

'99 춘계학술 발표회 논문집
한국원자력학회

원자로계통내 용해 비용축가스의 해석모델 개발 및
RELAP5 전산코드의 비용축가스 모델의 개선

Development of Model on Noncondensable Solubles in Reactor Coolant
And Improvement of Noncondensable Gas Model in RELAP5

정 익, 이승숙, 박군철, 이은철

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 계통내에 용해되어 있는 비용축가스 거동의 해석을 위하여 용해 비용축가스의 모델을 개발하여, RELAP5 전산코드의 비용축가스 모델 및 열전달 모델을 개선하였다. 용해 비용축가스의 계통내에서의 이동과 과도상태시 기체로의 생성을 모사하는 모델을 개발하여 전산코드에 적용하였고 비용축가스의 영향을 평가하기 위한 실험에서 도출한 비용축가스의 용해시 적용할 수 있는 실험적 열전달 상관식을 전산코드에 추가하였다. 개선 전산코드의 검증을 위하여 개선된 모델이 포함된 전산코드를 사용하여 비용축가스 실험장치의 모사를 수행하였다.

Abstract

For the analysis of noncondensable solubles in reactor coolant, analysis model was developed and the modifications of the noncondensable model and wall heat transfer model in RELAP5 code were made. The transport model of noncondensable solubles and effervescence model of noncondensable solubles to noncondensable gases were developed and adapted to the code and the heat transfer correlation derived from the test facility added to the code. A simulation of test facility by both the modified code and the existent code was performed and the comparison the simulation results with the test data was done to verify the analysis model.

1. 서 론

전 세계적으로 신형 원자로 개발은 기존 경수로에 고유의 안전 개념들을 적극적으로 접목하여 인위적인 조치없이 고유의 안전성을 보장할 수 있는 설계 개발에 그 중요성을 두고 있다. 해수담수화, 열병합로 및 대형 선박의 동력원에 적용될 신형로 형태는 주요기기들이 원자로 용기내에 내장되어 있는 일체형으로서 지금까지의 원전에서 설계기준사고로 예상되는 냉각재 상실사고를 근본적으로 배제할 수 있어 안전성을 획기적으로 증가시킨 원자로이다.^[1]

특히 자기가압 방식의 가압기는 원자로내 상부에서 질소가스 분압과 증기분압을 이용하여 스스로 압력을 조절하는 새로운 형태이며, 가압기에 용해되어 냉각재속에 존재하는 질소가 계통에 계통에 미치는 영향의 모사를 위해 필수적인 용해 비용축성가스에 대한 모델은 지금까지의 설계코드에 고려되어 있지않다. 따라서 새로운 현상모사를 위한 모델의 개발 및 전산 코드의 적용과 실험적 평가는 매우 중요하다.

본 연구에서는 RELAP5 전산코드를 모코드로 하여 일체형 원전의 비용축가스의 거동을 모사할 수 있는 전산코드의 개발과 이를 비용축가스 실험과 검증하여 일체형 원전의 비용축가스의 현상 해석을 수행할 수 있는 도구를 개발하였다.

2. 비용축가스의 원자로 계통에의 영향

2.1 비용축가스의 용해도 특성

일체형원전의 가압기 내부의 질소는 가압기 하부에 위치하는 물과 평형상태를 이루며 온도 및 압력조건에 의해 용해와 용출을 반복하게 된다. 가압기의 물에 용해된 질소는 주순환계통의 냉각재에 전달되어 1차계통내에 존재하게 된다. 일반적으로 상온 상압의 부근에서 질소의 물에 대한 용해도는 질소의 분압에 비례하고 온도에 반비례한다. 그러나 기존의 여러 실험연구의 결과에 의하면 5MPa 이상의 높은 압력에서는 온도에 비례하는 영역이 나타난다.^[2]

일체형원전은 가압기의 설계시 질소의 용해량을 최소화하기 위하여 가압기의 물의 온도를 낮은 온도로 유지하고 주순환 냉각수와는 열적 차폐를 시킴으로써 온도의 상승을 막고 있다. 정상운전의 경우 용해량이 최소가 되는 온도로 가압기를 운전하도록 하고 있어 질소의 용해량은 크지 않을 것으로 예측된다. 그러나 가압기내부의 냉각을 위해 설치된 냉각기의 고장을 경우와 질소가스가 용해된 가압기의 냉각수가 수위의 요동에 의하여 순환하는 냉각재와 혼합을 일으킬 경우에는 고압에서의 질소의 용해량은 증가한다.

러시아의 RDIPЕ의 실험 결과에 의하면 일체형원전의 운전조건인 15MPa의 압력조건에서는 90~300℃ 구간에서 용해도가 온도에 비례적으로 증가하는 구간이 나타나며, 일체형원전의 정상운전 온도 조건인 270~310℃에서 용해도는 최대가 됨을 알 수 있었다. 일체형원전의 운전압력에서의 질소의 용해도를 그림 1에 나타내었다.

2.2 비용축가스가 계통에 미치는 영향 연구

용해 가스와 관련된 기존의 실험연구에서 McAdams 등은 미포화비등영역에서 강제순환대류 실험을 수행하였는데 핵비등이 진행되는 영역에서는 열전달이 향상되는 결과가 나타났으나 단상과 완전 발달된 핵비등영역에서는 용해가스의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Yezhova, Chao등의 실험 결과와도 일치한다. UTA에서 You등은 용해 가스와 관계된 다양한 실험을 수행하였는데 용해도가 커질수록 CHF가 증가하고 주어진 압력에서 용해도는 벽면의 과열정도

와는 무관하게 나타났다.^{[3][4]}

미국의 Missouri 대학에서는 연구로의 실험으로 용해 기체의 영향을 관찰하였다. 용해 비용축가스가 존재하는 경우 핵비동시작시점(ONB)이 기체가 용해되지 않은 경우보다 더 일찍 발생하여 아냉각 온도에서 용해 기체의 용출이 시작되어 열전달의 증가 효과를 나타내며 동일 열속 조건에서 냉각수의 온도는 증가하는 것으로 나타났다. 비등 열전달은 용출 기체의 영향으로 20~50% 증가하고 포화온도 이전에 이상유동의 형태를 나타내었다. 냉각수의 속도는 10% 정도 감소하며 압력 강하는 증가하였다.^[6]

미국의 EPRI의 1981년 보고서는 비용축가스가 자연순환을 방해하는 것으로 기술하고 있으며, EPRI의 1984년 및 USNRC의 1982년 보고서에는 비용축가스의 유입이 1차계통의 압력 및 온도 증가에 영향을 끼치는 것으로 평가하고 있다.^[7]

2.3 일체형 원전의 비용축가스 영향

일체형 원전은 증기발생기 및 가압기와 같은 주기기를 원자로 압력용기 내에 설치하여 계통의 구조가 단순하며 일차냉각수의 유로순환 길이가 짧고 유로저항이 작기 때문에 자연순환력이 기존의 원자로형에 비해서 상대적으로 매우 크다. 이는 원자로 비정상상태 및 사고 시 원자로의 냉각재 펌프가 정지해 있는 상태에서도 노심에 충분한 자연순환 유량을 제공하여 원자로의 안전성을 증진시킨다.^[8]

주순환 계통 내에 질소가 용해되어 존재하는 경우, 압력 및 온도조건의 변화에 의한 용해도차에 의해 노심 또는 증기발생기에서 용해되어 있던 비용축가스가 기체의 형태로 용출되어 노심 및 증기발생기에서 냉각재의 자연순환력 및 열전달에 영향을 끼칠 수 있다.

3. 용해비용축가스의 영향 실험

3.1 실험장치 설계

비용축가스의 영향을 살펴보기 위한 실험 장치는 일체형원전인 SMART를 대상으로 scaling을 통하여 설계하였다. 길이 방향으로는 1/4로 설정했고 노심에서의 유로 면적은 1개의 냉각수 채널을 선택했다. 출력은 SMART의 평균선출력밀도를 고려하여 사고 후 잔열을 기준으로 하여 상사해석에 필요한 범위에 따라 수행되었다. 실험 결과는 자연순환 열전달상관식에서 일반적으로 사용되는 무차원수로 표현되었는데, 실험에서의 Rayleigh 수 범위가 SMART의 Rayleigh 수 범위를 충분히 포함하고 있다.

실험장치의 주순환계통은 시험체적부, 열교환기, 질소용해탱크인 가압기와 질소의 용해를 위해 사용하는 우회유로의 순환 펌프로 구성되어, 가열출력의 조절을 위한 전원공급장치가 시험체적부에 연결되어있다.

3.2 실험 조건 및 방법

실험시 1차측 시험 체적부의 유체 온도는 15°C에서 70°C이며 벽면 온도는 55°C에서 145°C이다. 또한 2차측 유체의 온도는 11.4°C에서 41.8°C이다. 압력은 1, 5, 10 기압에서 수행하였다. 열출력은 1 kW에서 6.3 kW이며 질소 농도는 초기 조건의 온도와 압력에서의 포화 농도인데 최대 180 PPM까지이다.

실험은 실험루프에 질소가 용해되지 않은 물을 사용하여 열속을 변화시키며 벽면과 유체의 온

도, 유량을 측정하여 기존의 실험 결과와 비교하여 검증을 하였고, 다른 압력조건의 가스를 제거한 물과 질소를 용해시킨 물 각각에 대하여 열속을 증가시키며 벽면과 유체의 온도를 측정하는 정상상태의 자연대류 열전달 실험을 수행하였다. 질소를 용해시키며 10기압에서 정상운전으로 평형에 도달한 후 갑자기 압력을 감소시키며 각 부의 유체 온도와 벽면 온도, 열속, 유량을 측정하여 질소가스의 생성에 따른 열전달 효과를 측정하였다.

3.3 실험 결과

상압에서 가스를 제거한 물과 질소를 용해시킨 물에서 수행한 실험 결과 질소가 있는 경우에는 비등개시가 더 낮은 열속에서 발생함을 알 수 있고 벽면의 과열은 더 크게 나타나 있다. 이것은 용해 질소가 핵비등이 일어나기 전에 먼저 분출되므로 미포화 비등영역에서 열전달이 향상됨을 나타낸다.

열전달계수를 구하는 과정은 먼저 전열관에 가한 전력으로 열속을 계산하고 전열관 표면과 유체의 온도를 측정하여 다음의 열전달식에서 열전달계수를 구한다.

$$q'' = h(T_w - T_{bulk}) \quad (1)$$

이 과정에서의 단상유동 자연순환 열전달 상관식은 다음과 같은 무차원수의 상관식으로 표현되고 이를 그림 2에서 나타내었다.

$$Nu = a (Ra)^b \quad (2)$$

$$\text{여기서 } Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (3)$$

$$Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta(T_w - T_b)D^3}{\alpha\nu} \quad (4)$$

4. RELAP5 전산코드의 비용축가스 모델의 개선

RELAP5는 원자력 발전소의 사고해석용 전산코드로 미국의 Idaho 국립연구소에서 제작되어 지금까지 개량되고 있으며 현재는 Fortran90 언어로 개량되었다. 계통의 해석모델은 기체상과 액체상 2가지의 연속방정식, 운동량보존방정식, 에너지보존방정식에 비용축기체 연속방정식과 보론의 수송방정식을 더한 8개의 방정식으로 이루어진다.¹⁷⁾

본 연구에서는 Godunov 방법론을 적용하여 용해 비용축가스의 수송을 모사하는 모델을 도입하였고, 기존의 실험적 연구에서 도출한 질소의 물에 용해도를 바탕으로 용해 비용축가스의 기체상으로의 용출모델과 새로 수행한 비용축가스의 실험에 의한 자연순환 열전달 상관식을 전산코드에 추가하였다.

4.1 RELAP5 전산코드의 비용축가스 모델

RELAP의 비용축가스 모델은 수증기와 비용축성가스 혼합물은 열적 평형을 이루고 총압력은 각각의 부분압의 합으로 표현된다. 혼합증기의 비내부에너지는 질량가중치에 의한 수증기와 비용축가스의 비내부에너지 합으로 표현되며, 액체와 수증기의 포화 물성은 증기 부분압의 함수로 가정하고 있다.

현재의 전산코드에서도 질소나 기타 비용축가스에 대한 초기치를 사용자 입력으로 줌으로써 원

자로 계통 내에서의 비용축가스가 열전달에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 그러나 이 방법은 초기에 사용자에게 의해 미리 정해진 수치의 영향만을 고려한 것이므로 일체형 원자로와 같이 계통 내 다량의 질소가 용해되어 있는 경우, 새로이 용출되는 기체에 의한 효과를 모사할 수 없다.

4.2 용해 비용축가스의 수송 및 용출모델

RELAP5에서는 용해 보론의 수송을 모사하기 위한 서브루틴이 있으며 이를 바탕으로 용해 질소의 수송이 가능한 서브루틴을 작성하였다. 보론 수송 방정식은 이미 결정된 속도를 이용하여 액상에서의 보론 수송을 모델링한 것이다. 이러한 explicit한 변수 전달은 액상 비용축가스 수송에도 그대로 적용될 수 있다. 먼저 주어진 속도를 이용하여 액상 수송 방정식을 풀어, 각 control volume에 용해되어 있는 비용축가스량을 결정한다.

기체발생은 용해 질소량과 기준 질소용해도의 차이에 의해 이루어지며 해당 발생량 만큼 용해 질소량을 감소시킨다. 기준 질소용해도는 실험에 의한 용해도표를 이용하며, 기체 발생에 따른 물성치의 변화는 다음 time step 계산에서 이용된다. 용해 질소의 수송 및 용출모델의 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

4.2.1 비용축가스 수송 방정식의 구성

용해 비용축가스 수송 방정식은 보론 수송 방정식과 마찬가지로 독립된 subroutine으로 작성하고 여기에서 기체 용출량을 결정하는 부분을 추가한다. 수송방정식에 이용된 Godunov 방법론은 기존 전산코드에서 보론 수송을 모사하기 위해 사용자의 선택으로 쓰이는 방법이다. 이 방법은 이전에 쓰인 diffusive first-order upwind difference 방법과 비교했을 때 더 정확한 결과를 보여준다.

먼저 수송 방정식의 형태를 미분 방정식에서 적분 방정식 형태로 변환한다.

$$\int_V \frac{\partial \rho_n}{\partial t} dV + \int_A \rho_n \vec{v}_f \cdot d\vec{A} = 0 \quad (5)$$

위 식을 Godunov method를 이용하여 차분화하면 다음과 같다.

$$\rho_{n,L}^{n+1} = \rho_{n,L}^n + \frac{\Delta t}{V_L} A_j F_j^n - \frac{\Delta t}{V_L} A_{j+1} F_{j+1}^{n+1} \quad (6)$$

여기서, Flux F는 아래와 같다.

$$F_{j+1}^n = \frac{1}{2} \left[v_{f_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} (\rho_{n,i+1}^{n,L} + \rho_{n,i+1}^{n,R}) + \left| v_{f_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} \right| (\rho_{n,i+1}^{n,L} + \rho_{n,i+1}^{n,R}) \right]$$

$$v_{f_{j+1}}^{n+\frac{1}{2}} = v = \frac{1}{2} (v_{f_{j+1}}^{n+1} + v_{f_{j+1}}^n)$$

$$\rho_{n,i+1}^{n,L} = \rho_{n,L}^n + \frac{1}{2} \Delta x_L \left(1 - \frac{v \Delta t}{\Delta x_L} \right) \bar{S}_L \quad (7)$$

그리고

$$\rho_{n,i+1}^{n,R} = \rho_{n,M}^n - \frac{1}{2} \Delta x_M \left(1 + \frac{v \Delta t}{\Delta x_M} \right) \bar{S}_M$$

Cell-centered limited gradient \bar{S}_L 은 아래와 같이 주어진다.

$$\bar{S}_L = (1 + \theta_L \omega_L) \Phi(r, 1) S_{j+1} = (1 + \theta_L \omega_L) \Phi(r, 1) \left(\frac{\rho_{n,M}^n - \rho_{n,L}^n}{\Delta x_{j+1}} \right) \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi(r, 1) &= \max(0, \min(2r, 1), \min(r, 2)) \\ r &= \frac{S_j}{S_{j+1}} \\ S_j &= \frac{\rho_{n,L}^n - \rho_{n,K}^n}{\Delta x_j} \\ S_{j+1} &= \frac{\rho_{n,M}^n - \rho_{n,L}^n}{\Delta x_{j+1}} \\ \theta_L &= \frac{|1-r|}{1+|r|} \\ \omega_L &= \min(\nu_L, 1-\nu_L) \\ \nu_L &= \frac{\nu_L \Delta t}{\Delta x_L} \end{aligned} \quad (9)$$

4.2.2 기준 용해도 계산 및 용출 기체량 결정

기준 용해도 계산에 사용된 용해도표는 러시아의 RDIPB 실험 데이터에 근거한 것이다. 이 실험은 흐르는 유체가 아닌 일정한 부피를 지닌 정지된 유체에서의 최대 용해도를 보여준다.

용해도표를 이용하여 각 체적내에서의 기준용해도 자료를 생성하고 이를 용해질소 수송방정식에서의 수치와 비교를 하여 용출량을 결정한다. 즉, 체적내의 기준 용해도와 수송방정식에서의 용해량을 비교하여 일정오차 범위를 넘으면 그 차이를 용출량으로 결정하고 결정된 용출 기체의 질량은 비용축가스의 생성함에 더해지며 용해량은 용출량 만큼 감소한다. 또한 냉각재내에 용해되어 있는 용해 비용축가스의 질량비는 냉각재에 비교했을 때 매우 작은 수치를 나타낼 것이므로 용해질소에 따른 냉각재의 질량변화는 무시할 수 있다.

발생하는 기체는 생성시의 액체의 온도와 같다고 가정하였으며 발생기체는 수증기와 혼합기체 형태로 열역학적 물성이 재계산된다. RELAP5에서는 비용축가스의 영향을 수증기상에 질량비의 형태로 계산하기 때문에 혼합기체 방정식의 별도 수정 없이 비용축가스의 생성함에 용출된 기체의 질량을 더해주는 방식으로 계산을 수행하였다. 계산수행과정을 그림 4에 나타내었다.

4.2.3 전산코드의 수정

4.2.3.1 용해도 입력자료의 생성

비용축가스의 발생량은 실험에 의한 용해도표를 기초로 하여 예측한다. 용해도표는 0.1MPa ~ 50MPa의 압력과 0°C ~ 390°C의 온도에서의 질소용해도를 나타내지만 이를 그대로 코드의 입력자료로 사용하기에는 각 데이터의 간격이 너무 크기 때문에 먼저 사용가능한 간격으로의 재계산이 필요하며 생성된 자료를 코드의 입력자료로 사용한다. 사용자가 원하는 압력 및 범위를 입력하면 2D-spline method를 사용하여 압력은 0.1MPa 간격으로, 온도는 0.5°C의 간격으로 새로운 입력자료를 생성하여 기준용해도 입력 파일에 저장한다. 용해도자료는 RELAP5의 입력자료 처리 후에

임도록 코딩하였다. 코드내에서는 세분화된 입력자료를 바탕으로 하여 선형보간법에 의해 주어진 압력과 온도조건에 따른 최대 질소용해도를 계산한다. 주어진 압력 온도조건에서의 질소 용해량을 부프로그램 FINDCN에서 결정한다.

4.2.3.2 초기 질소용해량 결정

질소의 초기 용해량은 원자로 정상운전 상태에서의 온도 및 압력에 의해 결정되는데 용해질소의 source가 되는 기본체적을 정하고 이 체적에서의 최대 용해량을 결정한 후 이를 토대로 비용축가스수송모델을 사용하여 각 체적에서의 용해량을 결정하도록 한다. 수송방정식을 NTRTRN 부프로그램에 코딩하였다.

용해도 입력 파일에서는 질소의 용해도를 물에 대한 몰비율로 나타내므로 코드내에서 질소수송 모델에 사용하기 위해서는 밀도로 단위변환을 하여 사용한다.

4.2.3.3 질소 용출 및 수송 모델

질소 용출모델도 수송모델과 마찬가지로 HYDRO 부프로그램내에서 사용된다. 용출질소의 용해는 용해도표에서 주어진 온도, 압력 조건에 의한 최대용해량을 초과할 수 없다는 가정하에 계산된다. 여기서의 용출량 결정은 압력 및 온도조건에서의 최대용해도와 수송모델에서 계산된 용해량과의 비교를 통해 이루어진다. 계산용해량과 최대용해량의 차이를 질소가스의 발생량으로 계산하여 이를 질소가스 생성 항에 더해준다. 질소 가스의 생성량을 FINDSOL 프로그램에서 결정한다. 질소가스생성량은 volume data 변수내에 저장되며 이는 질량보존방정식, 운동량보존방정식 등에 사용되어 질소가스 발생에 따른 각 방정식의 변화를 보정한다.

4.3 자연순환 열전달 모델의 개선

실험에서 도출된 비용축가스의 영향을 포함한 자연대류 열전달 상관식을 전산코드에 추가하였다. RELAP5 열전달 상관식은 유체의 상태와 흐르는 구조물의 구조물의 형태에 따라 실험에 의한 보정 인자들을 사용하여 수정되어 사용된다. 비용축가스와 물, 수증기의 혼합제인 열전달 모드인 경우 자연대류 상관식으로 아래 형태의 Churchill-Chu의 상관식을 사용하고 있다.

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\} \quad (10)$$

Churchill-Chu의 상관식은 수직 평판의 경우에서 유도한 식으로 자연대류의 경우 광범위하게 사용된다. 이 상관식은 평판의 길이를 기준으로 도출한 식으로 RELAP는 현실적으로 반영되지 않는다. 또한 증기와 비용축가스가 지배적인 경우는 잘 예측하나 액체가 지배적인 경우에 실험의 경우와 비교하였을때 다소 높은 열전달 계수를 산출한다. 실험에서 도출한 자연순환 상관식은 RELAP에서 열전달계수의 계산에 사용하는 hydraulic diameter를 기준으로 열전달계수도출에 기준이 되는 Nusselt 수를 Grashof 수와 Prandtl 수의 곱인 Rayleigh 수의 함수로 표현한 형태이다. 아래의 실험 상관식을 전산코드의 DITTUS 부프로그램에 새로 추가하여 비용축가스의 출현시 Churchill-Chu 상관식을 대신하여 사용할 수 있도록 하였다.

$$Nu_{D_n} = 1.94520 (Ra_{D_n})^{0.1736} \quad (11)$$

4.4 개선 코드의 검증

개선코드의 검증을 위하여 기존의 RELAP5 전산코드와 개선 전산코드를 사용하여 비용축가스 실험 장치를 모사하였다. 실험장치는 자연순환모드에서 가열출력을 변화시키면서 유체 및 비용축가스의 효과를 압력 및 온도의 계측하여 살펴보고 이를 코드로 해석하여 측정결과와 비교하였다. 용해질소의 수송을 보기 위한 질소 용해도의 기준체적은 가압기 탱크와 연결된 유로부분을 선택하였고, 기준체적의 온도압력 조건에서 질소의 용해도가 결정되어, 용해 비용축 가스의 수송방정식에 의한 질소의 물에서의 전달 및 다른 체적에서의 용해도가 결정된다.

정상상태의 계산으로 초기조건과 용해 비용축 가스의 수송을 모사하고 restart 프로그램을 실행하여 감압후의 실험장치의 상태를 모사하였다. 열전달 상관식으로는 자연순환의 경우 수정한 실험상관식을 사용하였다. 정상상태 계산결과를 실험조건과 비교하여 표 1에 정리하였다.

10기압으로 유지되던 계통의 감압은 실행 후 1초후에 시작되며 150초 정도에는 대기압의 수준으로 낮아진다. 각 코드와 실험에서 측정된 압력과 온도는 거의 일치하며 온도는 각각의 경우 다른 경향을 보인다.

먼저 기존의 전산코드는 압력변화에 의한 용해질소의 용출을 모사할 수 없으므로 온도조건은 정상상태에서 거의 변화하지 않는다. 벽면 및 물의 온도로 비등을 야기할 정도는 아니므로 단상의 액체로 해석하여 감압시에도 온도의 변화로 발생하지 않는다.

개선전산코드는 정상상태를 위한 실행에서 용해질소의 수송을 모사하여 과도상태에서는 압력 및 온도조건에 의한 질소기체의 생성을 모사한다. 감압의 시작 후 가열벽면의 온도는 질소가스의 생성의 영향으로 열전달의 증가를 야기시켜 급격히 감소한다. RELAP 내부적인 계산으로 초기온도를 낮게 예측하므로 벽면 온도의 절대값에서는 차이가 있으나 유체 온도의 경향은 비슷한 형태를 보인다. 계통의 압력변화를 그림 5에 온도변화를 그림 7에서 그림 10에 비교하였다.

계통의 비용축가스 용해량 및 기공률은 기존의 전산코드에서는 변화가 없으나 개선코드에서는 질소의 생성을 고려하여 계산되어진다. 비용축가스의 용해량은 압력의 감소와 온도의 증가로 인하여 지속적으로 감소하고 계통의 기공률은 비용축가스의 생성으로 급격히 증가하다가 평형 압력에 이른 후 서서히 감소한다. 개선 전산코드로 계산한 실험조건에서의 비용축가스 용해량과 기공률을 그림 11과 12에 나타내었다.

4. 결론

원자로계통내 용해 비용축가스의 거동과 비용축가스의 자연순환에 미치는 영향을 평가하기 위하여 용해비용축가스의 수송모델과 용출 모델을 도입하여 RELAP5 전산코드에 새로 적용하였고 비용축가스 실험을 통해 도출된 자연순환 열전달 상관식을 기존의 열전달 모델에 추가하였다. 코드의 검증을 위하여 개선코드를 사용하여 비용축가스 실험장치를 모사하여 코드의 적용성을 검토하였다.

개선 전산코드는 용해 비용축가스의 이동 및 용출, 용출 가스의 수송을 적절히 모사하며 일체형 각 계통의 세부 모델링과 결합하였을 때 일체형원전을 현실적으로 모사할 수 있을 것이다. 또한 기존의 설계코드에서 수행할 수 없었던 용해 비용축가스 모사 및 용출의 모델링을 추가함으로써, 일체형원전의 가압기 및 계통내의 용해질소의 거동과 계통의 설계에 미치는 영향을 파악하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

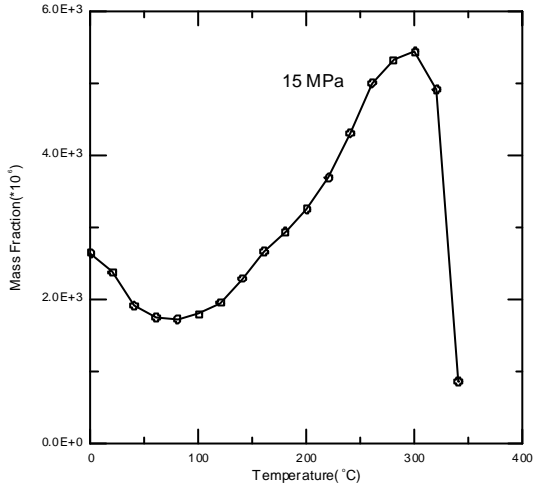


그림 1. 질소의 용해도 (g N₂/g H₂O)

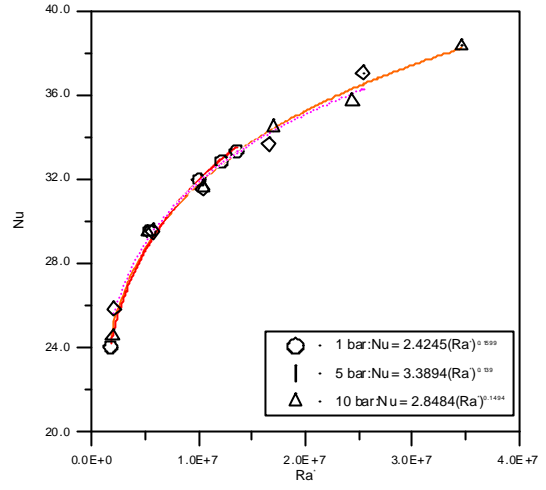


그림 2. 자연순환 열전달 상관식

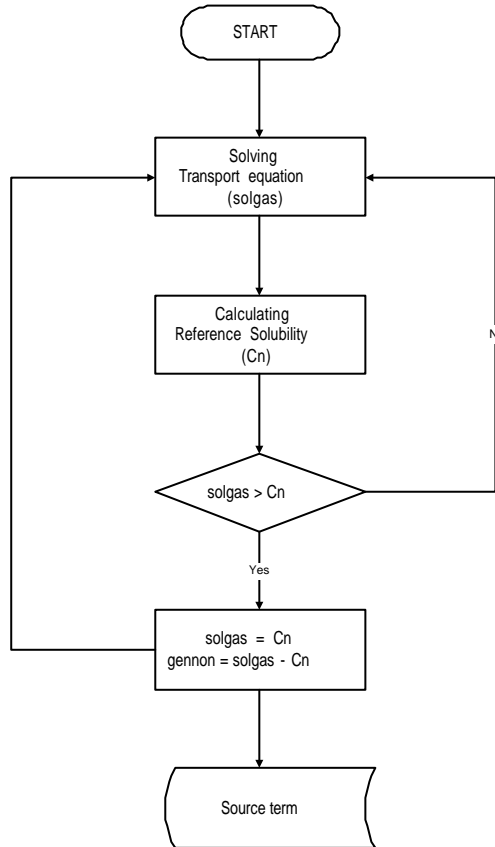


그림 3. 용해질소의 수송 및 용출량 계산 흐름도

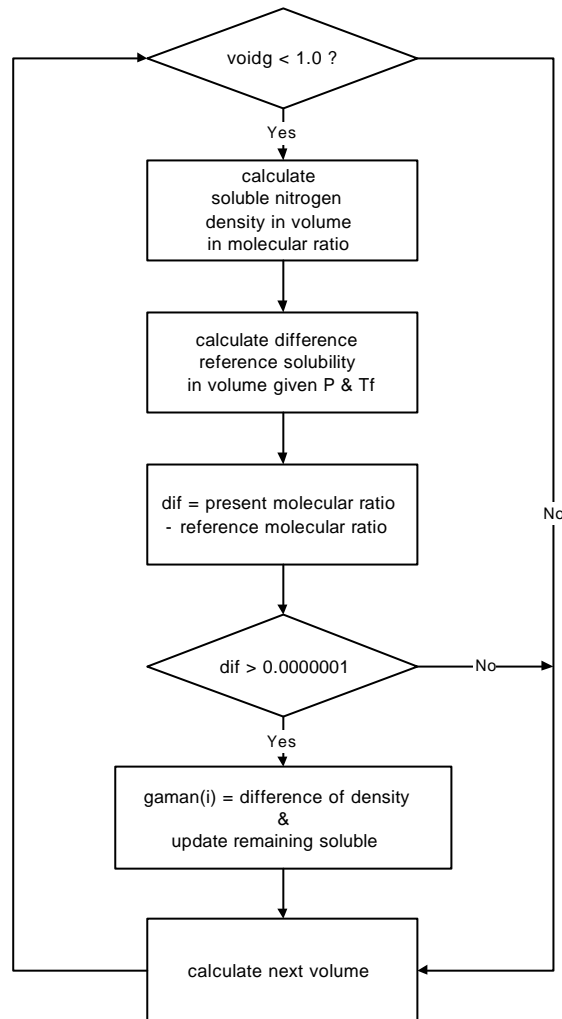


그림 4. 질소가스 용출모델 (findsol)의 흐름도

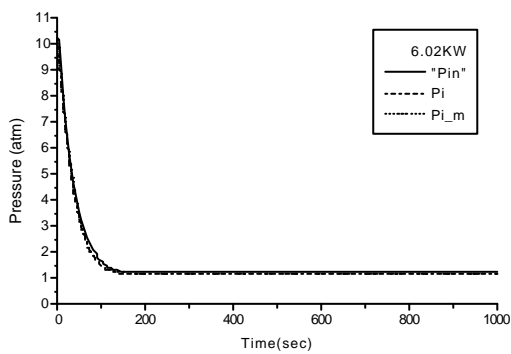


그림 5. 실험장치의 압력변화

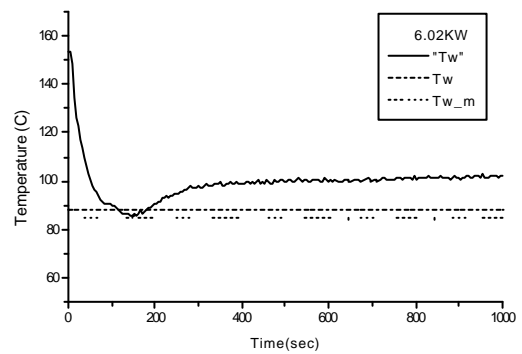


그림 6. 가열벽면 온도 변화

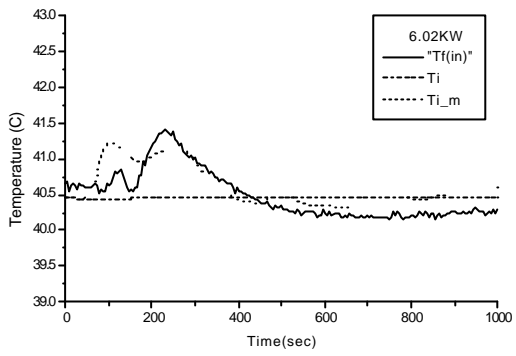


그림 7. 가열부 입구 온도 변화

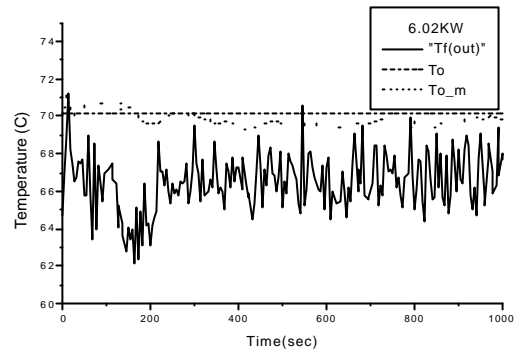


그림 8. 가열부 출구 온도 변화

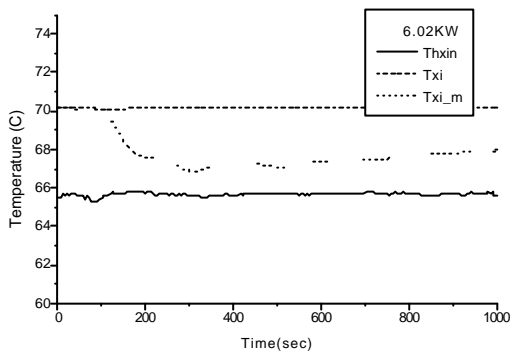


그림 9. 열교환기 입구 온도 변화

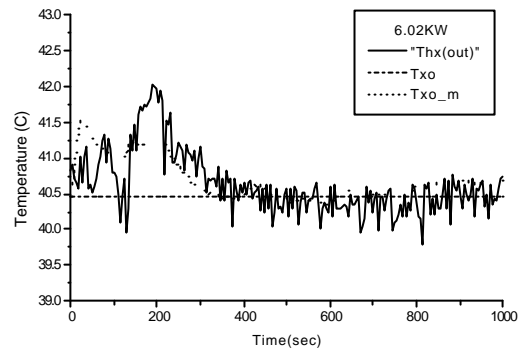


그림 10. 열교환기 출구 온도 변화

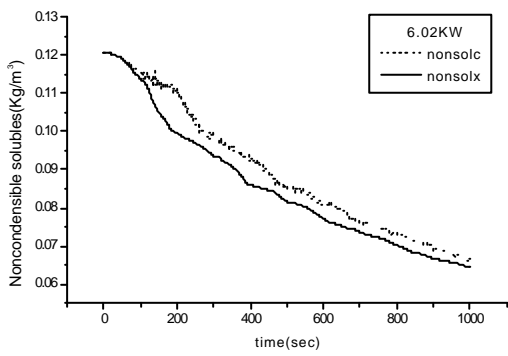


그림 11. 계통의 질소용해량 변화

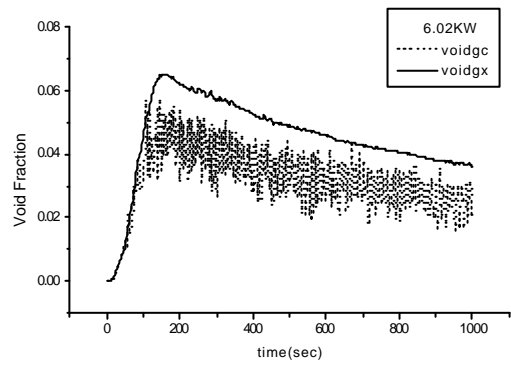


그림 12. 계통의 기공률 변화

5. 참고문헌

- [1] 장문희 외, '신형원자로로서의 일체형 가압경수로 설계특성 분석', 기술보고, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol27, Number 2, April 1995.
- [2] V. I. Baranenko, "The Solubility of Nitrogen in Water", *Atomia Energia.*, Vol. 68, No.2, 1990
- [3] McAdams, W. H., Kennel, W. E., Minden, C. S., Carl, R., Picornell, P. M., and Dew, J. E., "Heat Transfer at High Rates to Water with Surface Boiling", *Ind. and Engrg. Chem.*, Vol. 41, No. 9, 1945-1953, 1949.
- [4] L. I. YEZHOVA, et al., "The Effect of a Gas Dissolved in a Coolant on Boiling and Burnout Heat Transfer", *HEAT TRANSFER-Soviet Research*, Vol. 17, No. 2, pp 84-89, 1985
- [5] You, S. M., Simon, T. W., Bar-Cohen, A., and Hong, Y. S., "Effects of Dissolved Gas Content on Pool Boiling of a Highly Wetting Fluid ", *ASME J. of Heat Trans.*, Vol. 117, 687-692, 1995.
- [6] WEI-WU CHAO, et al., "The Effect of Dissolved Gas Bubble Nucleation on Natural Convection Heat Transfer in Narrow Channels", *Nuclear Technology*, Vol. 105, pp 261-270, 1994
- [7] Cha, J. H., Jin, Y. S., "The Effect of Noncondensable Gas Injection on The Natural Circulation In a Loop System", *Proceedings of Third International Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations*, pp. A10-19-26, Seoul, Korea, Nov.14-17, 1988
- [8] "중소형 일체형 원자로 계통 설계 개발," 한국원자력연구소, Jul. 1997.
- [9] "RELAP5/MOD3 Code Manual, Volume I", NUREG/CR-5535, 1995