

**최적 계통분석 코드를 이용한 울진표준원전 시뮬레이터용
NSSS 열수력 프로그램 개발: 제 1부 코드 개발**

**Development of An NSSS Thermal-Hydraulic Program
for the KSNP (UCN-3/4) Simulator Using a Best-Estimate Code:**

Part I. Code Development

김경두, 정재준, 이승욱^a
한국원자력연구소, (주)엑트^a

이명수, 홍진혁, 이용관, 서재승
한국전력공사 전력연구원

요약

전력연구원과 한국원자력연구소는 울진표준형 원전(울진 3/4호기) 시뮬레이터 개발 과제
의 일환으로 최적 계통분석 코드인 RETRAN을 이용하여 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그
램을 개발하고 있다 (이 프로그램을 ARTS-UCN이라 명명함). 원래 RETRAN 코드는 최적
계산을 주 목표로 개발되었기 때문에 시뮬레이터의 성능 요건을 만족시키기 위해서는 상당
한 수정 및 개선이 필요했다. 즉, RETRAN 코드에 사용되는 복잡한 물리적 상관식을 단순
화하고 유동영역에 따른 불연속성을 제거하여 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간
계산이 가능하도록 개선했다. 또한 RETRAN의 모의영역을 벗어나거나 RETRAN으로 모의할
경우 효율성이 낮아지는 현상 및 사고를 모의하기 위해 보조계산체계 및 전문화된 모델을
개발하였다. 본 연구개발에서는 기 수행된 원자력교육원 시뮬레이터 2호기 NSSS 열수력 프
로그램 개발의 경험을 십분 활용했다.

Abstract

KEPRI and KAERI have jointly developed an NSSS thermal-hydraulic simulation program
(called ARTS-UCN) based on the best-estimate system code, RETRAN, as a part of the
development project for the KSNP (Korea Standard Nuclear Power-plant; UCN-3/4) simulator.
To develop the RETRAN code as an NSSS T/H engine for the simulator, a number of code
modifications, such as simplifications and removing of discontinuities of the physical
correlations, were made to satisfy the simulator requirements of robustness and real time
calculation capability. Some simplified models and a backup system were also developed to
simulate some transients that cannot be efficiently calculated by the RETRAN part of ARTS-
UCN. For this development, we have fully utilized the lessons from the KNPEC #2 Simulator
NSSS T/H Program Development Project.

1. 서론

한국전력공사 전력연구원과 한국원자력연구소는 최적 계통분석 코드인 RETRAN을 이용하여 원자력교육원 시뮬레이터 2호기의 NSSS 열수력 프로그램(ARTS 코드라 명명함)을 개발한 바 있으며[1, 2], 본 연구개발에서는 ARTS 코드 개발경험을 활용하여 울진 표준형 원전[3, 4]의 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램(ARTS-UCN이라 함)을 개발하고 있다.

원래 RETRAN[5]은 최적 계통분석 코드로 개발된 것인데, 이를 시뮬레이터용으로 개발하기 위해 여러 가지 수정 및 개선이 필요했다. 즉, 실시간 계산 및 Robustness 요건[6]을 만족시킬 수 있도록, RETRAN 코드에서 사용되는 복잡한 물리적 상관식(Correlations)을 단순화하고 유동영역에 따른 불연속성을 제거함으로써, 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. 또한 RETRAN 코드의 모의영역을 벗어나는 대형 냉각재 상실사고 등을 모의하기 위해 전문화된 모델을 개발했으며, 이 전문모델을 ARTS-UCN 코드와 기술적으로 연계하여 사용자가 모델변화를 감지할 수 없도록 하였다.

본 논문에서는 ARTS-UCN 코드 개발에 대해 간략히 기술한다. 제 2절에서는 ARTS-UCN 코드의 기본이 되는 RETRAN 코드에 관해 간략히 설명하고, 제 3절에서 ARTS-UCN 코드의 개발 및 고유 특성에 관해 설명한다. ARTS-UCN 코드의 평가결과는 별도의 논문[7]에서 다룬다.

2. RETRAN 코드

RETRAN 코드는 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)가 원자력 발전소의 계통 열수력 과도현상 해석을 위해 개발한 최적 계통분석코드이다[5]. 본 연구에서는 최신 버전인 RETRAN 3D를 기본 코드로 채택하고 있다. 이 코드에는 일차원 유체 모델, 원자로심 동특성모델, 펌프모델, 여러 가지 밸브모델 등이 포함되어 있다. 여기서는 계통분석 코드의 특성이 가장 잘 나타나는 유체 모델에 관해서만 간략하게 소개한다.

RETRAN 3D 코드에서는 원자로 냉각계통 내부의 이상유동(Two-phase flow)을 모의하기 위해 5-Equation Model을 채용한다. 이 모델의 지배방정식은 다음과 같다:

- 혼합체(Two-phase mixture) 질량보존식

$$\frac{d}{dt} M_K = \left[\sum_j W_j \right]_{inlet} - \left[\sum_j W_j \right]_{outlet}$$

Mixture Mass Mixture Mass
Convection in Convection out

(1)

- 기체의 질량보존식

$$\frac{d}{dt} M_{gk} = \left[\sum_j \{ X_g^m W - X_g^m X_l^m \rho A V_{sl} \}_j \right]_{inlet} - \left[\sum_j \{ X_g^m W - X_g^m X_l^m \rho A V_{sl} \}_j \right]_{outlet} + \Gamma_g$$

Mixture Mass Mixture Mass Vapor
Convection in Convection out Generation

(2)

- 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned}
 \left[\frac{1}{2} \frac{L_k}{A_k} + \frac{1}{2} \frac{L_L}{A_L} \right] \frac{dW_j}{dt} = & \underbrace{(P_k - P_L)}_{\text{Static } \Delta P} + \underbrace{\left(\frac{\bar{W}_k^2}{\bar{\rho}_k A_k^2} \right)}_{\text{Momentum Flux - Mixture}} - \underbrace{\left(\frac{\bar{W}_L^2}{\bar{\rho}_L A_L^2} \right)}_{\text{Momentum Flux - Area Change}} + \frac{1}{2\rho_j} \left[1 + \bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \left(\frac{V_{SL_j}}{V_j} \right)^2 \right] \left[\frac{1}{A_L^2} - \frac{1}{A_K^2} \right] W_j^2 \\
 & + \underbrace{\left[\bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \bar{\rho} A \right]_K \bar{V}_{SL_K}^2 - \left[\bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \bar{\rho} A \right]_L \bar{V}_{SL_L}^2}_{\text{Momentum Flux - Slip}} - \underbrace{\left(\frac{F_{W,j}}{A_K} + \frac{F_{W,j}}{A_L} \right) \Phi_{2\phi,j}^2 W_j |W_j|}_{\text{Friction Loss}} - \underbrace{\left(\frac{K_j}{2\rho_j A_j^2} \right) W_j |W_j|}_{\text{Form Loss}} \\
 & - \underbrace{\left(\int_K^j \rho dz + \int_j^L \rho dz \right) g}_{\text{Elevation Head}} + \underbrace{\frac{1}{2} \Delta P_p}_{\text{Pump } \Delta P}
 \end{aligned} \tag{3}$$

- Slip 속도상관식

$$V_{SL} = \frac{V(1 - C_o) - V_{gj}}{(1 - \alpha) \left[\frac{\rho_{ls} - \alpha C_o (\rho_{ls} - \rho_{gs})}{\rho} \right]} \tag{4}$$

- 에너지 보존 방정식

$$\frac{dU_K}{dt} = \underbrace{\left[\sum_j \left\{ W_j h_j + \bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \rho_j A_j V_{SL_j} (h_j^l - h_j^g) \right\} \right]_{inlets}}_{\text{Energy Convection in}} - \underbrace{\left[\sum_j \left\{ W_j h_j + \bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \rho_j A_j V_{SL_j} (h_j^l - h_j^g) \right\} \right]_{outlets}}_{\text{Energy Convection out}} + Q_K \tag{5}$$

- 상태방정식 (압력을 질량과 내부에너지의 함수로 나타냄)

$$p_K = p(M_K, M_{V_K}, U_K) \tag{6}$$

위에서 설명한 5개 지배방정식에 상태방정식을 도입하여 **Mathematical closure**를 이룬 다음, 유한차분법을 사용하여 지배방정식의 해를 구한다. 이때 **Fully-implicit time advancement scheme**을 사용하여 임의의 시간구간에 대해서도 항상 안정된 해를 구할 수 있게 한다.

3. ARTS-UCN 코드 개발

ARTS-UCN 코드 개발 업무는 발전소 기하입력 모델 개발, **Robustness** 및 실시간 계산능력 보안을 위한 **RETRAN** 코드 개선, 기타 모델 개발, 코드 평가 등의 네 부분으로 나눌 수 있다.

3.1. 발전소 기하입력 모델 개발

ARTS-UCN 코드를 이용하여 올진 3/4호기 NSSS를 모사하기 위해 우선 기하입력자료를 만들어야 한다. ARTS-UCN의 올진 3/4호기 기하입력 형태는 그림 1에 나타난 바와 같이, 원자로 계통은 총 62개의 제어체적(Control volume)과 126개의 Fill 및 Normal junction으로 구성

되어 있다. 각 제어체적은 정상운전 상태 및 각종 과도상태에서의 주요 열수력적 특성을 반영할 수 있도록 RETRAN 사용자 지침서의 권고사항을 최대한 반영하여 모델하였다. 또한 상분리(phase separation)가 일어나는 제어체적에는 Bubble-rise model을 적용하여 상분리에 따른 물리적현상을 적절히 모의할 수 있도록 했다.

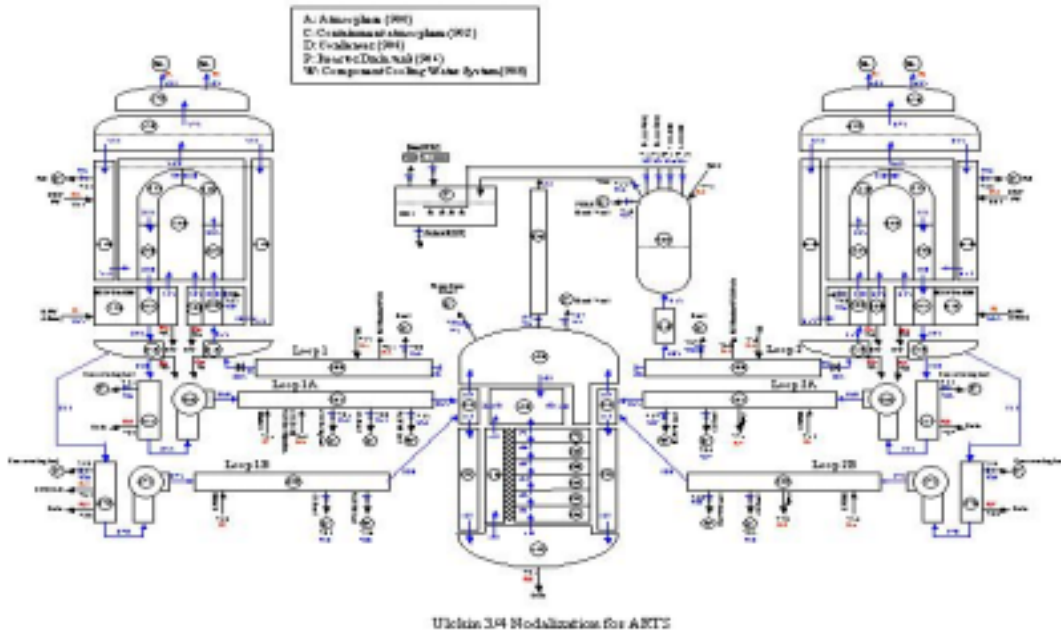


그림 1. ARTS-UCN 코드의 울진 3/4호기 Nodalization.

3.1.1 원자로 압력 용기

원자로압력용기는 크게 압력용기 헤드, 상부 플레넘, 강수관, 하부 플레넘 및 노심 우회유로 영역과 노심영역의 6개 부분으로 나눈다. 원자로 용기 내부의 냉각재 유동을 자세히 모사하기 위해 강수관은 다시 입구 플레넘과 나머지 강수관 영역으로 세분하였다. 압력용기 헤드 우회유로 및 상부 플레넘 우회유로는 별도의 체적으로 모사하지 않고 압력용기 헤드 및 상부 플레넘 체적에 포함시켰으나 노심 우회유량의 경우에는 별도의 체적으로 모델했다. 노심영역은 6개의 제어체적으로 나누었다.

3.1.2 가압기

가압기는 Loop 2의 고온관에 밀림관(Surge line)을 통해 연결되어 있다. 가압기는 1차계통에서 유일하게 비등이 허용되는 부분으로서 상부에 포화증기가 존재하고 하부에 포화수가 존재한다. 여기에서는 가압기 전체를 1개의 제어체적으로 모델하되 Bubble-rise모델을 사용함으로써 실제로는 비평형 2 영역 모델이 되도록 했다.

3.1.3 일차 냉각계통 루프

1차 냉각계통 원자로 냉각재 유로는 그림 1에 나타난 바와 같이 2개의 고온관과 4개의

저온관을 각기 모델했다. 각 루프는 1개의 고온관, 2개의 저온관 및 냉각재 펌프, Cross-over leg, 증기발생기 1차계통으로 구성된다. 정상운전시에 필요한 유출수 유로, 배수유로, 잔열제거 펌프 흡입유로, 가압기 살수유로 등이 냉각루프에 설치된다. 각종 과도상태 및 고장운전을 모의할 수 있도록 안전주입유로 및 각종 파단유로 등을 Fill Junction 및 valve로 연결하여 모델하였다.

3.1.4 증기발생기

증기발생기의 2차 계통은 크게 강수관, 예열기(Economizer), 가열기 및 1차 습분 분리기와 증기 돔(Dome)의 4부분으로 나누며 증기돔은 2차 습분분리기 및 상부 강수관 일부를 포함하는 영역과 순수 증기돔의 2개 영역으로 분리하였다. 하부 증기돔은 Bubble-rise 모델을 사용하여 증기와 물을 분리할 수 있도록 모델했다. 또한 강수관을 나타내는 제어체적도 강수관의 수위 감소에 따라 상분리가 예상되므로 증기돔과 같이 Bubble-rise 모델을 썼다.

증기발생기 1차 계통은 2차계통의 Nodalization에 맞추어 총 8개의 제어체적으로 모델했다. 증기발생기 1, 2차 측은 U-tube 열전도체 모델에 의해 서로 연계된다. U-tube 파단사고를 모의하기 위한 파단 모의용 밸브도 각 증기발생기에 1개씩 설치했다.

3.2. Robustness 및 실시간 계산능력 보완을 위한 RETRAN 코드 개선

ARTS-UCN의 모체가 되는 RETRAN 코드는 1차 원자로 냉각계통이 액상(Single phase liquid) 및 경미한 이상 유동(Two-phase flow)에 머무르는 사고 모의에 적합하게 개발되었다. 따라서 이상유동이 심하게 발생하는 사고의 모의에는 한계가 있을 뿐만 아니라, 실시간 계산 및 Robustness가 보장되지 않기 때문에 시뮬레이터용으로 개발하기 위해서는 모델 개선이 필요하다. 표 1은 기존의 RETRAN과 시뮬레이터의 NSSS T/H 모듈로 사용하기 위해 개발된 ARTS-UCN를 모델별로 비교한 표이다. 다음에 기술된 모델 개선 이외에도 표 1에 나타난 바와 같이 유동영역에 따른 불연속성 제거, 물리적 상관식의 단순화, 일부 상관식의 미분항 (Derivative terms) 추가를 통한 Implicitness 증대 등의 코드개선 및 시뮬레이터의 NSSS T/H 모듈로 사용하기 위한 각종 연계 개발 등 광범위한 코드 개선을 수행했다.

3.2.1 Slip 모델 개선

RETRAN 3D에서는 이상유동에서 액상과 기상의 속도차를 고려하기 위해 Dynamic slip model 혹은 Algebraic slip model 중 사용자가 선택하여 사용할 수 있다. Dynamic slip model은 속도차에 대한 미분방정식의 해를 구하기 때문에 상간 속도차의 시간에 따른 변화를 현실적으로 계산하지만 계산 시간의 많이 소요되는 단점이 있다. 반면에 Algebraic slip model 실험식으로부터 액상과 기상의 속도차를 계산하기 때문에 지난 계산시간 값에 대한 고려 없이 Pseudo steady를 가정하여 상간 속도차를 계산하지만 계산 소요시간이 적어 실시간 계산이 요구되는 본 과제에는 Algebraic slip model를 선택했다.

표 1: RETRAN 모델과 ARTS-UCN 모델 비교

Description		RETRAN3D	ARTS-UCN
Uses		Safety Analysis, Performance Analysis	T/H module for simulator
Platform		UNIX workstation	Windows 95/98/NT/2000 (Visual Digital Fortran compiler)
Language		Fortran 77	Fortran 90
Program type		Execution module	Static library
Simulation capabilities		Normal operation to SBLOCA	Normal operation to large LOCA, mid-loop operation including dynamic & static vent
Field equations		3/4/5 equation models	same as RETRAN3D
Equation of State			same as RETRAN3D
Steady-state solution model			N/A
Solution technique		Nearly implicit	same as RETRAN3D
FTB package			same as RETRAN3D + fixed size arrays for additional variables
Input process		Text based input/Restart	Restart only (self-developed routine)
Output process		Text based output	self-developed to communicate with simulator
Physical models	Slip	Algebraic / Dynamic slip models	self-developed algebraic slip model
	Interfacial heat transfer		simplified model developed in-house
	Donor (junction) properties		modified for level tracking
	Heat transfer coefficient calc. model		simplified for fast execution and robustness
	Heat conduction model		simplified and tuning factor included
	Control model		developed in-house
	Kinetics model		N/A
	DNB calculation model		N/A
	Enthalpy transport		N/A
	Time-dependent model		developed in-house to adapt in simulator
	Fill junctions		developed in-house to adapt in simulator
	Trip model		developed in-house to adapt in simulator
	RDT model	treated as normal control volume	developed in-house for fast execution and robustness
	Boron transport	General Transport model	developed in-house for convenience
	Radioisotope transport	General Transport model	developed in-house for fast execution (simplified nodalization used)
Environmental energy loss	Heat conduction model	developed in-house for fast execution (simplified nodalization used)	
Interface with simulator package		N/A	developed in-house
ARTS calling schedule module		N/A	developed in-house to ensure the real-time execution
Backup routines		N/A	developed in-house for robustness
Large break LOCA model		out of simulation scope	developed in-house for robustness
Mid-loop calculation model		out of scope or too slow	self-developed for robustness and real-time simulation
Dynamic & static vent operation		out of scope or too slow	self-developed for robustness and real-time simulation
Others			Lots of small modifications made for robustness, fidelity and real-time simulation

Algebraic slip model은 실험식에 의해 상간 속도차를 계산하기 때문에 Slip 속도($v_g - v_l$)의 부호(sign)는 기하입력모델(Nodalization)의 형태에 Junction의 Downstream과 Upstream 제어체적 중심의 높이차이로 Slip 속도의 부호를 결정한다. 이와 같이 양편의 제어체적 중심의 높이로만 Slip 속도의 부호를 결정하면 특정형태의 입력모델에서 액상과 기상의 흐름이 왜곡될 수 있다.

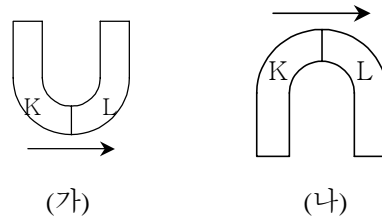


그림 2. Slip 속도의 부호가 왜곡될 수 있는 Junctions

예를 들면, 그림 2의 (가) 경우는 액상이, (나)의 경우는 기상이 더 빨리 흐르게 되나 RETRAN slip 모델을 적용하면 기상과 액상이 같은 속도로 흐르는 것으로 예측하게 된다. 이를 개선하기 위해 ARTS-UCN에서는 Junction의 양쪽 제어체적의 중심과 Junction의 높이 차를 기초로 Slip 속도의 부호를 결정하도록 하여 유동이 왜곡되는 가능성을 배제하였다. 또한 수평관 (horizontal pipe)에서는 상간의 속도차가 없다고 가정하기 때문에 수평으로 배치된 두 개의 제어체적의 수위가 틀려도 액체는 수위가 낮은 제어체적으로 흐르지 않게 된다. 이런 경우도 수위에 따른 수두를 고려하여 수위가 높은 제어체적에서 낮은 제어체적으로 액체가 흐르도록 보완하였다.

3.2.2 기타 모델 개선

RETRAN에서는 유동형태에 따라 다양한 물리적 상관식을 제공하고 있는데 이 중에서도 특히 interfacial heat transfer model은 기포율과 유속 등에 의해 다양한 유동영역로 나누어 계산하도록 되어 있어 유동영역을 가로지를 때마다 물리적 상관식의 불연속성 때문에 고정계산시간 간격의 유지가 어렵다. ARTS-UCN에서는 복잡한 유동영역을 단순하게 통합하여 영역간의 불연속성을 최소화하였다. 또한 RETRAN은 상분리가 일어날 수 있는 영역에 사용하는 Bubble rise model을 연결된 제어체적에 연속하여 사용할 수 없도록 되어 있어 부분충수 운전과 같이 상분리가 여러 제어체적에 연속적으로 나타나는 경우는 적절한 모의가 어렵다. ARTS-UCN에서는 이를 보완하여 연속된 여러 체적에 걸쳐 수위가 변하는 경우도 모의할 수 있도록 보완하였다.

3.3. 전문 모델 개발

ARTS-UCN 코드는 근본적으로 다양한 물리현상을 일반화하여 모델 했기 때문에 NSSS에서 발생하는 거의 모든 물리 현상을 모의할 수 있다. 그런데, 경우에 따라 일반화된 모델 보다는 전문화된 모델(Dedicated Models)이 계산시간 및 Robustness 관점에서 유리할 수

있으므로 일부 기능에 대해서는 전문 모델을 개발했다.

3.3.1 원자로 배수탱크 모델

원자로 계통이 과압될 때는 감압을 위해 가압기의 증기를 방출시키는데, 원자로배수탱크 (Reactor Drain Tank; RDT)는 방출된 증기를 수용하고 응축시키는 기능을 담당한다. RDT 하부에는 대기압, 과냉각 상태의 물이 채워져 있으며 상부에는 질소가스가 주입되어 있다. 가압기에서 방출되는 증기를 효율적으로 응축시키기 위해, 증기는 RDT 하부에 설치된 Sparger를 통해 물속으로 분사된다. RDT의 기능은 단순하지만, 과냉각된 물에 포화(혹은 과포화) 증기가 주입되면 비응축성 개스의 존재하의 급격한 응축, 상분리(Phase separation) 등이 발생하여 열수력적 거동모의에는 상당한 어려움이 따른다. ARTS-UCN의 일반화된 모델을 써서 RDT를 별도의 열수력 체적으로 모의할 수 있지만, 위에서 언급한 특성으로 인해 시간간격(Time-step size)의 크기가 축소되어 결과적으로 비용/효과 측면에서 바람직하지 않다. 이런 문제점을 극복하기 위해 RDT를 모의하기 위한 전문모델을 개발했다. 이 모델은 기존 ARTS 코드 의 가압기배수탱크(Pressurizer Relief Tank) 모델 [1]을 개선한 것이다.

3.3.2 붕소, 방사성 동위원소 및 기타 물질의 이송

붕소, 방사성 동위원소 및 기타 물질의 이송은 ARTS-UCN 코드의 고유기능을 써서 모의할 수 있다. 그러나 비용/효과 측면에서 유리한 전문 모델을 개발했다. 특히, 방사성 동위원소 등의 이송을 계산할 때, 아주 상세한 Nodalization을 사용하면 계산시간이 불필요하게 소요되므로 제어체적의 수를 적절히 축소할 필요가 있다. 여기에서는 모의영역을 총 5개의 영역으로 나누었다. 즉, 원자로배수탱크, 가압기, 일차냉각계통 전체 및 각 증기발생기의 2차 측을 각각 하나의 영역으로 두고 보존방정식을 푼다. 각 영역 내부에 모의대상 물질은 냉각 재속에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다.

3.3.3 보조계산체계

ARTS-UCN 코드는 거의 대부분의 사고를 실시간에 모의할 수 있으며 계산의 Robustness도 보장된다. 그러나, 대형냉각재 상실사고나 저압 저유속 상태의 장기 과도현상 등을 모의할 경우에는 계산실패(Calculation failure)나 실시간 계산 지체 등의 가능성을 배제할 수는 없다. 지금까지 ARTS-UCN 코드의 평가결과에 따르면 실질적으로 이와 같은 가능성은 대형냉각재 상실사고를 제외하면 아주 희박한 것으로 나타났다. 그렇지만, 시뮬레이터 NSSS 열수력 모델의 Robustness를 높이기 위해 ARTS-UCN 코드에서 계산실패가 발생할 경우 자동으로 이를 대체.보완할 수 있는 보조계산체계를 개발했다[1].

보조계산체계는 ARTS-UCN 코드의 열수력 모델이 실시간 계산이 불가능하거나 계산실패가 발생한 경우에 사용된다. ARTS-UCN 코드에서 계산실패가 발생하기 전에 반드시 계산실패의 징후가 나타나는데 이 시점이 포착되면 보조계산체계를 초기화시키고 그 다음 Time-step부터는 보조계산체계를 써서 과도현상을 모의하도록 한다. 이 모델에서는 RCS 전체를

제어체적 2개, 즉, 가압기와 일차계통으로 분리하여 RCS 전체의 평균적인 거동을 먼저 계산하고 이를 바탕으로 그림 1의 제어체적에 대한 상세한 유동분포를 나중에 계산한다. 일차계통을 모델하기 위한 HEM(Homogeneous Equilibrium Model)을 사용하며, 일차계통의 상세한 유동분포는 펌프의 Angular momentum equation과 Loop momentum equation을 써서 구한다. 모든 펌프가 정지된 경우에는 상분리 개념을 쓴다.

3.3.4 부분충수 운전, 배기 및 충수 운전 모델

ARTS-UCN 코드를 이용하여 정상적인 배수과정을 거쳐 가압기 수위가 약 50 %에 이르면(이때 가압기 상부는 질소가스로 충전된다), ARTS-UCN 코드의 열수력 모델 사용을 부분적으로 중지하고 보조계산체계로 전환한 다음, 부분충수운전을 모의하기 위한 별도의 열수력 모델로 계속 모의한다.

부분충수 운전 모의를 위한 보조계산체계는 앞에서 설명한 보조계산체계와 유사하다. 즉, RCS 전체를 제어체적 2개로 분리하여 RCS 전체의 평균적인 거동을 먼저 계산한다. 그런데, 여기에서는 두 영역의 경계를 가압기와 나머지 일차계통으로 분리하지 않고, 비응축성 가스 영역과 물(water) 영역으로 나누며 두 영역의 경계는 가변적이다. 이외에는 앞에서 설명한 보조계산체계와 동일하다. ARTS-UCN 코드에는 배수, 부분충수 운전 뿐만 아니라 배기(동적 배기 및 정적 배기) 운전의 각 단계를 모의할 수 있다. 동적/정적 배기의 모의를 위해 별도의 모델이 필요했다. 이 모델에는 U-tube, 원자로 용기 및 가압기 상부에 갇혀있는 비응축성 가스의 이송을 펌프작동여부 및 배기밸브 개방 여부 등을 고려하여 논리적으로 재현할 수 있도록 했다.

4. 요약 및 결론

전력연구원과 한국원자력연구소는 원자력교육원 시뮬레이터 2호기 NSSS 열수력 프로그램 개발 경험을 바탕으로 올진 3/4호기 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램 ARTS-UCN을 개발하고 있다.

ARTS-UCN 프로그램은 기존 시뮬레이터가 가지고 있던 문제점, 즉, RCS 내부유동을 혼합 유동으로 처리하는 등의 단순화된 물리적 모델을 개선하기 위해, 최적계산코드 RETRAN을 모체로 해서 올진 3/4호기 시뮬레이터에 적합하도록 개발한 것이다. 이를 위해, 우선 RETRAN 코드의 올진 3/4호기 입력모델을 개발하고 민감도 분석을 통해 최적 제어체적의 수를 결정했으며, 그 다음 복잡한 물리적 상관식을 단순화하고 불연속성을 제거하여 프로그램의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. 또한, RETRAN 코드가 지원하지 않거나 비용/효과 측면에서 불리한 일부 모델은 새로 개발했다.

지금까지 ARTS-UCN 코드는 성공적으로 개발되어 독자적인 성능 시험(Non-Integrated Standalone Test)이 이미 완결되었으며, 현재 시뮬레이터 환경에 탑재되어 노심 및 BOP 모델과의 연계 및 평가가 진행되고 있다. ARTS-UCN 코드가 올진표준형 원전 시뮬레이터의 NSSS T/H 모델로서 성공적으로 장착되면, 운전원의 훈련 및 평가에 최적(Best-Estimate)의 시

물레이션 환경을 제공할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이명수 외, 원자력교육원 2호기 시뮬레이터 성능개선, 01-전력연-단251, 한국전력공사 전력연구원, 2001.6.
2. 김경두 외, “최적코드를 이용한 원자력교육원 시뮬레이터 2호기용 최신 NSSS 열수력 프로그램 개발”, 한국원자력학회 2001년도 춘계학술발표회.
3. 한국형 표준원전 계통실무, KAERI/GP-108/96, 한국원자력연구소 (1996).
4. 울진 원자력 3/4호기 최종안전성 분석 보고서, 한국전력공사.
5. M. P. Paulsen et al., RETRAN 3D code manual, EPRI NP-7450, Electric Power Research Institute (1998).
6. Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and Examination, ANSI/ANS-3.5-1998, American Nuclear Society (1998).
7. 정재준 외, “최적계통분석코드를 이용한 울진표준원전 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램 개발: 제 2부 독자평가 결과”, 한국원자력학회 2001년도 추계학술발표회.