 및 속도 벡터



정렬 격자 ( $20 \times 20$ )

비정렬 격자 (3702)

그림 4 2차원 자연 대류 계산 격자

#### 4.2 3차원 자연대류 검증

3차원 자연대류의 검증계산은 Leong<sup>6)</sup>의 실험결과를 인용하였다. 그림 5에는 실험 장치의 개략도가 나타나 있다. 정육면체의 두면에 등은 조건을 유지시키며 나머지 4개의 면은 고온과 저온사이의 선형 변화를 유지하도록 되어있다. 정육면체는 수평면에 대하여  $\psi$ 의 각도를 이루게 되어 있는데 이를 변화시켜가며 자연대류에 의한 열전달을 측정하였다. 계산 격자는  $20 \times 20 \times 20$  및  $40 \times 40 \times 40$ 의 정렬격자에 대하여 수행하였다. 그림 6에는 Ra 수  $10^5$ , 경사각  $45^\circ$  인 경우의 온도 및 속도에 대한 계산 결과를 나타내었다. 표 2에는 계산된 Nu 수와 실험 결과와의 비교를 나타내었는데 5% 이내의 일치를 보이고 있다.

	Ra= $10^3$		Ra= $10^4$		Ra= $10^5$		Ra= $10^6$	
	Hot	Cold	Hot	Cold	Hot	Cold	Hot	Cold
<b>Pilot Code (40X40)</b>	1.128 (0.89)*	1.128	2.260 (0.76)*	2.260	4.576 (1.26)*	4.576	8.665 (1.53)*	8.665
<b>Unstructured (3702)</b>							8.792 (0.09)*	8.768 (0.36)*
Akiyama (FVM, 40X40)	1.209 (8.14)*	1.034 (7.51)*	2.276 (1.47)*	2.215 (1.26)*	4.611 (2.04)*	4.604 (1.88)*	9.485 (7.78)*	9.484 (7.77)*
Yakawa (FEM, 50X50)	1.239 (10.8)*	0.996 (10.9)*	2.252 (0.40)*	2.194 (2.18)*	4.464 (1.22)*	4.449 (1.55)*	8.422 (4.30)*	8.420 (4.32)*
De Vahl Davis (FDM, 40X40)	<b>1.118</b>		<b>2.243</b>		<b>4.519</b>		<b>8.8</b>	

\* : 오차 (%)

표 1 2차원 자연대류 계산의 Nu 수 비교

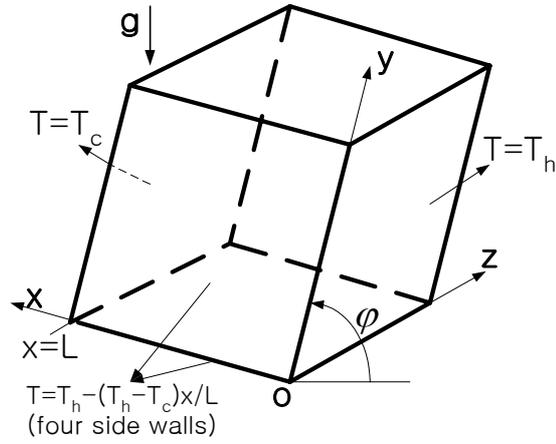
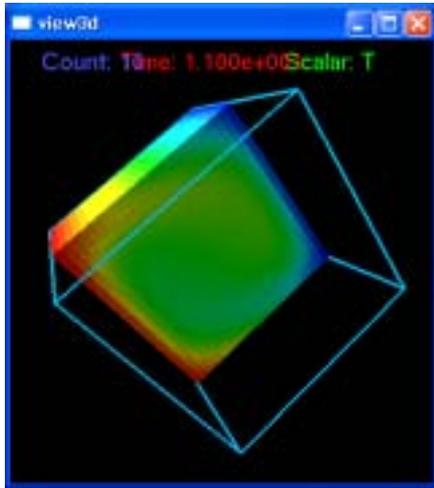
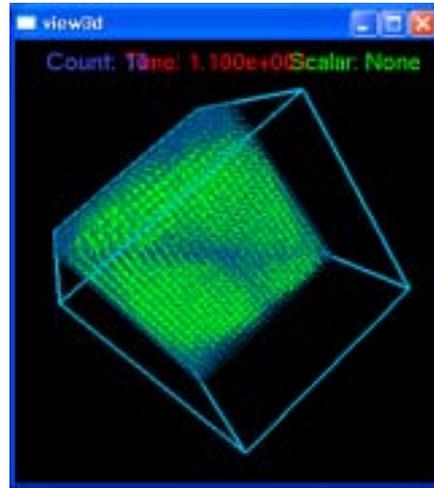


그림 5 3차원 자연대류 실험 개략도



온도 분포



속도 분포

그림 6 3차원 자연대류 계산 결과 ( $Ra = 10^5$ ,  $\psi = 45^\circ$ )

경사각	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
계산/실험			
Pilot Code (25x25x25) (40x40x40)	3.167	3.540	3.957 3.954
실험 (Leong)	3.097 (0.028)	3.492 (0.034)	3.916 (0.042)

표 2 3차원 자연대류 계산 결과, 저온면의 Nu 수 ( $Ra = 10^5$ )

## 5. 전/후처리 프로세서

3차원 해석은 1차원해석과 달리 계산에 사용되는 격자의 구조가 매우 복잡하고 그 수가 방대하게 되어 해석 알고리즘의 개발과 함께 다양한 과도상태 계산을 위한 해석 조건 설정, 계산 격자 생성 및 계산 결과 확인을 위한 전/후처리 프로세서의 개발 또한 매우 중요하다.

전처리 프로세서는 3차원 유동장 해석코드의 계산 알고리즘에 적합한 계산 격자를 구성하여 이에 대한 표면 형상 정보와 해석영역내부의 격자 위치정보를 해석코드의 입력 파일로 저장한다. 후처리 프로세서는 3차원 유동장 해석코드의 계산결과를 그래픽을 이용하여 효과적으로 분석할 수 있는 기능을 제공한다. 이를 위하여 일차냉각재 계통에 대한 3차원 그래픽, Vector 표시, Contour 그래프 및 주요 변수들의 추세 그래프 등을 사용자 선택에 의하여 화면에 출력시킨다. 연계모듈은 3차원 유동장 해석 코드와 노심열전달 모델, 증기발생기 열전달 모델 등의 프로그램과 연결하여 해석시스템을 구성하여 해석이 진행되도록 연계한다. 개발환경은 Microsoft Windows 2000 컴퓨터 운영체제와 Visual C++언어를 사용하고 있다.

전/후처리 프로세서는 Microsoft Windows 2000이상의 컴퓨터 운영체제에서 운용이 가능하도록 개발하고 있으며 3차원 그래픽스 Library는 향후 확장성을 고려하여 Open GL을 사용하고 있다. Open GL은 상업계에서 가장 광범위하게 사용되는 3차원 Graphics API(application programming interface)로 Unix/Linux 상의 X-Windows 및 Windows NT, Windows 98 등에서 사용이 가능하다.

전/후처리 프로세서는 한개의 Front End GUI에 의해 통합되며 일체형원자로 일차냉각재 계통의 3차원 유동장 해석을 위한 입력과 출력을 제공한다.

전처리 프로세서는 일체형원자로의 복잡한 기하학적 구조를 단순화시킨 몇 개의 블록으로 모델링 한다. 주요 구성 유로는 노심하부 공동, 노심, 노심상부 유로 노심상부 공동, 증기발생기 입.출구, 증기발생기 일차측 유로로 구성된다. 각 블록의 형태는 Front end GUI를 통하여 사용자가 정의하거나 저장된 형상정보를 이용할 수 있도록 개발하고 있다. 그림 7은 전처리 프로세스의 화면구성을 보여주고 있다.

후처리 프로세서는 원자로 계통의 각 구성요소들에 대한 실제 형태 및 격자 구성 형태를 나타내고 그 내부에는 온도, 압력, 유량 등과 같은 정보를 색채와 명암을 이용하여 표시한다. 각각의 구성요소는 선택적으로 표시가능하며 계산된 물리량의 효과적인 표시를 위해 선택된 물리량의 범위를 사용자가 지정할 수 있도록 하고 있다. 계산 결과의 가시화를 위해 Vector plot, Contour plot, Stream line plot, Animation, X-Y graph로 표시하도록 개발하고 있다.

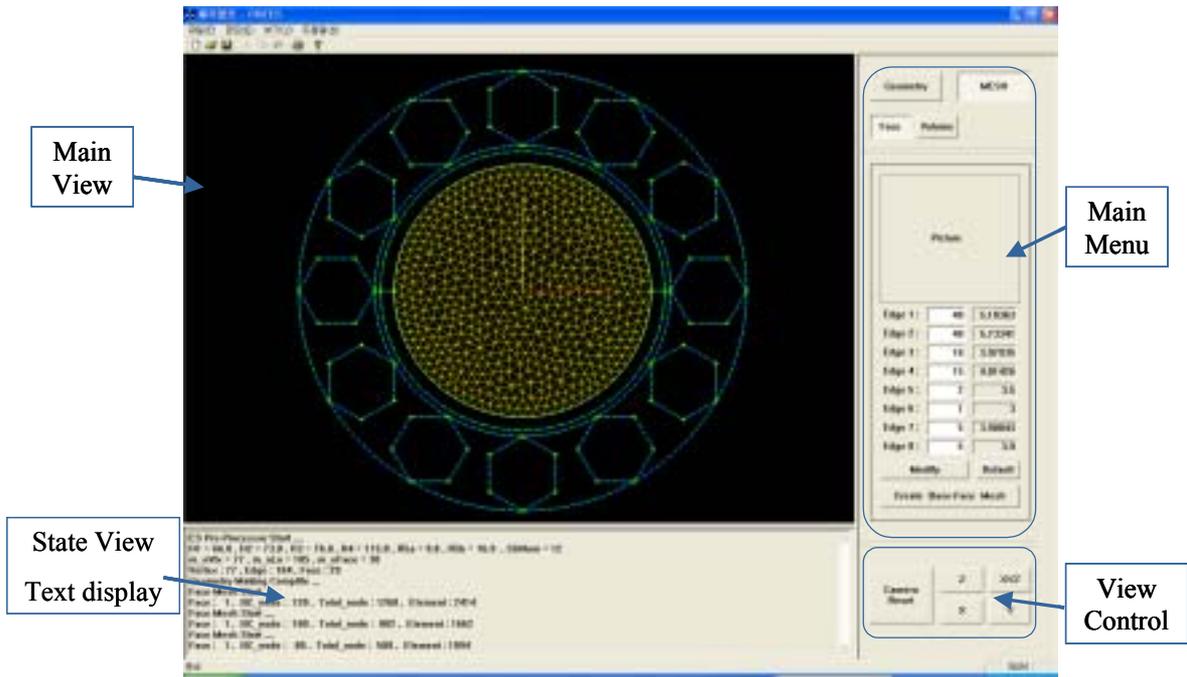


그림 7 전처리 프로세서의 구성 요소

## 6. 결론 및 향후 계획

최근 전산해석 기술의 발전과 컴퓨터 성능의 향상으로 일체형원자로 SMART와 같이 복잡한 형상을 가진 원자로냉각재 계통의 3차원 유동 해석이 가능하게 되었다. 일체형원자로는 복잡한 유로 형상 때문에 1차원적 해석과 3차원적 해석은 많은 차이가 있다. 특히, 열 과 물질 혼합이 3차원 유동장에서 발생하는 경우 1차원적 해석으로는 유동특성의 확인이 어려워 3차원 열유동 해석의 중요성이 증가하고 있다.

본 연구에서는 복잡한 유동장을 가진 일체형원자로 계통의 3차원 열수력적 거동을 모사하기 위한 일체형원자로 전산해석 전용 프로그램 TASS-3D를 개발 중에 있다. TASS-3D는 복잡한 형상에서의 유동현상을 해석하기 위하여 일반 비 직교좌표계를 사용하였으며 유한체적법에 근간을 둔 비 엷물림격자계를 사용하였다. TASS-3D 코드의 3차원 유동장 해석 모듈의 검증을 목적으로 2차원 자연대류 표준문제와 3차원 공동내의 자연대류실험에 대한 수치계산을 수행하여 비교하였다. 그 결과 본 연구에서 개발한 프로그램은 이들 현상을 잘 예측하여 일체형원자로에서 예상되는 유동현상을 성공적으로 예측할 수 있는 것으로 평가 되었다.

TASS-3D에는 일체형원자로의 물리적 현상을 모사하기 위한 다양한 모델이 내장 되며 노심 동 특성 코드, 이차계통 코드 모듈 및 노심열수력 코드와 연계된다. 현 단계에서 TASS-3D는 단상 3차원 열유동 해석에 적용이 제한되고 있으나 차기단계에서는 일체형원자로의 정상 및 과도상태에서 예상되는 2-상유동을 포함하는 일체형원자로 3차원 열유동해석 전용코드로 개발할 계획이다.

## 7. 참고 문헌

- 1) Rhie, C.M., and Cow, W.L., "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", *AIAA J.*, Vol 21, pp1525-1532, 1983.
- 2) Patanker, S.V., and Splading, D.B., "A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 15, pp1787-1806, 1972.
- 3) Welch, J.E., et al., "The MAC method - A Computing Technie for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid-Flow Problems Involving Free Surface", *LA-3425*, 1966.
- 4) Yoon, H.Y. et al., "Thermal Hydraulic Model Description of TASS/SMR," *KAERI/TR-1835/2001*, 2001.
- 5) G. de Vahl Davis, "Natural Convection of Air in a Square Cavity : A bench Mark Numerical Solution," *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, Vol 3, pp249-264, 1983.
- 6) Leong, W.H. et al., "Experimental Nusselt Numbers for a Cubical-Cavity Benchma71 Problem in Natural Convection," *Int. J. Heat and Mass transfer*, Vol.42, pp1979-1989, 1999.