

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 연구로 성능해석을 위한 3차원 모사 코드 개발

Development of a 3-D Computer Program for Performance Analyses
of the SMART Research Reactor

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

요 약

SMART 연구용 원자로는 노심, 증기발생기, 주 냉각재 펌프, 가압기 등이 모두 원자로 압력용기 내에 위치하는 일체형 원자로로서 기존 가압경수로에 비하여 복잡한 내부구조를 갖는다. 이와 같은 계통의 성능해석을 수행하기 위해서는 3차원 계통모사 코드가 필요하며, 이를 위하여 본 연구에서는 3차원 성능해석 코드인 TASS-3D를 개발하였다. 이 코드는 3차원 노심 동특성 코드 모듈, 일차계통의 3차원 유동장 해석 코드 모듈, 이차계통 및 잔열제거계통의 1차원 해석 코드 모듈, 동력변환 계통 코드 모듈로 구성된다. 그 이외에 3차원 유동장 해석을 위한 격자 생성 프로그램 및 3차원 출력 가시화 프로그램 개발을 수행하였다. 개발된 코드를 사용하여 출력 운전 모드 및 성능시험 운전의 모의 계산을 수행하여 적용 타당성을 확인하였다.

Abstract

SMART research reactor is a system integrated modular type reactor where all the major components such as reactor core, steam generator, main coolant pump and pressurizer are installed in a single pressure vessel and thus forms the complicated geometry of the primary coolant system compared to that of the conventional pressurized water reactor. In the present study, a 3-dimensional computer code TASS-3D is developed for the performance analysis of SMART research reactor consisted of the complicated flow geometry. It consists of several code modules of the 3-dimensional core kinetics, 3-dimensional primary coolant flow solver, 1-dimensional secondary/PRHR system and balance of plant models. Operational transients have been analyzed using the code and the results predicted the 3-dimensional system behavior successfully.

1. 서론

SMART 연구용 원자로는 노심, 증기발생기, 주 냉각재 펌프, 가압기 등의 주요 구성 요소가 모두 원자로 압력용기 내에 위치하는 일체형 원자로이다. 일체형 원자로의 일차 냉각계통의 냉각재 유로는 상용 가압경수로의 경우 파이프 연결에 의하여 구성되는 것에 비하여 압력용기내의 폐쇄된 복잡한 3차원 구성을 갖는다. 이와 같은 계통에 대하여 일차원 계산코드를 사용한 성능해석을 수행할 경우 크게 두 가지 측면에서 부적절한 결과를 예측할 수 있다. 첫째로 노심출구와 주냉각재 펌프를 경유하여 증기발생기에 이르는 유로와, 증기발생기 출구로부터 노심입구에 이르는 유로에서 발생하는 냉각재 혼합에 대한 예측이 어렵다. 특히 노심 하부에서 발생하는 냉각재 혼합은 노심의 열적 여유도에 큰 영향을 준다. 일반적으로 일차원 해석의 경우 냉각재 혼합 비율을 상수로 가정하는데 이를 위하여 다양한 운전조건에서의 실험값이 필요하다. 둘째로 SMART 연구용 원자로의 경우 주냉각재 펌프가 정지한 상태의 자연대류에 의한 운전을 허용하고 있는데, 이러한 조건에서의 성능 해석을 수행하기 위해서는 다양한 내부 유로 변화에 따른 속도 벡터를 적절히 예측하여야 한다.

본 연구에서는 SMART 연구용 원자로의 성능해석을 위하여 3차원 계산 코드인 TASS-3D를 개발하였다. 이 코드는 원자로 노심, 일차냉각계통, 이차/잔열제거 및 보조설비계통에 대한 3개의 코드 모듈로 구성된다. 원자로 출력은 3차원 노심 동특성 코드인 MASTER¹⁾를 사용하여 계산하며, 일차 냉각계통의 유동장의 계산에는 유한 체적법을 적용한 3차원 해석코드²⁾ FAST (Flow Analyzer for System Transient)가 적용되며, 이차/잔열제거 및 보조설비계통에 대한 모사는 일차원 안전해석코드인 TASS/SMR³⁾을 이용하였다.

일차계통 해석을 위한 3차원 해석코드로서는 현재 국내에 Fluent, CFX, STAR-CD, CFD-ACE 등의 상용 전산해석프로그램이 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 코드를 개발하여 TASS-3D의 모듈로 연계하였다. 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.

본 논문에서는 이들 연구결과 중 일체형원자로 3차원 해석 코드 TASS-3D의 특성, 코드 모듈 및 연계 구조와 3차원 해석 코드를 SMART 연구용 원자로의 적용하여 수행한 예비성능해석 결과를 기술하였다. TASS-3D를 사용하여 SMART 연구용 원자로의 예비 성능해석을 수행하였다. 출력 운전 조건으로는 전출력 상태와 자연대류 상태의 25%출력인 경우에 대한 계산을 수행하였으며, 성능시험 운전 조건으로는 50%출력에서의 증기발생기 2구역 차단 및 주냉각재 펌프 1대 정지 상태의 모의 계산을 수행하였다.

2. TASS-3D 코드 구조

위에 기술된 바와 같이 TASS-3D 코드는 크게 3개의 모듈로 구성되어 있다. 주 프로

그림의 역할은 TASS/SMR이 수행하며 MASTER 및 유동장 해석코드 모듈을 부 프로그램의 형식으로 호출하여 계산을 수행한다. 각 코드 모듈 사이에서 정의된 입출력 인자는 표1에 나타난 바와 같다.

표1. 코드 모듈사이의 입출력 인자

코드 모듈	입력 인자	출력 인자
TASS/SMR	증기발생기 일차 냉각재 온도 증기발생기 일차 냉각재 유량	증기발생기 열전달율
MASTER	핵연료집합체내 냉각재 온도 핵연료집합체내 냉각재 밀도 핵연료집합체 핵연료 온도 반사체영역의 냉각재 온도	핵연료집합체 출력
FAST	핵연료집합체 출력 증기발생기 열전달율	핵연료집합체내 냉각재 온도 핵연료집합체내 냉각재 밀도 핵연료집합체 핵연료 온도 반사체영역의 냉각재 온도 증기발생기 일차 냉각재 온도 증기발생기 일차 냉각재 유량

2.1 3차원 동특성 코드 모듈

노심의 출력은 3차원 동특성 코드인 MASTER를 사용하여 계산한다. 이 코드는 정상 상태 및 천이상태의 사각형 또는 육각형 핵연료집합체로 구성된 원자로를 3차원으로 모사할 수 있는 노심 설계 코드로서, WH형과 CE형 그리고 SMART 연구용 원자로를 비롯한 일반 가압경수로의 노심 설계에 활용되고 있다.

2.2 3차원 유동장 해석 코드 모듈

본 연구에서는 대부분의 상용 전산유체해석 코드에서 채택하고 있는 특성을 유지하고 일체형원자로의 특성을 반영하여 일체형원자로 계통의 3차원 열수력적 거동을 모사할 수 있는 전용 프로그램 FAST를 개발하였다. 이 코드는 복잡한 형상에서의 유동현상을 해석하기 위하여 유한체적법 (FVM, Finite Volume Method)에 근간을 둔 비엇물림격자계(non-staggered grid)를 사용하였다. 적용 범위는 단상 비압축성 유체이다.

2.2.1 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.

$$\rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{u}) + \bar{g} + (R_c + R_d |u|) \bar{u} \quad (2)$$

여기서 ρ_0 는 평균 밀도, p 는 압력, μ_{eff} 는 유효점성이다. 유효점성은 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 에 의하여 계산되는데 μ 는 액체 점성이고 μ_t 는 난류에 의한 점성이다. μ_t 계산을 위하여 난류 모델이 사용되는데 이를 위하여 추가의 지배 방정식들이 적용된다. R_c 및 R_d 는 저항계수를 나타낸다. \bar{g} 는 중력 가속도 벡터를 나타내는데 온도변화에 의한 밀도변화를 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\bar{g} = \bar{g}_0 (1 + \Delta\rho/\rho_0) \quad (3)$$

여기서 \bar{g}_0 는 상수이고 $\Delta\rho$ 는 밀도의 변화량이다. 이와 같은 가정은 밀도의 변화량이 비교적 적을때 (10% 미만) 유효한데, SMART 연구용 원자로의 운전 범위를 고려하면 이 가정은 타당하다.

- 에너지 지배 방정식

비압축성 유동의 에너지 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \nabla \cdot (\bar{u} T) = \kappa \nabla^2 T + \dot{Q}_{core} - \dot{Q}_{sg} \quad (4)$$

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

2.2.2 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)⁴⁾ 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)

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

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

$$p^m = p^{m*} + p', u^m = u^{m*} + u' \quad (6)$$

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

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

$$p^{n+1} = p^m, u^{n+1} = u^m \quad (7)$$

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)⁵⁾ 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)

$$u^* = f(u^n, p^n) \quad (8)$$

여기서, 첨자 *는 질량 보존 방정식을 만족하지 않음을 나타낸다.

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

$$p^{n+1} = p^n + p', u^{n+1} = u^* + u' \quad (9)$$

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

③ 새로운 차분시간 진행

2.2.3 차분 방법

2.2.1 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.

- 비정상항

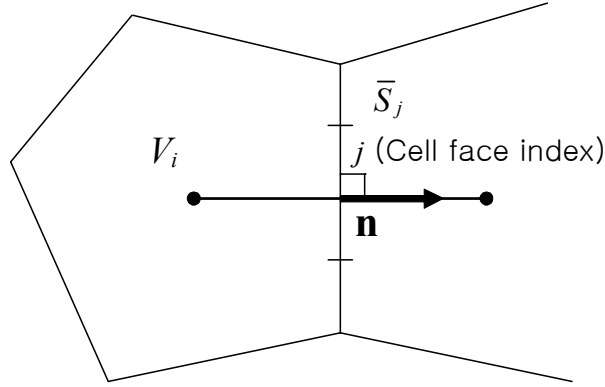


그림 1 차분 적분을 위한 계산 셀

$$\int_{V_i} \frac{\partial u}{\partial t} dV \approx V_i \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (10)$$

- 대류항

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

$$\int_{V_i} \nabla \cdot (\bar{u}u) dV = \int_{S_j} \bar{u}u \cdot \bar{n} dS \approx \sum_j u_j (\bar{u}_j \cdot \bar{S}_j) \quad (11)$$

- 구배항

$$\int_{V_i} \nabla p dV = \int_{S_j} p \bar{i}_x \cdot \bar{n} dS \approx \sum_j p_j (\bar{i}_x \cdot \bar{S}_j) \quad (12)$$

- 확산항

$$\int_{V_i} \nabla \cdot \nabla u dV = \int_{S_j} \nabla u_j \cdot \bar{n} dS \approx \sum_j \nabla u_j \cdot \bar{S}_j \quad (13)$$

- 체력항

$$\int_{V_i} g_x dV \approx V_i g_x \quad (14)$$

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 압력변수를 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 보간법⁶⁾을 사용하였다. 이 방법에 의하면 셀 $i1$ 과 $i2$ 사이의 셀면의 속도 \bar{u}_f 는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{u}_f = w\left(\bar{u}_{i1} + \frac{\Delta t V_{i1}}{\rho_{i1}} \nabla p_{i1}\right) + (1-w)\left(\bar{u}_{i2} + \frac{\Delta t V_{i2}}{\rho_{i2}} \nabla p_{i2}\right) - \frac{\Delta t S_f}{\rho_f} (p_{i2} - p_{i1}) \frac{\bar{r}_{i2i1}}{|r_{i2i1}|} \quad (15)$$

식 (15)의 우변의 세 번째항은 이웃한 두셀의 압력 진동을 감지하여 셀면 속도를 보정하는 역할을 한다.

2.3 이차냉각, 잔열제거 및 보조설비계통 코드 모듈

SMART 연구용 원자로의 이차냉각계통, 잔열제거계통 및 보조설비계통은 일차원 안전 해석코드인 TASS/SMR의 계산 모델을 적용한다. TASS/SMR 코드에서는 계산 대상을 노드와 유로로 모델하는데, 노드는 유체의 질량 및 에너지를 정의하는 제어체적을 나타내고 유로는 유체의 운동량을 정의하기 위하여 이웃한 노드의 중심을 연결한다. 일차원 질량 및 에너지 방정식은 노드에 적용되며, 운동량 보존 방정식은 각 유로에 대하여 성립한다. 그림 2는 이차 냉각계통과 잔열제거계통에 대한 TASS/SMR의 노드와 유로 구성을 나타낸다. TASS/SMR 코드에는 지배방정식 이외에 노심 열전달 모델, 증기발생기 열전달 모델, 잔열제거계통 열교환기 모델, 보조설비계통 모델 등이 포함되어 있으며 이들은 TASS-3D 코드에서도 동일하게 적용된다.

2.4 전/후 처리 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 운용체제와 Visual C++언어를 사용하고 있다.

전/후처리 프로세서는 Microsoft Windows 2000이상의 컴퓨터 운용체제에서 운용이

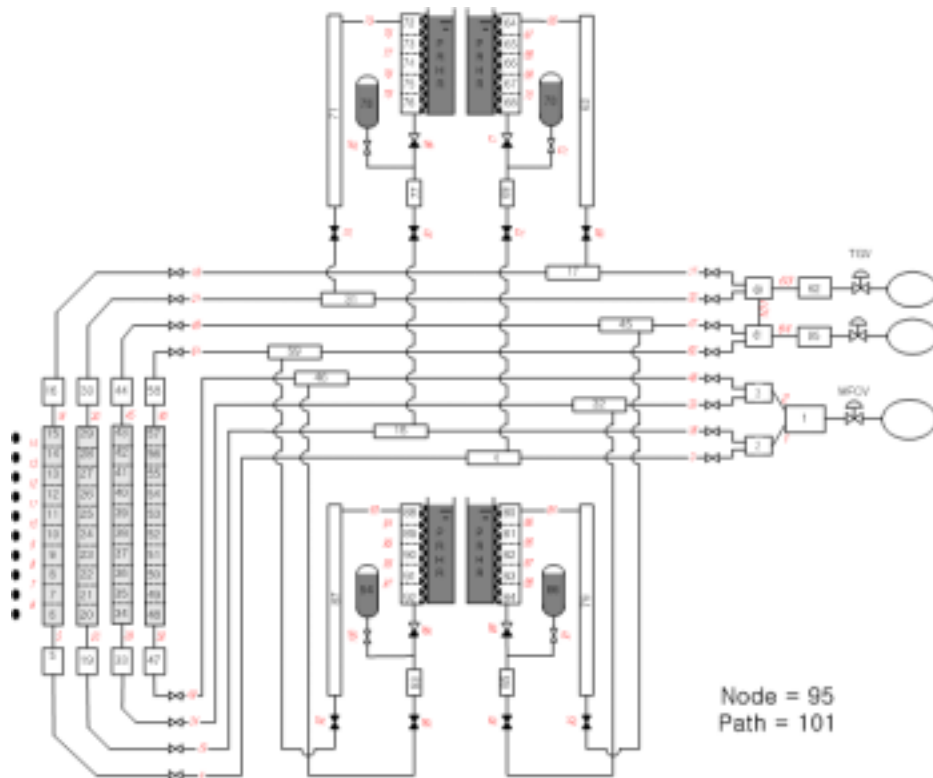


그림 2 TASS/SMR의 노드 및 유로구성

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.

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.

3. 성능 해석

SMART 연구용 원자로의 정상운전은 주냉각재 펌프의 작동상태에 따라 고속, 저속, 정지 모드로 구분되며 이 때의 출력 변위는 각각 20 - 100%, 20 - 36%, 20 - 25% 이다. 본 논문에서는 주냉각재 펌프가 고속인 100% 출력 상태와, 정지상태에 자연대류에 의한 25% 출력 운전상태를 모의하였다. 또한 성능시험 운전 모드로서 50% 출력인 경우 증기발생기 2구역 차단 및 주냉각재 펌프 1대 정지 상태의 모의 계산을 수행하였다.

3.1 정상 운전 조건

주냉각재 펌프가 고속인 상태의 100%출력 운전의 경우 노심 입출구 온도는 각각 274.4℃와 310℃ 이며 노심 입구 유량은 275 kg/sec 이다. 한편 자연대류 상태의 25% 출력운전의 노심 입출구 온도는 각각 239.43℃ 와 310℃이다. 운동량 보존방정식 (2)의 저항계수는 전 출력상태의 계통 압력 손실과 자연대류 상태의 노심출구온도 조건에 의하여 결정한다. 즉, 식(2)의 저항계수항을 다음과 같이 정의한다.

$$R(fr + (1-fr)|u|\bar{u}) \quad (16)$$

여기서 R 은 전 출력조건에서 주어진 압력 손실이 발생하도록 결정하고 fr 은 자연대류 상태의 노심출구온도 조건으로부터 구한다. 그림 3은 fr 의 변화에 따른 노심출구온도를 나타내었는데 이에 따르면 $fr = 0.027$ 에서 설계값과 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 전 출력 상태에서 TASS-3D에 의하여 계산된 일차냉각계통의 온도분포 및 속도 벡터를 나타낸다.

3.2 성능시험 운전 조건

SMART 연구용 원자로는 50%출력 상태에서 증기발생기 2구역 차단 및 주냉각재 펌프 1대 정지운전을 허용하고 있으나 이에 대한 구체적인 설계조건은 확정되지 않은 상태이다. 본 논문에서는 전 출력 정상상태로부터 계산을 시작하여 노심 출력을 50%로 감소시키고, 이와 동시에 증기발생기 2구역을 차단시키거나 주냉각재 펌프 1대를 정지시키는 과도상태의 계산을 수행하여 계통의 성능을 평가하였다. 그림 5 및 6은 증기발생기 2구역 차단 운전시의 노심 입출구 및 증기발생기 출구온도를 나타낸다. 안정화된 상태의 노심 출구온도는 약 300℃인 반면에 격리된 증기발생기의 입구온도는 약 313℃로서 높게 나타났다. 이의 원인은 그림 7에서와 같이 냉각재의 열적 혼합이 비교적 적게 발생하였기 때문이다. 그림 8는 주냉각재 펌프 1대 정지 운전시의 노심 입출구 온도를 나타내는데, 노심 출구 평균 온도는 약 318℃로서 최대 온도 322℃와 거의 일치한다. 이는 냉각재의 열적 혼합이 비교적 잘 이루어졌음을 나타낸다. 이 것은 그림 9에서도 알 수 있는데 정지된 주냉각재 펌프에 의한 증기발생기 출구 온도 변화는 약 4℃로 작게 나타났다. 그림 10은 온도 분포를 나타내는데 증기발생기 2구역 차단운전에 비하여 열적 혼합이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

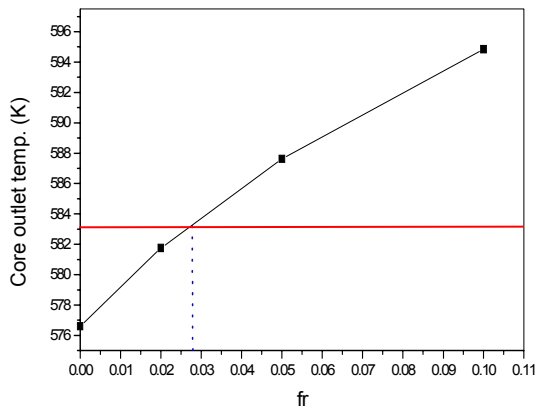


그림 3 fr 변화에 따른 노심출구온도

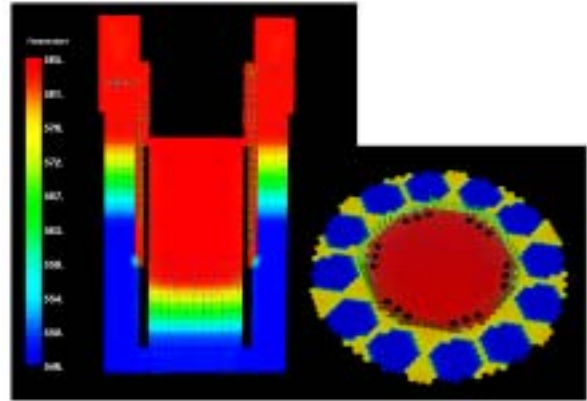


그림 4 전 출력운전상태의 온도분포

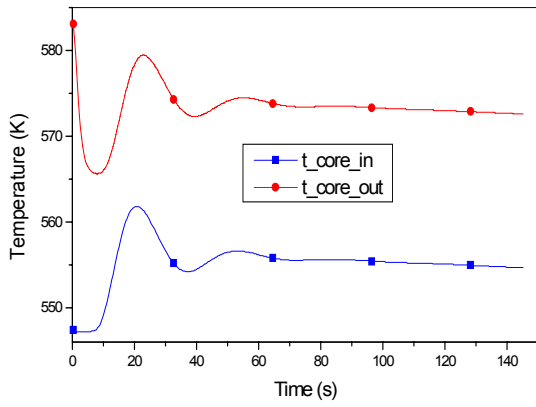


그림 5 노심 입출구 온도
(증기발생기 2구역 차단)

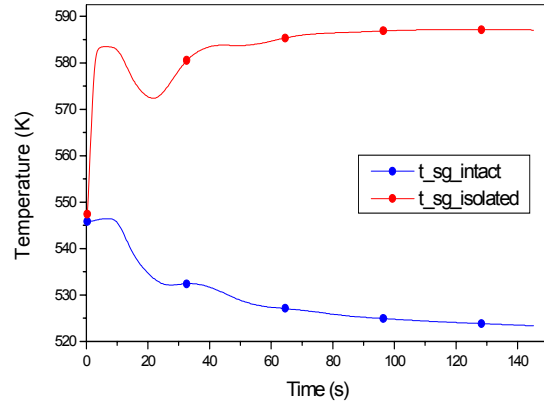


그림 6 증기발생기 출구 온도
(증기발생기 2구역 차단)

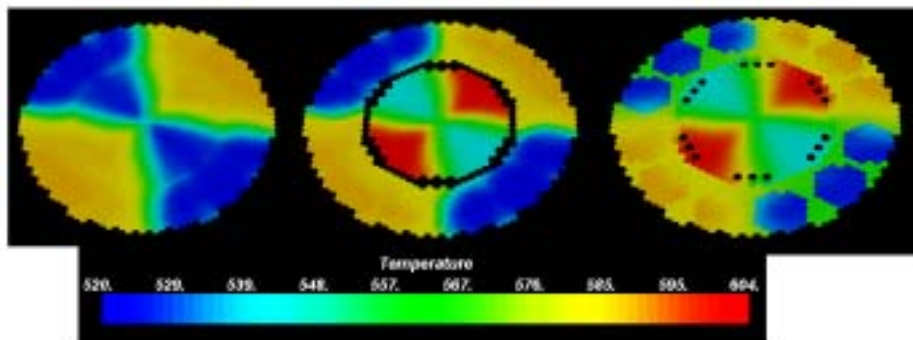


그림 7 증기발생기 2구역차단 운전시의 온도분포

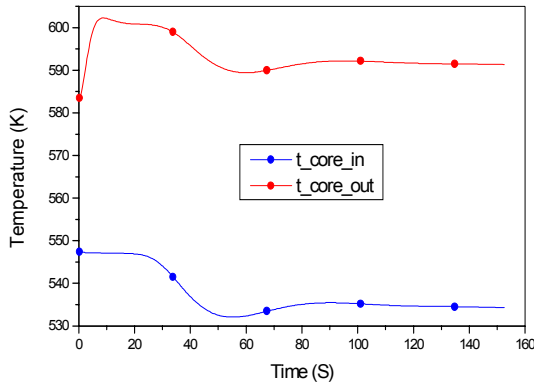


그림 8 노심 입출구 온도
(주냉각재 1대 정지 운전)

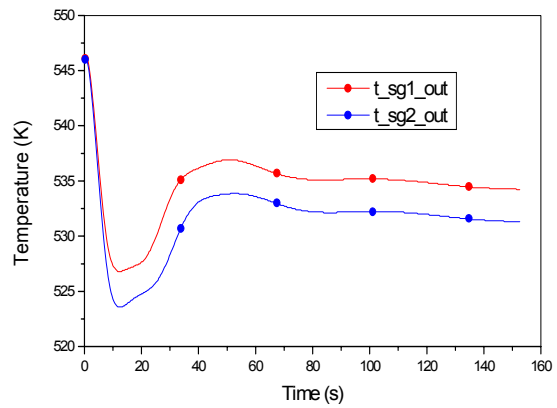


그림 9 증기발생기출구 온도
(주냉각재 1대 정지 운전)

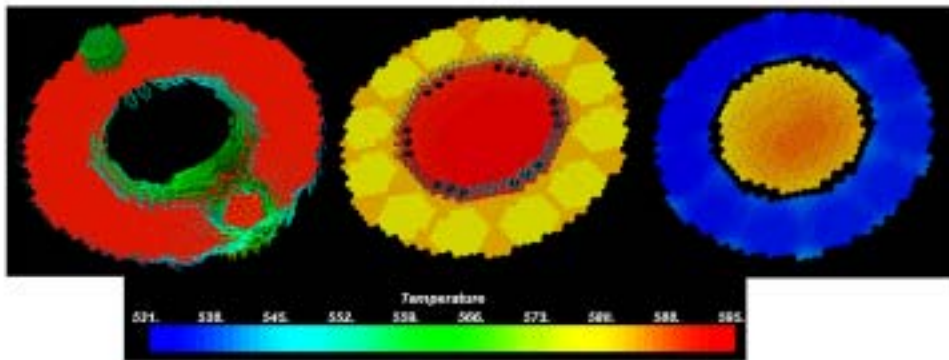


그림 10 주냉각재 1대 정지 운전시의 속도 및 온도분포

4. 결론

SMART 연구용 원자로의 성능해석을 위하여 3차원 모사코드인 TASS-3D를 개발하였다. 이 코드는 다수의 코드모듈로 구성되는데, 복잡한 일차냉각계통의 구조를 고려하기 위하여 3차원 유동장 해석 모델인 FAST를 개발하여 3차원 노심 동특성 해석코드인 MASTER와 연계하였다. 한편 기존의 안전해석 코드인 TASS/SMR을 주 프로그램으로 하여 2차 냉각/피동간열 계통 및 보조설비계통에 대한 계산을 수행할 수 있도록 하였다. TASS-3D 코드를 사용하여 정상 및 비정상 운전 상태에 대한 예비 성능 해석을 수행하였다. 정상운전 계산 결과 노심 입출구 온도는 모두 설계값과 일치함을 확인하였다. 성능시험 운전에 대한 해석 결과 증기발생기 2구역 격리 운전의 경우 냉각재의 열적 혼합이 거의 발생하지 않아서 노심 출구 평균온도는 격리된 증기 발생기의 입구온도보다 10°C 이상 낮게 나타났다. 주냉각재 펌프 1대 정지 운전의 해석결과 노심출구 평균온도는 증기발생기 2구역 격리 운전의 경우보다 높게 나타났으나 열적 혼합은 비교적 잘 이루어져서 증기 발생기 출구의 온도 차이는 크지 않게 나타났다.

본 연구 결과 TASS-3D는 SMART 연구용 원자로의 3차원 거동을 매우 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

5. 참고 문헌

- 1) 조병오 외 4인, "MASTER-2.0 : Multi-purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," *KAERI/TR-1211/99*, 1999.
- 2) 윤한영 외 4인, "Development of a 3-D Flow Analysis Computer Program for Integral Reactor," 2003 추계 원자력학회, 용평, 2003.
- 3) 윤한영 외 4인, "Thermal Hydraulic Model Description of TASS/SMR," *KAERI/TR-1835/2001*, 2001.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.