

## 웨스팅하우스형 원자력발전소 가압기 방출 탱크의 실시간 시뮬레이션을 위한 전문모델 개발

서재승\*, 전규동\*\*

### Development of a Dedicated Model for a Real-Time Simulation of the Pressurizer Relief Tank of the Westinghouse Type Nuclear Power Plant

Jae-Seung Suh, Gyoo-Dong Jeun

#### Abstract

The thermal-hydraulic model ARTS which was based on the RETRAN-3D code adopted in the domestic full-scope power plant simulator which was provided in 1998 by KEPRI. Since ARTS is a generalized code to model the components with control volumes, the smaller time-step size should be used even if converged solution could not get in a single volume. Therefore, dedicated models which do not force to reduce the time-step size are sometimes more suitable in terms of a real-time calculation and robustness. In the case of PRT(Pressurizer Relief Tank) model, it is consist of subcooled water in bottom and non-condensable gas in top. The sparger merged under subcooled water enhances condensation. The complicated thermal-hydraulic phenomena such as condensation, phase separation with existence of non-condensable gas makes difficult to simulate. Therefore, the PRT volume can limit the time-step size if we model it with a general control volume. To prevent the time-step size reduction due to convergence failure for simulating this component, we developed a dedicated model for PRT. The dedicated model was expected to provide substantially more accurate predictions in the analysis of the system transients. The results were reasonable in terms of accuracy, real-time simulation, robustness and education of operators, complying with the ANSI/ANS-3.5-1998 simulator software performance criteria and RETRAN-3D results.

**Key Words:** 가압기방출탱크, 실시간, 전문모델, 최적계통코드, RETRAN, ARTS

\* (주) 미래와 도전

\*\* 한양대학교 시스템응용공학부

## 1. 서론

국내에 설치되어 있는 원전 시뮬레이터의 핵증기 공급계통 (Nuclear Steam Supply System; NSSS) 열수력 프로그램은 실시간 계산과 건전성 요건을 만족시키기 위해 과도한 단순화 및 충분한 검증 부족으로 현실적으로 과도상태를 모의하는데 어려움이 있었다. 기존 시뮬레이터의 문제점이 인식되고 전산환경도 급속도로 발달함에 따라 1990년대 초반부터 최적 계산코드를 시뮬레이터용 NSSS 열수력 프로그램으로 전환/개발하려는 움직임이 대두되기 시작했다[4]. 고리 원자력교육원 시뮬레이터 2호기에 채용되는 NSSS 열수력 프로그램인 ARTS를 최적 계산코드인 RETRAN-3D를 기본으로 1998년에 전력연구원과 한국원자력연구소가 공동으로 개발하였다[5]. 이와 같이 최적코드를 시뮬레이터용으로 개발하여 장착하면, 기존의 단순화된 모델에서 비롯되는 저신뢰도 모의결과로 인한 부정적인 훈련의 가능성에서 탈피하여, 시뮬레이터를 최적 환경에서 운전원의 훈련 및 평가에 활용할 수 있다.

RETRAN-3D 코드를 기본으로 하는 ARTS 코드는 원자로 계통을 다수의 제어체적으로 나누어 모델하는데 단 하나의 제어체적에서도 만족스러운 해가 구해지지 않으면 시간구간의 크기를 축소시켜서 재계산 한다. 원전 시뮬레이터는 실시간 계산이 가장 중요한 항목으로 시간구간의 크기를 축소시키지 않는 전용모델을 사용하는 것은 실시간 계산 및 건전성측면에서 좀더 바람직하다.

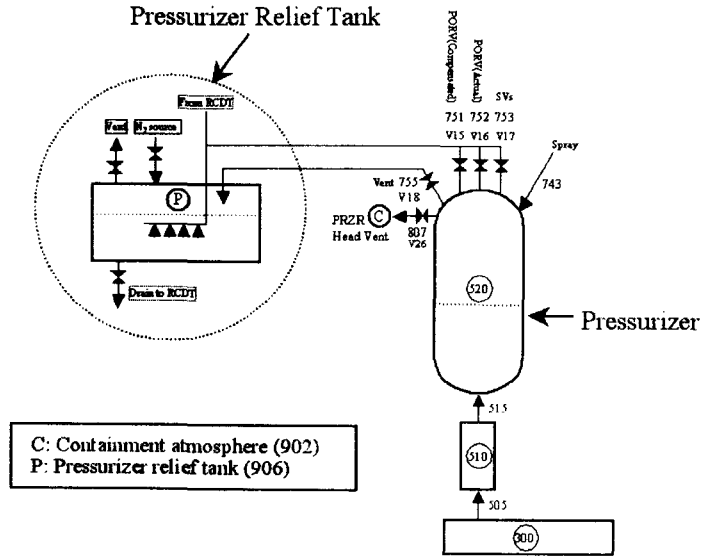
원자로 계통이 과압될 때는 감압을 위해 가압기의 증기를 방출시키는데, 가압기방출탱크는 방출된 증기를 수용하고 응축시키는 기능을 담당한다. 가압기방출탱크 하부에는 대기

압, 과냉각 상태의 물이 채워져 있으며 상부에는 질소가스가 주입되어 있다. 가압기에서 방출되는 증기를 효율적으로 응축시키기 위해, 증기는 가압기방출탱크 하부에 설치된 분무기를 통해 물속으로 분사된다(<그림 1> 참조). 질소가스 공간은 탱크내부 압력 조정과 증기 유입에 따른 물의 팽창을 수용하며, 정상 운전시 압력증가가 4.4 기압(50psig)을 초과하지 않도록 질소공간의 체적을 결정한다. 가압기방출탱크 내부의 물의 온도는 원자로배수탱크 (Reactor coolant drain tank; RCDT) 와 가압기방출탱크간의 주입/배출 운전을 통해 일정하게 유지시킨다.

이와 같이 가압기방출탱크의 기능은 단순하지만, 열수력적 거동모의에는 상당한 어려움이 따른다. 가압기방출탱크 내부 열수력적 거동의 특성을 요약하면, 과냉각된 물에 포화(혹은 과포화) 증기 주입으로 인한 급격한 응축현상, 비응축성 가스의 존재, 상분리(Phase separation) 등을 들 수 있다. 각각의 특성이 수치해석상의 어려움을 가중시키는 요소라 할 수 있다.

ARTS를 이용하여 원자로 계통을 모사할 때 기본적으로 원자로 노심, 일차측 냉각재 계통, 가압기 및 증기발생기등은 RETRAN 모델을 이용하여 모의했다. 그 외 다른 구성요소는 전문모델을 적용하였다[6]. 가압기방출탱크를 별도의 열수력 제어체적으로 모델링하면 비교적 정확한 계산결과를 얻을 수 있지만, 계산시간이 증가할 뿐만 아니라 위에서 언급한 특성으로 인해 시간구간의 크기를 축소시키는 직접적인 요인이 되어 결과적으로 비용/효율 측면에서 바람직하지 않다.

본 연구에서는 가압기방출탱크를 효율적으로 모의하기 위해 단순하면서도 사실적인 열수력 모델 및 수치해석 방법을 개발했다.



<그림 1> 웨스팅하우스형 고리1호기 원전용 가압기방출탱크 노달 도면

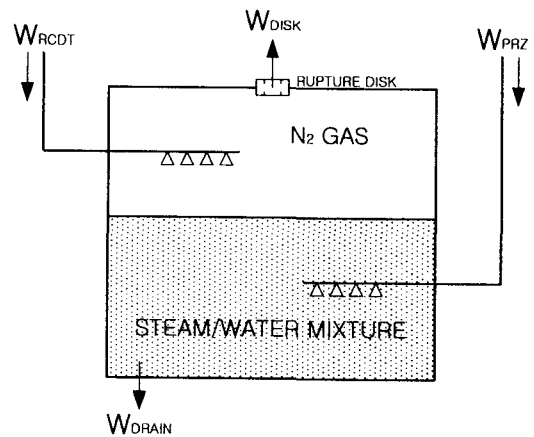
## 2. 가압기방출탱크 열수력 모델

가압기방출탱크와 연계된 질량 및 에너지의 유출입 경로가 <그림 2>에 나와 있다. 가압기방출탱크 내부압력은 질소가스와 물/증기 혼합체의 총 질량 및 에너지 균형에 의해 결정된다. <그림 2>의 파단판(Rupture disk)은 내부압력이 설정압력에 도달하면 파단되어 가압기방출탱크와 격납용기 사이의 유로를 형성한다.

가압기방출탱크 내부의 열수력적 거동을 모의하기 위해 다음 가정을 도입했다:

- 가압기방출탱크 내부의 증기, 물, 비응축성 가스는 열적 평형을 유지한다.
- 파단판이 파손되면, 비응축성 가스가 먼저 격납용기로 방출되고 그 다음으로 물과 증기의 혼합체가 방출된다.
- 가압기방출탱크 내부 압력이 격납용기

압력보다 낮아지면 파단판을 통해 비응축성 가스가 유입된다.



<그림 2> 가압기방출탱크의 질량 및 에너지 유출입 경로의 개략도

가압기방출탱크 내부의 물/증기 혼합체와 비응축성 가스의 질량 및 에너지 보존 방정식은

다음과 같다.

물/증기 혼합체의 질량 보존방정식

$$\frac{dM_w}{dt} = W_{PRZ} + W_{RCDT} - W_{drain} - W_{Diskw} \quad (1)$$

비응축성 가스의 질량 보존방정식

$$\frac{dM_N}{dt} = - W_{diskN} \quad (2)$$

물/증기 혼합체의 에너지 보존방정식

$$\frac{dE_w}{dt} = W_{PRZ}h_{PRZ} + W_{RCDT}h_{RCDT} - W_{drain}h_{drain} - W_{Diskw}h_{Diskw} \quad (3)$$

물/증기 혼합체의 상태방정식

$$\rho = \rho(P, h) \quad (4)$$

비응축성 가스의 상태방정식

$$PV_N = M_N R_N T_N \quad (5)$$

위의 식 (1)~(5)에서 비응축성 가스의 에너지 보존방정식은 별도로 모의하지 않고 앞에서 언급한 바와 같이 비응축성 가스는 물/증기 혼합체와 열적 평형을 가정하여 같은 온도로 둔다. 파단판을 통한 방출유량은 다음과 같이 간단하게 구현한다.

$$W_{DiskX} = A_{Disk} \min(\sqrt{K\rho_X(P_{PRT} - P_{CNT})}, G_{Crit}(P_{PRT}, h_{Disk})) \quad (6)$$

**3. 수치해석 방법**

앞에서 설명한 열수력 모델을 이용하여 가압기방출탱크의 거동을 모의하기 위해 일계유한차분법(First-order finite difference method)을 사용하였다. 가압기방출탱크로 유입/유출되는 질량 및 에너지는 경계조건으로 두었다. 격납용기 압력을 경계조건으로 파단판을 통한 방출유량을 계산한다. 이때, 파단판 방출유량은 음함수 차분법(Implicit difference method)을 써서 계산의 안정성을 도모했다.

파단판 방출유량을 다음과 같이 계산한다.

$$W_{DiskX}^{n+1} = A_{Disk} \sqrt{K\rho_X^{n+1}(P_{PRT}^{n+1} - P_{CNT})} \quad (7)$$

여기에서 (n+1)은 새로운 시간구간을 의미하며, A<sub>Disk</sub>는 파단판의 면적으로 파단판이 닫혀 있을 때는 0(Zero)이 된다. 식 (7)의 우변에는 미지수가 포함되어 있으므로 파단판 방출유량은 다른 방정식과 연계된 반복계산을 통해 구할 수 있다. 식 (7)의 우변에 나오는 밀도를 구하기 위해 파단판을 통해 방출되는 유체의 엔탈피 h<sub>Disk</sub>를 먼저 근사한다.

<표 1> 각 조건에서의 유체 엔탈피 h<sub>Disk</sub> 값

조건	h <sub>Disk</sub>
M <sub>N<sub>2</sub></sub> ≥ 0	h <sub>N<sub>2</sub></sub>
M <sub>N<sub>2</sub></sub> = 0 and α <sub>PRT</sub> = 1.0	h <sub>PRT</sub>
M <sub>N<sub>2</sub></sub> = 0 and 0.0 < α <sub>PRT</sub> ≤ α <sub>Tran</sub>	( $\frac{\alpha_{PRT}}{\alpha_{Tran}}$ (h <sub>g</sub> - h <sub>f</sub> ) + h <sub>f</sub> )
M <sub>N<sub>2</sub></sub> = 0 and α <sub>Tran</sub> ≤ α <sub>PRT</sub> < 1.0	h <sub>g</sub>
M <sub>N<sub>2</sub></sub> = 0 and α <sub>PRT</sub> = 0	h <sub>PRT</sub>

<표 1>에서  $h_{Disk}$ 를 구하면 상태방정식을 써서 식 (7)의 우변에 나오는 밀도를 계산할 수 있다. 여기에서  $\alpha_{Tran}$ 은 0.3을 사용하였다[3]. 식 (1)~(3)을 유한차분법을 적용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M_w^{n+1} = M_w^n + \Delta t(W_{PRZ} + W_{RCDT} - W_{drain} - W_{Disk}^{n+1}) \quad (8)$$

$$M_N^{n+1} = M_N^n - \Delta t W_{Disk}^{n+1} \quad (9)$$

$$E_w^{n+1} = E_w^n + \Delta t(W_{PRZ}h_{PRZ} + W_{RCDT}h_{RCDT} - W_{drain}h_{drain} - W_{Disk}^{n+1}h_{Disk}^{n+1}) \quad (10)$$

그런데, 물/증기 혼합체와 비응축성 가스의 총체적은 항상 가압기방출탱크 내부체적과 같다. 따라서 다음 식을 쓸 수 있다:

$$V_{PRT} = V_w + V_{N_2},$$

혹은

$$V_{PRT} = (M_w/\rho_w) + (M_{N_2}/\rho_{N_2}) \quad (11)$$

식 (11)에 식 (7)~(10)을 대입하여 정리하면 식 (11)는 다음과 같다:

$$V_{PRT} = \frac{M_w^n}{\rho(P^{n+1}, h_{PRT}^{n+1})} + \frac{\Delta t A_{Disk} \sqrt{K \rho_{Disk}^{n+1} (P_{PRT}^{n+1} - P_{CNT})}}{\rho(P^{n+1}, h_{PRT}^{n+1})} - \left( \frac{\Delta t A_{Disk} \sqrt{K \rho_{Disk}^{n+1} (P_{PRT}^{n+1} - P_{CNT})}}{P^{n+1}} \right) \times R_{N_2} T_{N_2}^n + \frac{M_{N_2}^n R_{N_2} T_{N_2}^n}{P^{n+1}} \quad (12)$$

여기에서

$$\rho_{DiskN}^{n+1} = \frac{P^{n+1}}{R_{N_2} T_{N_2}^n}$$

$$\rho_{Diskw}^{n+1} = \rho(P^{n+1}, h_{Disk}^{n+1})$$

식 (12)에는 3개의 미지수가 포함되어 있다.  $h_{Diskw}$ 를 <표 1>과 같이 근사하되 새로운 시간구간의 이전 계산 값으로 대체하면 단지 2개의 미지수 압력  $P$ 와 엔탈피  $h_{PRT}$ 가 남는다.  $h_{PRT}$ 는 다음과 같이 근사한다.

$$\tilde{h}_{PRT}^{n+1} \approx \tilde{E}^{n+1}/\tilde{M}^{n+1} \quad (13)$$

여기에서

$$\tilde{M}^{n+1} = M_w^n + \Delta t(W_{PRZ} + W_{RCDT} - W_{drain} - W_{Disk}^n)$$

이고

$$\tilde{E}^{n+1} = E^n + \Delta t(W_{PRZ}h_{PRZ} - W_{Drain}h_{Drain} + W_{RCDT}h_{RCDT} - W_{Disk}^n h_{Disk}^n)$$

이다.

식 (13)를 식 (12)에 대입하면 결과적으로 식 (12)에는 새로운 시간구간의 압력만이 미지수로 남게 된다. 식 (12)은 압력에 관한 비선형방정식이므로 뉴턴-랩슨법을 써서 압력  $P^{n+1}$ 을 구한다.  $P^{n+1}$ 이 구해지면 나머지 변수들은 역치환을 통해 얻을 수 있다. 식 (12)을 뉴턴-랩슨법으로 계산할 때, 수렴기준으로는 압력변화량의 절대값이  $10^{-6}$ 기압 이하를 만족하도록 하였다.

#### 4. 계산결과

가압기방출탱크 모델에서 필요한 입력은 유입/방출 유량 및 엔탈피이다. 이중 유입 유량 및 엔탈피는 ARTS에서 받아오는 값이고 가

압기방출탱크 모델에서는 이를 이용하여 방출 유량을 예측하여 이를 다음 시간구간에서 다시 입력 자료로 사용한다. 이밖에 디스크의 개폐 여부를 알려주는 논리변수와 유출 유량 및 엔탈피와 격납용기 압력 등은 별도의 초기화 부프로그램을 이용하여 변수값을 초기화 시켜준다.

<표 2> 고리1호기 원전의 가압기 방출탱크의 설계 및 초기값

Parameter	Value
Water volume(m <sup>3</sup> )	23.22
N <sub>2</sub> volume(m <sup>3</sup> )	7.93
Design temperature(°C)	171.11
Design pressure(bar)	7.91
Rupture disk capacity(kg/s)	95.76
Normal temperature(°C)	48.89
Normal pressure(bar)	1.22

가압기방출탱크 모델을 평가하기 위해 고리 원자력 1호기 가압기방출탱크를 대상으로 프로그램을 작성하였다. 고리 원자력 1호기 가압기방출탱크의 설계 및 초기 운전조건[2]은 <표 2>에 나와 있다.

<표 3> 시나리오 및 조건

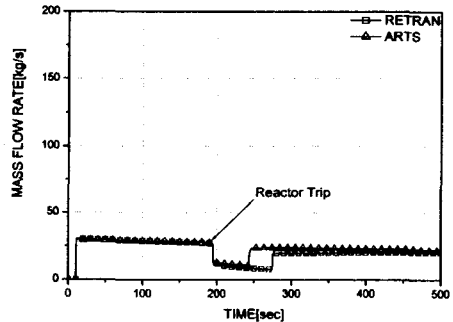
Scenario and Conditions
Scenario : PORV open and steam injection.
Conditions : $W_{PRZ} = 27.22 \text{ kg/s}$ , $h_{PRZ} = 1631.57 \text{ kJ/kg}$ .

본 연구에서 개발한 가압기방출탱크 모델을 검증하기 위해서 기본적인 다음 시나리오 (<표 3> 참조)를 적용하고 모의결과에 대해

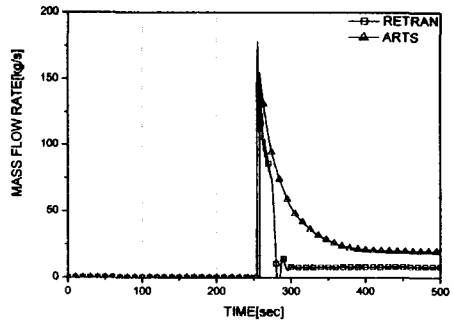
서 검토한다.

시나리오: PORV 개방 및 증기 주입

고리 1호기 가압기에는 PORV (Power Operated Relief Valve) 2개와 SV (Safety Valve) 2개가 장착되어 있다. 본 논문에서는 2개의 가압기 PORV에서 1개를 개방하였으며, 증기유량은 대략 30 kg/s이다. 이 시나리오를 RETRAN 코드로 모의하고 그 결과를 ARTS에 적용된 가압기방출탱크 모델 결과와 비교했다.



<그림 3> 가압기방출탱크의 증기유입 유량

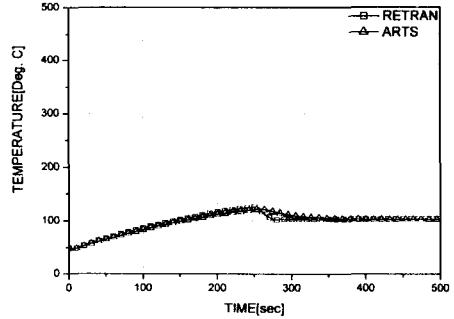


<그림 4> 가압기방출탱크의 증기방출 유량

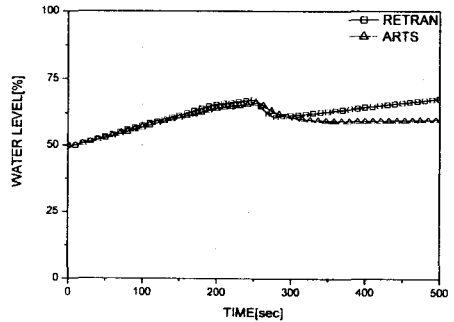
<그림 3>은 가압기방출탱크로 유입되는 증기량을 보여주고 있다. 원자로 정지 신호중

하나인 가압기 저압력에 의해서 ARTS와 는 약 189초에 원자로가 정지하였으며 RETRAN 은 약 195초에 원자로가 정지한다. PORV 개방 후 초기 증기유량은 일치하고 있지만, 원자로 정지 시점과 근사식 (6)에 의해서 계산 되는 ARTS의 방출유량이 RETRAN의 방출 유량에 비해 <그림 4>에 나타난 것처럼 상대적으로 많아서 ARTS 모델의 가압기방출탱크에 증기유량이 많이 공급되고 있다.

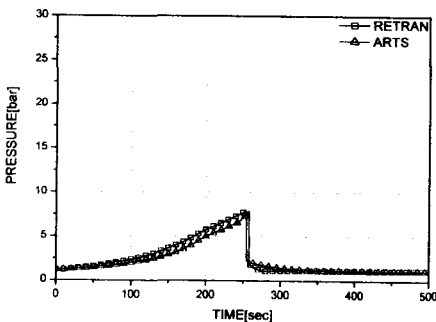
<그림 5>에서 <그림 7>은 가압기방출탱크의 다른 결과를 보여주고 있다. 가압기방출탱크의 압력, 온도 및 수위의 과도특성이 거의 RETRAN의 결과와 유사하다. <그림 5>는 가압기에서 유입되는 증기에 의해서 증가하던 가압기방출탱크의 압력이 파단판 파단에 의해서 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. <그림 6>과 <그림 7>에 나타난 결과에서 온도 및 가압기방출탱크 수위의 전반적인 거동은 잘 일치한다고 볼 수 있다. <그림 7>에 나타난 가압기방출탱크 수위의 모델별 편차는 앞에서 언급한 가압기방출탱크의 증기방출유량의 차이에 의한 것이다.



<그림 6> 가압기방출탱크의 온도



<그림 7> 가압기방출탱크의 수위



<그림 5> 가압기방출탱크의 압력

계산속도 및 건전성:

모든 계산은 2.4GHz 펜티엄4 프로세서를 장착한 개인용 컴퓨터에서 수행되었다. 시간 구간은 12분의 1초(약 0.0833초)로 고정하고 계산하였다. 본 절에서 설명한 시나리오 외의 다양한 시험을 수행했는데 계산실패가 발생한 적은 없었다. 이는 계산 논리를 단순하게 구성했을 뿐만 아니라, 계산과정에서 발생할 수 있는 알고리즘 전이과정의 연속성이 보장되도록 프로그램 했기 때문이다.

&lt;표 4&gt; 계산시간 비교

Model	Problem time (sec)	Elapsed time (sec)
RETRAN	100.0	140.9
ARTS	100.0	100.0

증기연속주입 시나리오 계산에 소요된 시간 (<표 4> 참조)은 가압기방출탱크 모델을 적용한 ARTS는 100.0초로 실시간을 만족하고 있지만, RETRAN에서는 140.9초로 나타나 실시간을 만족시키지 못하고 있다. 비용 및 효과 측면에서 전문모델인 가압기방출탱크 모델을 사용하는 것이 시뮬레이터의 조건을 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

국내 원자력발전소 운전원 교육 및 훈련을 지원하기 위한 시뮬레이터에 적용된 열수력코드는 발전소 거동을 정확하게 모의해야 하고, 실시간을 만족해야 한다. 열수력 최적계통코드인 RETRAN을 사용했을 때에는 정확한 계산결과를 얻을 수 있지만, 이상유동이나 비응축성가스를 포함한 제어체적을 모의할 때에는 실시간을 만족하지 못한다.

실시간을 만족하고, 열수력적 거동을 효율적으로 모의하기 위해 단순하면서도 사실적인 가압기방출탱크의 열수력 모델 및 수치해석 방법을 개발했다. 가압기방출탱크 내부의 비응축성 가스 및 증기 혼합체에 대해 각각 질량 및 에너지 보존방정식을 풀고, 두 체적의 합은 가압기방출탱크의 체적과 같은 점을 이용했으며, 파단판을 통한 유량은 운동량보존식을 풀어 구했다.

개발된 모델을 여러 가지 경우의 시나리오를 상정하여 시험한 결과, 계산속도 및 건전성 측면에서 ANSI/ANS-3.5-1998[1]에 나와 있는 조건을 만족하였다. 시나리오에서 보듯

이 비슷한 초기조건에서 RETRAN 코드로 계산한 결과와 비교하여 유사한 거동을 보였으며 전문모델을 사용함으로써 시뮬레이터의 성능을 월등히 향상시킬 수 있었다. 시뮬레이터용으로 개발된 ARTS모델에서 사용된 제어모델 및 근사식의 차이에서 발생된 가압기방출탱크의 증기방출유량의 불일치는 좀더 정확한 근사식의 모델링을 통하여 해결해야 할 것이다.

## 후기

본 연구는 “고리 1호기 VR(Virtual Reality) 시뮬레이터 개발”의 세부과제로 수행 하였으며 연구비 지원을 해준 전력연구원에 감사드립니다.

## 기호설명

A	: Area [m <sup>2</sup> ]
E	: Total enthalpy [J/kg]
G	: Function of mass flux [-]
h	: Enthalpy [J/kg]
K	: Form loss [-]
M	: Mass [kg]
P	: Pressure [bar]
R	: Gas constant [kJ/kg·K]
T	: Temperature [°C]
V	: Control volume [m <sup>3</sup> ]
W	: Mass flow rate [kg/s]

## 그리스문자

$\alpha$	: Void fraction [-]
$\rho$	: Density [kg/m <sup>3</sup> ]

## 첨자

<i>CNT</i>	: Containment
<i>Crit</i>	: Critical
<i>DiskN</i>	: Noncondensable gas flow from PRT to containment
<i>DiskW</i>	: Water/Steam flow from PRT to containment



*Drain* : Water flow to RCDT  
*N* : Noncondensable gas  
*N<sub>2</sub>* : Nitrogen gas  
*HTR* : Heater  
*PRZ* : Pressurizer  
*Tran* : Transient  
*w* : Water/Steam

**참고문헌**

[1] NRC, "ANSI/ANS 3.5 Nuclear Power Plant Simulators for Use in Operator Training and License Examination" (1998).  
 [2] KHNP, "Kori Units 1, Final Safety Analysis Reports" (1989).  
 [3] 서재승 외: "가압기방출탱크의 열수력적 거동 모의를 위한 간단한 수치해석 모델", 추계학술발표회, 한국원자력학회(1999).  
 [4] Kim, K.D., et al.: "Development of a GUI Based RETRAN Running Environment for Kori NPP Unit 1 & 2", KAERI/TR-1644/2000, KAERI (2000).  
 [5] Kim, K.D., et al.: "Development of NSSS T/H Driver for KNPEC-2 Simulator Using the Best-Estimate Code, RETRAN-3D", 10th International RETRAN Meeting (2001).  
 [6] Suh, J.S., et al.: "The Development of Virtual Simulator for Kori #1 Power Plant", KEPRI (2002).  
 [7] Suh, J.S. and Jeun, Q.D.: "The Development & Application of New-generation Full-scope Simulator for Kori Unit 1 NPP", 10th NURETH (2003).

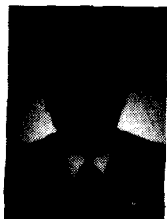
주 작 성 자 : 서 재 승  
 논문투고일 : 2003. 11. 03  
 논문심사일 : 2003. 12. 06(1차), 2003. 12. 17(2차), 2004. 03. 16(3차)  
 심사판정일 : 2004. 03. 16

● 저자소개 ●



**서재승**

1987 한양대학교 공과대학 원자력공학과 학사  
 1989 한양대학교 일반대학원 원자력공학과 석사  
 2002 한양대학교 일반대학원 원자력공학과 박사수료  
 2002~2004 한국전력공사 전력연구원 원자로공학그룹 위촉연구원  
 2004~현재 (주)미래와도전 책임연구원  
 관심분야: 원자력발전소 시뮬레이터 열수력 모델 개발, 원자력발전소 사고해석.



**전규동**

1979 한양대학교 공과대학 원자력공학과 학사  
 1981 한양대학교 일반대학원 원자력공학과 석사  
 1986 미국 위스컨신(Madison) 대학교 원자력공학과 공학박사  
 1986~현재 한양대학교 시스템융용공학부 교수  
 2001~현재 한양대학교 경영평가실장  
 관심분야: 원자로 열수리학, 열전달, 유체역학, 사고해석, 안전해석.