

최적 계통분석 코드를 이용한 웨스팅하우스형 원자력발전소 시뮬레이터용 핵 증기 공급 계통 열수력 프로그램 개발

서재승*, 전규동**, 이명수***, 이용관***

Development of An Nuclear Steam Supply System
Thermal-Hydraulic Program for the Westinghouse Type Nuclear
Power Plant Simulator Using A Best-Estimate Code

J.S. Suh, G.D. Jeun, M.S. Lee, Y.K. Lee

Abstract

KEPRI has developed an Nuclear Steam Supply System(NSSS) thermal-hydraulic simulation program (called ARTS-KORII) based on the best-estimate system code, RETRAN, as a part of the development project for the KORI unit 1 nuclear power plant 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-KORII.

Key Words: 최적계통코드, RETRAN, ARTS

* (주) 미래와 도전, ** 한양대학교 시스템응용공학부
*** 한국전력공사 전력연구원

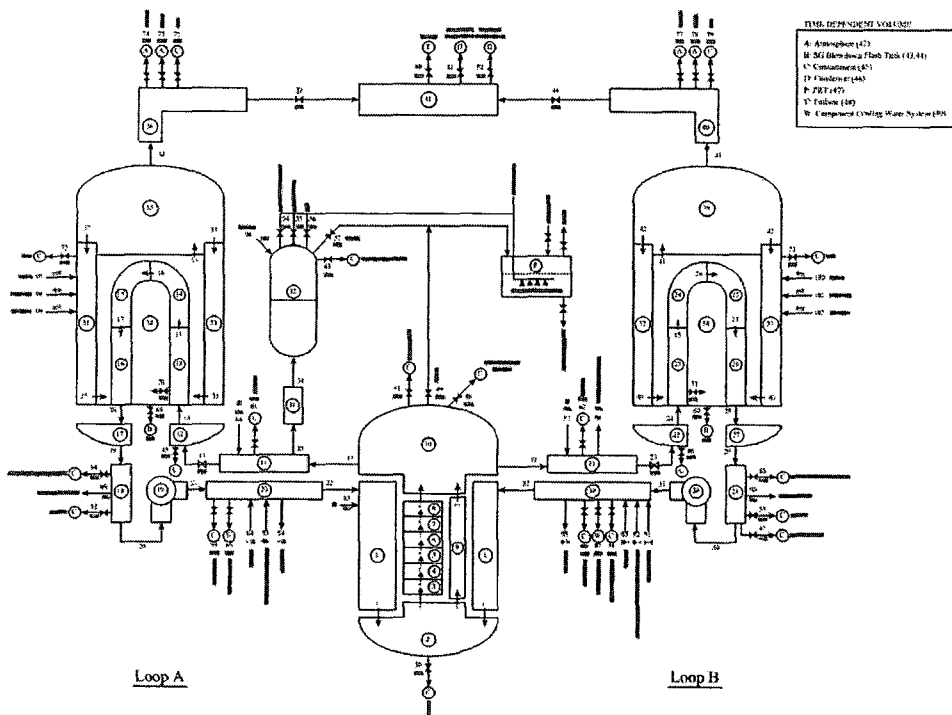
1. 서론

한국전력공사 전력연구원은 최적 계통분석 코드인 RETRAN을 이용하여 원자력교육원 시뮬레이터 2호기의 핵 증기 공급 계통 열수력 프로그램(ARTS 코드라 명명함)을 개발한 바 있으며^[1,2], 본 연구에서는 ARTS 코드 개발경험을 활용하여 웨스팅하우스형 원자력발전소 고리1호기^[3]의 시뮬레이터용 핵 증기 공급 계통 열수력 프로그램(ARTS-KOR11이라 함)을 개발하였다.

원래 RETRAN^[4]은 최적 계통분석 코드로 개발된 것인데, 이를 시뮬레이터용으로 개발하기 위해 여러 가지 수정 및 개선이 필요했다. 즉, 실시간 계산 및 건전성 요건^[5]을 만족

시킬 수 있도록, RETRAN 코드에서 사용되는 복잡한 물리적 상관식을 단순화하고 유동 영역에 따른 불연속성을 제거함으로써, 코드의 건전성을 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. 또한 RETRAN 코드의 모의영역을 벗어나는 대형 냉각재 상실사고 등을 모의하기 위해 전문화된 모델을 개발했으며, 이 전문모델을 ARTS-KOR11 코드와 기술적으로 연계하여 사용자가 모델변화를 감지할 수 없도록 하였다.

본 논문에서는 ARTS-KOR11 코드 개발에 사용된 RETRAN 코드에 관해 간략히 설명하고, ARTS-KOR11 코드의 개발 및 고유 특성에 관해 설명한다.



<그림 1> 웨스팅하우스형 고리1호기 ARTS 노달 도면

2. RETRAN 열수력 모델

RETRAN 코드는 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)가 원자력 발전소의 계통 열수력 과도현상 해석을 위해 개발한 최적 계통분석코드이다^[4]. 본 연구에서는 최신

버전인 RETRAN 3D를 기본 코드로 채택하고 있다. 이 RETRAN 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 모델을 채용한다. 이 모델의 지배방정식은 다음과 같다:

- 혼합체(Two-phase mixture) 질량보존식

$$\frac{d}{dt}M_k = \left[\sum_j W_j \right]_{inlet} - \left[\sum_j W_j \right]_{outlet} \quad (1)$$

- 기체의 질량보존식

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}M_{gk} = & \left[\sum_j (X_g^m W - X_g^m X_l^m \rho A V_{SL})_j \right]_{inlet} \\ & - \left[\sum_j (X_g^m W - X_g^m X_l^m \rho A V_{SL})_j \right]_{outlet} \\ & + \Gamma_g \end{aligned} \quad (2)$$

- 운동량 보존 방정식

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{2} \frac{L_k}{A_k} + \frac{1}{2} \frac{L_l}{A_l} \right) \frac{dW_j}{dt} = & (P_k - P_l) + \left(\frac{\bar{W}_k^2}{\rho_k A_k^2} \right) - \left(\frac{\bar{W}_l^2}{\rho_l A_l^2} \right) \\ & + \frac{1}{2\rho_j} \left[1 + \bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \left(\frac{V_{SLj}}{V_j} \right)^2 \right] \left[\frac{1}{A_l^2} - \frac{1}{A_k^2} \right] W_j^2 \\ & + [\bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \bar{\rho} A]_k \bar{V}_{SLk}^2 - [\bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \bar{\rho} A]_l \bar{V}_{SLl}^2 \\ & - \left(\frac{F_{W,j}}{A_k} + \frac{F_{W,j}}{A_l} \right) \bar{\rho}^{2\phi,j} W_j |W_j| - \left(\frac{K_j}{2\rho_j A_j^2} \right) W_j |W_j| \\ & - \left(\int_k^j \rho dz + \int_j^l \rho dz \right) g + \frac{1}{2} \Delta P_p \end{aligned} \quad (3)$$

- Slip 속도상관식

$$V_{SL} = \frac{V(1 - C_0) - V_{gj}}{(1 - \alpha) \left[\frac{\rho_{ls}}{\rho} - \alpha C_0 \frac{(\rho_{ls} - \rho_{gs})}{\rho} \right]} \quad (4)$$

- 에너지 보존 방정식

$$\begin{aligned} \frac{dU_k}{dt} = & \left[\sum_j \{ W_j h_j + \bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \rho_j A_j V_{SLj} (h_j^l - h_j^g) \} \right]_{inlet} \\ & - \left[\sum_j \{ W_j h_j + \bar{X}_j^m (1 - \bar{X}_j^m) \rho_j A_j V_{SLj} (h_j^l - h_j^g) \} \right]_{outlet} \\ & + Q_k \end{aligned} \quad (5)$$

- 상태방정식

$$p_k = p(M_k, M_{V_k}, U_k) \quad (6)$$

위에서 설명한 5개 지배방정식에 상태방정식을 도입하여 수리적인 닫힘(Mathematical closure)을 이룬 다음, 유한차분법을 사용하여

지배방정식의 해를 구한다. 이때 지그재그 형태의 격자계(Staggered grid mesh)를 채택하며, Fully-implicit time scheme을 사용하여 임의의 시간구간에 대해서도 항상 안정된 해를 구할 수 있게 한다^[1].

3. ARTS-KORII 코드 개발

ARTS-KORII 코드 개발 업무는 발전소 기하입력 모델 개발, 건전성 및 실시간 계산 능력 보안을 위한 RETRAN 코드 개선, 기타 모델 개발, 코드 평가 등의 네 부분으로 나눌 수 있다.

3.1. 발전소 기하입력 모델 개발

ARTS-KORII 코드를 이용하여 고리 1호 기 핵 증기 공급 계통을 모사하기 위해 우선 기하입력 자료를 만들어야 한다. ARTS-KORII의 고리 1호기 기하입력 형태는 그림 1에 나타난 바와 같이, 원자로 계통은 총 49개의 제어체적(Control volume)과 124개의 필(Fill) 및 정선(Normal junction)으로 구성되어 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 물리적 현상을 적절히 모의할 수 있도록 했다.

3.1.1 원자로 압력 용기

원자로압력용기는 크게 압력용기 헤드, 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 우회유로는 별도의 체적으로 모사하지 않고 압력용기 헤드 체적에 포함시켰으나 노심 우회유량의 경우에는 별도의 체적으로 모델링 했다. 노심영역은 6개의 제어체적으로 나누었다.

3.1.2 가압기

가압기는 루프(Loop) A의 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 모델링을 하지만 Bubble-rise모형을 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 2개의 저온관을 각기 모델했다. 각 루프는 1개의 고온관, 1개의 저온관 및 냉각재 펌프, 중간 냉각재관(Cross-over leg), 증기발생기 1차계통으로 구성된다. 정상운전에 필요한 유출수 유로, 배수유로, 잔열제거펌프 흡입유로, 가압기 살수유로 등이 냉각루프에 설치된다. 각종 과도상태 및 고장운전을 모의할 수 있도록 안전주입유로 및 각종 파단유로 등을 필 정션(Fill Junction) 및 밸브로 연결하여 모델링 하였다.

3.1.4 증기발생기

증기발생기의 2차 계통은 크게 강수관, 가열기 및 증기 돔(Dome)의 3부분으로 나누며 증기돔은 1차 습분 분리기와 2차 습분분리기 및 상부 강수관 일부를 포함하는 영역과 순수 증기돔 영역을 포함시켰다. 증기돔은 Bubble-rise모형을 사용하여 증기와 물을 분리할 수 있도록 모델링 했다. 또한 강수관을 나타내는 제어체적도 강수관의 수위 감소에 따라 상분리가 예상되므로 증기돔과 같이 Bubble-rise모형을 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. 건전성 및 실시간 계산능력 보안을 위한

RETRAN 코드 개선

ARTS-KORII의 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 건전성이 보장되지 않기 때문에 시뮬레이터용으로 개발하기 위해서는 모델 개선이 필요하다. 유동영역에 따른 불연속성 제거, 물리적 상관식의 단순화, 일부 상관식의 미분항(Derivative terms) 추가를 통한 Implicitness 증대 등의 코드개선 및 시뮬레이터의 핵 증기 공급 계통 열수력 모듈로 사용하기 위한 각종 연계 개발 등 광범위한 코드 개선을 수행했다.

3.2.1 슬립(Slip) 모델 개선

RETRAN 3D에서는 이상유동에서 액상과 기상의 속도차를 고려하기 위해 동적슬립 모델(Dynamic slip model) 혹은 대수 슬립 모델(Algebraic slip model) 중 사용자가 선택하여 사용할 수 있다. 동적 슬립 모델은 속도차에 대한 미분방정식의 해를 구하기 때문에 상간 속도차의 시간에 따른 변화를 현실적으로 계산하지만 계산 시간의 많이 소요되는 단점이 있다. 반면에 대수 슬립 모델은 실험식으로부터 액상과 기상의 속도차를 계산하기 때문에 지난 계산시간 값에 대한 고려 없이 가상의 정상상태(pseudo steady)를 가정하여 상간 속도차를 계산하지만 계산 소요시간이 적어 실시간 계산이 요구되는 시뮬레이터에서는 대수 슬립 모델을 선택했다.

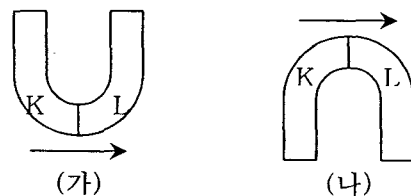


그림 2. 슬립 속도의 부호가 왜곡될 수 있는 정션

대수 슬립 모델은 실험식에 의해 상간 속도차를 계산하기 때문에 슬립 속도($v_g - v_l$)의 부호(Sign)는 기하입력 모델의 형태에 정선의 하류(Downstream)와 상류(Upstream) 흐름의 제어체적 중심의 높이차이로 슬립 속도의 부호를 결정한다. 이와 같이 양편의 제어체적 중심의 높이로만 슬립속도의 부호를 결정하면 특정형태의 입력모델에서 액상과 기상의 흐름이 왜곡될 수 있다.

예를 들면, 그림 2의 (가) 경우는 액상이, (나)의 경우는 기상이 더 빨리 흐르게 되나 RETRAN 슬립 모델을 적용하면 기상과 액상이 같은 속도로 흐르는 것으로 예측하게 된다. 이를 개선하기 위해 ARTS-KORII에서는 정선의 양쪽 제어체적의 중심과 정선의 높이 차를 기초로 슬립 속도의 부호를 결정하도록 하여 유동이 왜곡되는 가능성을 배제하였다. 또한 수평관(Horizontal pipe)에서는 상간의 속도차가 없다고 가정하기 때문에 수평으로 배치된 두개의 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 상간 열전달 모델(Interfacial heat transfer model)은 기포울과 유속 등에 의해 다양한 유동영역로 나누어 계산하도록 되어 있어 유동영역을 가로지를 때마다 물리적 상관식의 불연속성 때문에 고정계산시간 간격의 유지가 어렵다. ARTS-KORII에서는 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-KORII에서는 이를 보완하여

연속된 여러 체적에 걸쳐 수위가 변하는 경우도 모의할 수 있도록 보완하였다.

3.3. 전문 모델 개발

ARTS-KORII 코드는 근본적으로 다양한 물리현상을 일반화하여 모델 했기 때문에 핵중기 공급 계통에서 발생하는 거의 모든 물리 현상을 모의할 수 있다. 그런데, 경우에 따라 일반화된 모델 보다는 전문화된 모델이 계산시간 및 건전성 관점에서 유리할 수 있으므로 일부 기능에 대해서는 전문 모델을 개발했다.

3.3.1 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. 가압기방출탱크 하부에는 대기압, 과냉각 상태의 물이 채워져 있으며 상부에는 질소가스가 주입되어 있다. 가압기에서 방출되는 증기를 효율적으로 응축시키기 위해, 증기는 가압기방출탱크 하부에 설치된 살수기(Sparger)를 통해 물속으로 분사된다. 가압기방출탱크의 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-KORII의 일반화된 모델을 써서 가압기방출탱크를 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 가압기방출탱크를 모의하기 위한 전문모델을 개발했다¹⁶⁾.

3.3.2 붕소, 방사성동위원소 및 기타 물질의 이송

붕소, 방사성 동위원소 및 기타 물질의 이송은 ARTS-KORII 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, 원자로배수 탱크, 가압기, 일차냉각계통 전체 및 각 증기 발생기의 2차측을 각각 하나의 영역으로 두고 보존방정식을 푼다. 각 영역 내부에 모의 대상 물질은 냉각재속에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다.

3.3.3 보조계산체계

ARTS-KORII 코드는 거의 대부분의 사고를 실시간에 모의할 수 있으며 계산의 건전성도 보장된다. 그러나, 대형냉각재 상실사고나 저압 저유속 상태의 장기 과도현상 등을 모의할 경우에는 계산실패나 실시간 계산 지체 등의 가능성을 배제할 수는 없다. 지금까지 ARTS-KORII 코드의 평가결과에 따르면 실질적으로 이와 같은 가능성은 대형냉각재 상실사고를 제외하면 아주 희박한 것으로 나타났다. 그렇지만, 시뮬레이터 핵 증기 공급계통 열수력 모델의 건전성을 높이기 위해 ARTS-KORII 코드에서 계산실패가 발생할 경우 자동으로 이를 대체할 수 있는 보조계산체계를 개발했다[1].

보조계산체계는 ARTS-KORII 코드의 열수력 모델이 실시간 계산이 불가능하거나 계산실패가 발생한 경우에 사용된다. ARTS-KORII 코드에서 계산실패가 발생하기 전에 반드시 계산실패의 징후가 나타나는데 이 시점이 포착되면 보조계산체계를 초기화시키고 그 다음 시간간격부터는 보조계산체계를 써서 과도현상을 모의하도록 한다. 이 모델에서는 일차냉각계통 전체를 제어체적 2개, 즉, 가압기와 일차계통으로 분리하여 일차냉각계통 전체의 평균적인 거동을 먼저 계산하고 이를 바탕으로 그림 1의 제어체적에 대한 상세한 유동분포를 나중에 계산한다. 일차계통을 모델하기 위한 균질 평형모델(Homogeneous Equilibrium Model)을 사용하

며, 일차계통의 상세한 유동분포는 펌프의 각 운동량(Angular momentum) 방정식과 루프 운동량(Loop momentum) 방정식을 써서 구한다. 모든 펌프가 정지된 경우에는 상분리 개념을 사용한다.

4. 요약 및 결론

전력연구원에서는 원자력교육원 시뮬레이터 2호기 핵 증기 공급계통 열수력 프로그램개발 경험을 바탕으로 고리 1호기 시뮬레이터용 핵 증기 공급계통 열수력 프로그램 ARTS-KORII를 개발하였다.

ARTS-KORII 프로그램은 기존 시뮬레이터가 가지고 있던 문제점, 즉, 일차냉각계통 내부유동을 혼합 유동으로 처리하는 등의 단순화된 물리적 모델을 개선하기 위해, 최적계산코드 RETRAN을 모체로 해서 고리 1호기 시뮬레이터에 적합하도록 개발한 것이다. 이를 위해, 우선 RETRAN 코드의 고리 1호기 입력모델을 개발하고 민감도 분석을 통해 최적 제어체적의 수를 결정했으며, 그 다음 복잡한 물리적 상관식을 단순화하고 불연속성을 제거하여 프로그램의 건전성을 보완함과 동시에 실시간 계산이 가능하도록 개선했다. 또한, RETRAN 코드가 지원하지 않거나 비용/효과 측면에서 불리한 일부 모델은 새로 개발했다.

지금까지 ARTS-KORII 코드는 성공적으로 개발되어 독자적인 성능 시험을 이미 완결되었으며, 현재 시뮬레이터 환경에 탑재되어 노심 및 보조설비계통 모델과의 연계 및 평가가 진행되고 있다^[7]. ARTS-KORII 코드가 성공적으로 고리 1호기 시뮬레이터 장착되면, 기존의 단순화된 핵 증기 공급계통 열수력 모델로 인한 부정적인 훈련의 가능성에서 탈피할 수 있으며, 시뮬레이터를 최적 환경에서 운전원의 훈련 및 평가에 활용할 수 있다^[8].

후기

본 연구는 “고리 1호기 VR(Virtual Reality)

시뮬레이터 개발”의 세부과제로 수행 하였으며 연구비 지원을 해준 전력연구원에 감사드립니다.

기호설명

A : Area [m²]
 C : Parameter[-]
 F : Friction factor[-]
 h : Enthalpy [J/kg]
 K : Form loss [-]
 L : Length[m]
 M : Mass [kg]
 P : Pressure [bar]
 Q : Heat[J/kg]
 U : Total internal energy[J/kg]
 V : Control volume [m³]
 W : Mass flow rate [kg/s]
 X : Quality[-]

그리스문자

α : Void fraction [-]
 ρ : Density [kg/m³]
 I : Vapor generation[-]
 $\Phi_{2\phi}^2$: Two-phase friction multiplier[-]

첨자

SL : Saturation Liquid

참고문헌

- [1] 이명수 외, 원자력교육원 2호기 시뮬레이터 성능개선, 01-전력연-단251, 한국전력공사 전력연구원 (2001).
- [2] 김경두 외, "최적코드를 이용한 원자력교육원 시뮬레이터 2호기용 최신 NSSS 열수력 프로그램 개발", 춘계학술발표회, 한국원자력학회 (2001).
- [3] KHNP, "Kori Units 1, Final Safety Analysis Reports" (1989).
- [4] M. P. Paulsen et al., RETRAN 3D code manual, EPRI NP-7450, Electric Power Research Institute (1998).
- [5] Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and Examination, ANSI/ANS-3.5-1998, American Nuclear Society (1998).
- [6] 서재승 외: "가압기방출탱크의 열수력적 거동 모의를 위한 간단한 수치해석 모델", 춘계학술발표회, 한국원자력학회(1999).
- [7] Suh, J.S., et al.: "The Development of Virtual Simulator for Kori #1 Power Plant", KEPRI (2002).
- [8] 서재승 외, "최적 계통분석 코드를 이용한 웨스팅하우스형 원자력발전소 시뮬레이터용 핵 증기 공급 계통 열수력 프로그램 독자평가 및 시험", 춘계학술발표회, 한국시뮬레이션학회 (2004).