2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

최적코드를 이용한 원자력교육원 시뮬레이터 2호기용 최신 NSSS 열수력 프로그램 개발

Development of a New NSSS Thermal-Hydraulic Program for the KNPEC-2 Simulator Using a Best-Estimate Code

김경두, 정재준, 이승욱[a]
한국원자력연구소 , (주)액트[a]

이명수, 홍진혁, 이용관, 서재승, 김봉건
한국전력공사

요약

영광 1호기를 기준 원전으로 하는 원자력교육원 시뮬레이터 2호기 성능개선 과제의 일환으로 전력연구원과 한국원자력연구소는 공동으로 최적 계통분석코드인 RETRAN을 기본으로 영광 원자력 1호기를 기준발전소로 하는 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램을 개발했다. RETRAN은 기존의 시뮬레이터 열수력 프로그램과 달리 최적 계산을 목표로 개발되었기 때문에 시뮬레이터 요건인 "Real-time simulation" 및 "Robustness"를 만족시키기 위해 복잡한 물리적 상관식을 단순화하고 유동영역에 따른 불연속성을 제거하여 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 코드와 기술적으로 연계하여 사용자가 모델변화를 감지할 수 없도록 개선하였다.

Abstract

KEPRI and KAERI have jointly developed an NSSS thermal-hydraulics (T/H) simulation program based on the best-estimate system code, RETRAN as a part of the upgrade project for the existing KNPEC (KEPCO Nuclear Power Education Center)-2 simulator whose reference plant is YGN unit 1. Since RETRAN has been developed for the realistic calculation of plant transients, simplifications and removing of discontinuities of the physical correlations of the RETRAN code were made to satisfy the simulator requirements of robustness and real time calculation capability. Some new models were also developed to extend the scope of the simulation that cannot be efficiently calculated by RETRAN.

1. 서론

국내에 설치되어 있는 원자력발전소 시뮬레이터의 NSSS(Nuclear Steam Supply System) 열수력 프로그램은 1990년대 국산화개발 이전에는 1980년대 초반에 외국에서 개발된 것을 도입

한 것이다. 이들 프로그램은 전산 환경이 지금에 비해 아주 열악한 상태에서 개발되었으며 열수력 현상에 대한 모델링 능력도 충분히 발달하지 않은 상태에서 개발되었기 때문에, 시뮬레이터용 열수력 모델의 기본요건[1]인 "Real-time simulation" 및 "Robustness"를 충족시키기 위해 단순화된 모델을 채택할 수 밖에 없었다. 이로 인해 원자로냉각계통에서 발생할 수 있는 복잡한 사고 - 특히 이상유동 사고 - 등을 사실적으로 모의하는데는 한계가 있기 마련이었고 결과적으로 시뮬레이터를 통한 훈련 효과를 저하시키는 요인이 되었다.

1990년대 초반부터 기존 시뮬레이터의 문제점이 전 세계적으로 인식되어 선진국에서는 시뮬레이터용 열수력 프로그램으로 최적 계산코드를 직접 채택하거나 전환/개발하려는 움직임이 대두되기 시작했다. 예를 들면, 미국에서는 RETRAN[2]과 RELAP5[3] 코드를, 프랑스에서는 CATHARE2 코드를 시뮬레이터용 열수력 코드로 개발하고 있다. 이와 같이 최적계통분석코드를 시뮬레이터용으로 활용하면, 기존의 단순화된 모델에서 비롯되는 Negative Training의 가능성에서 탈피할 수 있게 되며, 시뮬레이터를 종합사고분석 등의 도구로 활용할 수 있게 된다. 그런데, 최적 계산코드는 시뮬레이터 열수력 프로그램과 달리 최적의 계산결과를 목표로 개발되었기 때문에 시뮬레이터용 열수력 프로그램이 되기 위해서는 "Real-time simulation" 및 "Robustness" 능력이 추가로 개발되어야 한다.

한전 전력연구원과 한국원자력연구소는 공동으로 최적계통분석코드인 RETRAN을 기본으로 영광 원자력 1호기[4] 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램(ARTS 코드라 명명함)을 개발했다[5]. RETRAN을 시뮬레이터용으로 개발하기 위해 복잡한 물리적 상관식(Correlations)을 단순화하고 유동영역에 따른 불연속성을 제거하여 코드의 Robustness를 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. RETRAN 코드의 모의영역을 벗어나는 대형 냉각재 상실사고 등을 모의하기 위해 전문화된 모델을 개발했으며, 이 전문모델을 ARTS 코드와 기술적으로 연계하여 사용자가 모델변화를 감지할 수 없도록 개선하였다.

본 논문에서는 ARTS 코드의 개발에 관해 간략히 소개한다. 제 2절에서는 ARTS 코드의 기본이 되는 RETRAN 코드에 관해 간략히 설명하고, 제 3절에서 ARTS 코드의 개발 및 고유 특성에 관해 설명한다. ARTS 코드를 이용한 모의결과는 별도의 논문[6]에서 다룬다.

2. RETRAN 코드 개요

RETRAN 코드는 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)가 원자력 발전소의 과도현상 해석을 위해 개발한 최적 계통분석코드이다[2]. 계통분석코드에는 유체 모델 및 열전도체 모델이 기본적으로 포함되어 있으며 이외에도 원자로심 모델, 펌프모델, 여러 가지 밸브모델 등이 포함되어 있다. 그런데 계통분석 코드의 특성이 가장 잘 나타나는 부분이 유체 모델이므로 이에 관해서만 간단히 소개한다. 다른 모델은 과거의 시뮬레이터 및 타 계통분석코드의 모델과 유사하다.

본 연구에서는 최신 버전인 RETRAN 3D를 기본 코드로 채택하고 있다. 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 Convection in　　Mixture Mass Convection out

- **기체의 질량보존식**

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

Mixture Mass Convection in　　Mixture Mass Convection out　　Vapor Generation

- **운동량 보존 방정식**

$$\left[\frac{1}{2}\frac{L_k}{A_k}+\frac{1}{2}\frac{L_L}{A_L}\right]\frac{dW_j}{dt} = (P_k - P_L) + \left(\frac{\overline{W}_K^2}{\overline{r}_K A_K{}^2}\right) - \left(\frac{\overline{W}_L^2}{\overline{r}_L A_L{}^2}\right) + \frac{1}{2r_j}\left[1+\overline{X}_j^m(1-\overline{X}_j^m)\left(\frac{V_{SL_j}}{V_j}\right)^2\right]\left[\frac{1}{A_L^2}-\frac{1}{A_K^2}\right]W_j^2$$

Static ΔP　　Momentum Flux - Mixture　　Momentum Flux - Area Change

$$+\left[\overline{X}_j^m(1-\overline{X}_j^m)\overline{r}A\right]_K \overline{V}_{SL_K}^2 - \left[\overline{X}_j^m(1-\overline{X}_j^m)\overline{r}A\right]_L \overline{V}_{SL_L}^2 - \left(\frac{F_{W,j}}{A_K}+\frac{F_{W,j}}{A_L}\right)\Phi_{2f,j}^2 W_j|W_j| - \left(\frac{K_j}{2r_j A_j^2}\right)W_j|W_j|$$

Momentum Flux - Slip　　Friction Loss　　Form Loss

$$-\left(\int_K^j r\,dz + \int_j^L r\,dz\right)g + \frac{1}{2}\Delta P_P$$

Elevation Head　　Pump ΔP

- Slip **속도** (v_g-v_l) **상관식**

$$V_{SL} = \frac{V(1-C_o) - V_{gj}}{(1-a)\left[\frac{r_{ls}}{r} - a\,C_o\frac{(r_{ls}-r_{gs})}{r}\right]}$$

- **에너지 보존 방정식**

$$\frac{dU_K}{dt} = \left[\sum_j\left\{W_j h_j + \overline{X}_j^m(1-\overline{X}_j^m)\tilde{n}_j A_j V_{SL_j}(h_j^l - h_j^g)\right\}\right]_{inlets} - \left[\sum_j\left\{W_j h_j + \overline{X}_j^m(1-\overline{X}_j^m) r_j A_j V_{SL_j}(h_j^l - h_j^g)\right\}\right]_{outlets} + Q_K$$

Energy Convection in　　Energy Convection out　　Source Terms

- **상태방정식** (**압력을 질량과 내부에너지의 함수로 나타냄**)

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

위에서 설명한 5**개 지배방정식에 상태방정식을 도입하여** Mathematical closure**를 이룬 다음**, **유한차분법**(Finite difference method)**을 사용하여 지배방정식의 해를 구한다**. **이때** Staggered grid mesh**를 채택하며**, Fully-implicit time scheme**을 사용하여 임의의 시간구간에 대해서도 항상**

안정된 해를 구할 수 있게 한다[2].

3. ARTS 코드 개발

ARTS 코드 개발과정은 발전소 기하입력 모델 개발, Robustness 및 실시간 계산능력 보완을 위한 RETRAN 코드 개선, 기타 모델 개발 등의 세 부문으로 나누어 진다.

3.1. 발전소 기하입력 모델 개발

ARTS 코드를 이용하여 영광 1호기 NSSS를 모사하기 위해 우선 기하입력자료(Nodalization)를 만들어야 한다. 영광 1·2호기는 3-루프 Westinghouse형 원전으로 이에 대한 RETRAN Nodalization은 그림 1과 같다. 원자로 계통은 62개의 제어체적(Control volume)과 125개의 Fill 및 Normal junction으로 구성되어 있으며 각 제어체적은 정상운전 상태 및 각종 과도상태에서의 주요 열수력적 특성을 반영하고 RETRAN 사용자 지침서의 권고사항을 최대한 반영하여 모델하였다. 그런데, RETRAN 코드의 특성상 상(Phase)이 변하는 경우에는 계산시간 간격이 감소할 수 있으므로 상의 변화가 예상되는 제어체적에는 Bubble-rise model을 적용하여 계산시간을 단축하였다.

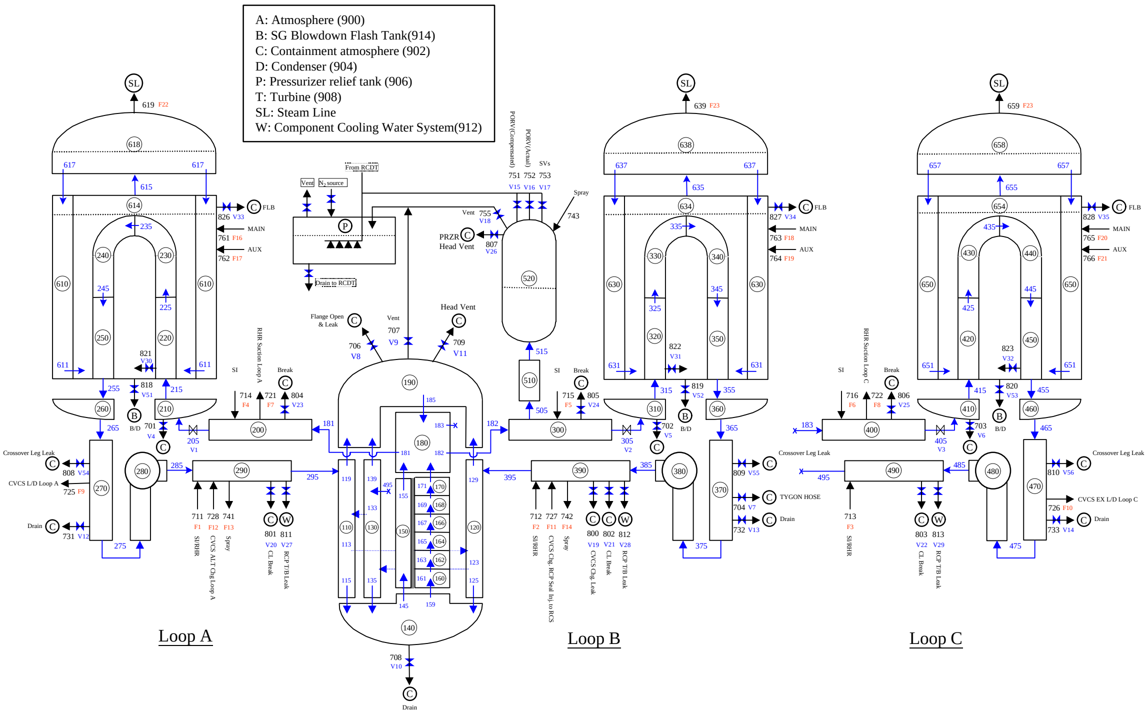

그림 1. 영광 원자력 1/2호기의 Nodalization

원자로압력용기는 크게 압력용기 헤드, 상부 플레넘, 강수관, 하부 플레넘 및 노심 우회유로 영역과 노심영역의 6개 부분으로 나눈다. 강수관은 다시 루프에 따라 3부분으로 균등하게 세분하며 세부 강수관 체적간의 횡방향 유동을 모사하기 위해 3개의 강수관 세부체적을

Crossflow junction으로 연결했다. 압력용기 헤드 우회유로 및 상부 플레넘 우회유로는 별도의 체적으로 모사하지 않고 압력용기 헤드 및 상부 플레넘 체적에 포함시켰으나 노심 우회유량의 경우에는 별도의 체적으로 모델했다.

증기발생기의 2차 계통은 크게 강수관, 가열기 및 1차 습분분리기와 증기 돔(Dome)의 3부분으로 나누며 증기돔은 2차 습분분리기 및 상부 강수관 일부를 포함한다. 증기돔은 Bubble-rise모델을 사용하여 증기와 물을 분리할 수 있도록 모델했다. 또한 강수관을 나타내는 제어체적도 강수관의 수위 감소에 따라 상의 변화가 예상되므로 증기돔과 같이 Bubble-rise모델을 적용하였다.

가압기는 Loop B의 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 이른바 비평형 2 영역이 되도록 했다.

1차계통 원자로 냉각재 유로는 비대칭 현상을 모의하기 위해 3개의 루프를 각기 모델했다. 각 루프는 저온관, 냉각재 펌프, Cross-over leg, 증기발생기 1차계통, 고온관으로 구성되며 정상운전시에 필요한 유출수 유로, 배수유로, 잔열제거펌프 흡입유로, 가압기 살수유로 등을 추가했다. LOCA 등의 각종 과도상태 모의를 위해 안전주입유로, 각종 파단유로 등을 Fill 및 Junction으로 연결하여 모델하였다.

2.2. Robustness 및 실시간 계산능력 보완을 위한 RETRAN 코드 개선

ARTS의 모체가 되는 RETRAN 코드는 원자력발전소의 안전해석 및 성능해석용 최적코드로서 액상(Single phase liquid) 및 경미한 이상 유동(Two-phase flow) 사고에 적합하게 개발되었다. 따라서 이상유동이 심하게 발생하는 사고에 대한 고려가 미흡하고, 실시간 계산 및 Robustness가 보장되지 않아, 모델 개선이 필요하다. 표 1은 기존의 RETRAN과 시뮬레이터의 NSSS T/H 모듈로 사용하기 위해 개발된 ARTS를 모델별로 비교한 표이다. 다음에 기술된 모델 개선 이외에도 표 1에서 볼 수 있듯이 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.

- Slip 모델 개선

이상유동에서 액상과 기상의 속도차를 고려하기 위해 Algebraic slip model을 사용한다. RETRAN에서 사용하는 Algebraic slip 모델은 실험식으로부터 액상과 기상의 속도차만 계산하기 때문에 Slip 속도(v_g-v_l)의 부호(sign)는 기하입력모델(Nodalization)의 형태에 따라 모델 스스로 결정한다. RETRAN에서는 Junction의 Downstream과 Upstream 제어체적 중심의 높이 차이로 Slip 속도의 부호를 결정한다. 이와 같이 양편의 제어체적 중심의 높이로만 Slip속도의 부호를 결정하면 특정형태의 입력모델에서 액상과 기상의 흐름이 왜곡될 수 있다. 예를

표 1: RETRAN 모델과 ARTS 모델 비교

Description		RETRAN3D	ARTS
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 incl. mid-loop operation
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
	PRT 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 simulation scope or too slow	developed in-house for robustness and real-time simulation
Others			Lots of small modifications made for robustness and real-time simulation

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.

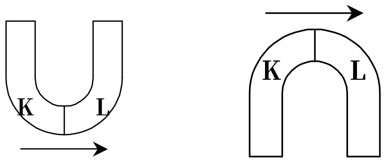

그림 2. Slip 속도의 부호가 왜곡될 수 있는 junctions

이를 개선하기 위해 ARTS에서는 Junction의 양쪽 제어체적의 중심과 정션의 높이 차를 기초로 Slip 속도의 부호를 결정하도록 하여 유동이 왜곡되는 가능성을 배제하였다.

- 비응축성 가스 모델

RETRAN에서는 다양한 종류의 비응축성가스가 존재하는 경우에도 적용가능한 상태 방정식을 구비하고 있다. 이들 상태방정식은 보존식의 해를 구하기 위해 사용한 Equation system에서 사용한 가정에 따라 크게 Equilibrium과 Nonequilibrium 경우로 분류되고, 각 경우는 다시 "비응축성가스, 증기 및 액체"가 존재하는 경우, "비응축성가스와 증기"가 존재하는 경우, 그리고 "비응축성가스"만 존재하는 경우로 나누어진다. 기존 RETRAN에는 "비응축성 가스와 액체"가 존재하는 경우는 고려하지 않고 가스영역에는 액체의 온도와 동일한 증기가 항상 존재하는 것으로 가정하였는데 이는 액체로 가득 찬 제어체적에 비응축성가스가 처음 나타날 때 압력의 급격한 상승을 초래하게 한다. ARTS에서는 계산의 안정성을 위해 비응축성가스가 액체로 가득 찬 제어체적에 처음 주입될 경우는 액체와 비응축성가스만 존재하는 것으로 가정하며, 이 경우의 상태방정식을 추가했다.

2.3. 기타 모델 개발

ARTS 코드는 근본적으로 다양한 물리현상을 일반화하여 모델했기 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.

- 가압기 방출 탱크 모델

원자로 계통이 과압될 때는 감압을 위해 가압기의 증기를 방출시키는데, 가압기방출탱크(Pressurizer Relief Tank; PRT)는 방출된 증기를 수용하고 응축시키는 기능을 담당한다. PRT 하부에는 대기압, 과냉각 상태의 물이 채워져 있으며 상부에는 질소가스가 주입되어 있다. 가압기에서 방출되는 증기를 효율적으로 응축시키기 위해, 증기는 PRT 하부에 설치된 Sparger

를 통해 물속으로 분사된다. PRT의 기능은 단순하지만, 과냉각된 물에 포화(혹은 과포화) 증기가 주입되면 비응축성 개스의 존재하의 급격한 응축, 상분리(Phase separation) 등이 발생하여 열수력적 거동모의에는 상당한 어려움이 따른다. ARTS의 일반화된 모델을 써서 PRT를 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 PRT를 모의하기 위한 전문모델을 개발했다[7].

- 붕소수송모델

원자로 반응도제어 수단의 하나로 원자로 냉각재 계통에는 화학 및 체적제어 계통을 통해 붕소를 주입하거나 희석시킨다. 원자로에서 붕소에 의한 반응도 변화를 정확하게 계산하려면 원자로 냉각재 계통 내부의 국부 붕소농도를 계산해야 한다. 붕소수송은 ARTS 코드의 고유기능을 이용할 수 있지만 비용/효과 측면에서 유리한 전문모델을 개발했다. 붕소는 원자로 냉각재에 용해되어 이송되기 때문에 ARTS코드가 해석한 원자로 냉각재의 거동을 이용하여 “1차원 붕소수송모델”[4]을 계산하도록 했다.

- 방사성 동위원소 및 기타 물질의 이송

붕소수송 모델과 마찬가지로 방사성 동위원소 및 기타 물질의 이송 역시 ARTS 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 6개의 영역으로 나누었다[6]. 즉, 가압기방출탱크, 가압기, 일차냉각계통 전체 및 각 증기발생기의 2차측을 각각 하나의 영역으로 두고 보존방정식을 푼다. 각 영역 내부에 모의대상 물질은 냉각재속에 균일하게 분포(혹은 용해)되어 있다고 가정한다.

- 보조계산체계 개발

ARTS 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 코드의 평가결과에 따르면 실질적으로 이와 같은 가능성은 대형냉각재 상실사고를 제외하면 아주 희박한 것으로 나타났다. 그렇지만, 시뮬레이터 NSSS 열수력 모델의 Robustness를 높이기 위해 ARTS 코드에서 계산실패가 발생할 경우 자동으로 이를 대체.보완할 수 있는 보조계산체계를 개발했다[5].

보조계산체계는 ARTS 코드의 열수력 모델이 실시간 계산이 불가능하거나 계산실패가 발생한 경우에 사용된다. ARTS 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 2

개, 즉, 가압기와 일차계통으로 분리하여 RCS 전체의 평균적인 거동을 먼저 계산하고 이를 바탕으로 그림 1의 제어체적에 대한 상세한 유동분포를 나중에 계산한다. 일차 계통을 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[5].

4. 요약 및 결론

영광 1호기 시뮬레이터 NSSS 열수력 프로그램이 갖고 있는 문제점, 즉, RCS 내부유동을 단상유동으로 처리하는 등 단순화된 물리적 모델을 개선하기 위해, 본 연구에서는 최적계산코드 RETRAN을 모체로 해서 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램인 ARTS를 개발했다.

이를 위해, 우선 RETRAN 코드의 영광 1/2호기 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. 현재 ARTS 코드는 성공적으로 개발되어 독자적인 시험(Non-Integrated Standalone Test) 및 영광 1호기 시뮬레이터 환경에서의 최종인수시험을 성공적으로 종료했다.

개발된 ARTS 코드는 기존의 단순화된 NSSS 열수력 모델로 인한 Negative Training의 가능성에서 탈피할 수 있게 하며, 시뮬레이터를 최적(Best-Estimate) 환경에서 운전원의 훈련 및 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and Examination, ANSI/ANS-3.5-1998, American Nuclear Society (1998).
2. M. P. Paulsen et al., RETRAN 3D code manual, EPRI NP-7450, Electric Power Research Institute (1998).
3. RELAP5 Code Development Team, RELAP5/MOD3 code manual, NUREG/CR-5355, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1995).
4. 영광 원자력 1호기 최종안전성 분석 보고서(개정본), 한국전력공사, 1995. 1.
5. 이명수 외, 원자력교육원 2호기 시뮬레이터 성능개선, 00-전력연-단165, 한국전력공사 전력연구원, 2000.4.
6. 정재준 외, “최적코드를 이용한 원자력교육원 시뮬레이터 2호기용 최신 NSSS 열수력 프로그램의 시험결과”, 한국원자력학회 2001년도 춘계학술발표회.
7. 서재승 외, “가압기방출탱크의 열수력적 거동모의를 위한 간단한 수치해석 모델”, 한국원자력학회 1999년도 추계학술발표회, 1999. 10. 31, 서울대학교.