“2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART 피동잔열제거계통 이탈 불안정 평가

Assessment of Flow Excursion Instability in PRHRS of SMART

이태호, 윤주현, 이두정, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

SMART 피동잔열제거계통에서 이탈 불안정의 발생 여부에 대한 평가를 수행하였다. 일차계통 및 비상냉각탱크의 유동조건과 피동잔열제거계통의 계통압력을 경계조건으로 하여 피동잔열제거계통의 정상상태 자연순환 해석을 수행하였다. 해석 결과를 토대로 계통압력 및 일차계통 고온관 온도의 변화에 따라 증기발생기에서 제거되는 열량에 따른 유량 변화를 이용하여 안정 영역과 불안정 영역을 예측하였으며, 각 영역에 속한 유동조건의 이탈 불안정 발생 여부는 압력강하 특성곡선과 구동력 특성곡선에 의해 결정되는 유량을 조사함으로써 평가하였다. 평가 결과, 계통압력이 작은 경우에는 구동력 특성곡선과 압력강하 특성곡선의 교차점에 의해 결정되는 순환유량이 2개 이상 존재하여 이탈 불안정이 예측되는 유동 조건이 있는 것으로 나타났으나, 압력이 증가하면 안정화되는 경향을 보여주었다.

Abstract

Flow excursion instability was assessed for Passive Residual Heat Removal System (PRHRS) of SMART. By using PRHR system pressure and conditions of primary system and emergency cooldown tank as given conditions, the steady state analysis of natural circulation in PRHRS was carried out. For different levels of hot leg temperature of primary system and system pressure of PRHRS, stable region and unstable region were predicted by checking whether unique system flow rate were existed or not for heat removed by steam generator. And the stability of steady operating point was assessed by examining flow rates determined by intersections of pressure drop and driving force in system characteristic curve. When PRHRS system pressure was low, the unstable operating point was expected since two or more flow rates were existed due to the multiple intersections between pressure drop and driving force curves. However, the system was stable for higher system pressure.

1. 서 론

열출력 330MW의 일체형 원자로인 SMART는 원자로 비상 정지 시, 노심의 잔열을 피동잔열제거계통을 이용하여 제거한다. 피동잔열제거계통은 그림 1과 같이 증기발생기, 응축열교환기, 비상냉각탱크, 보상탱크 및 이들 주요 기기의 연결배관 등으로 구성된다. 원자로 비상 정지 시, 노심에서 발생한 잔열은 증기발생기를 통해 잔열제거계통의 냉각재로 전달한 뒤, 응축열교환기를 통해 최종적으로 비상냉각탱크의 냉각수를 이용하여 제거된다. 피동잔열제거계통은 단일고장을 고려하여 총 4개의 계열로 구성되며, 이 중 2개의 계열을 이용해 임의의 출력준위에서 원자로가 정지하였을 때 노심의 잔열을 제거할 수 있다. 피동잔열제거계통은 증기발생기와 응축열교환기 사이의 높이 차 및 밀도 차이에 의해 발생하는 구동력에 의한 자연대류에 의해 노심의 잔열을 제거하며, 원자로 비상 정지 시 제어신호에 의해 주증기 및 주급수 배관의 격리밸브가 자동으로 닫히고 피동잔열제거계통의 격리밸브가 자동적으로 개방되면서 운전된다. 자연대류 운전 초기에 증기발생기로 유입되는 과냉각 상태의 냉각재는 일차계통으로부터 전달되는 열에 의해 포화 상태의 2상유동 과정을 거쳐 과열증기 상태로 증기발생기 출구를 빠져 나오게 된다. 증기발생기 출구로부터 응축열교환기 입구로 유입되는 과열증기는 비상냉각탱크로의 열전달을 통해 다시 상변화 과정을 거쳐 출구에서는 과냉각 상태의 액상유동이 형성되면서 연속적인 자연순환 유동이 형성된다. 시간이 경과하면서 노심의 잔열이 감소함에 따라 증기발생기 출구에서는 2상유동을 거쳐 과냉각 상태의 액상유동이 형성되나, 일차계통의 거동이 중요한 시간 구간에서 피동잔열제거계통의 유동 형태는 2상유동을 수반하게 된다.

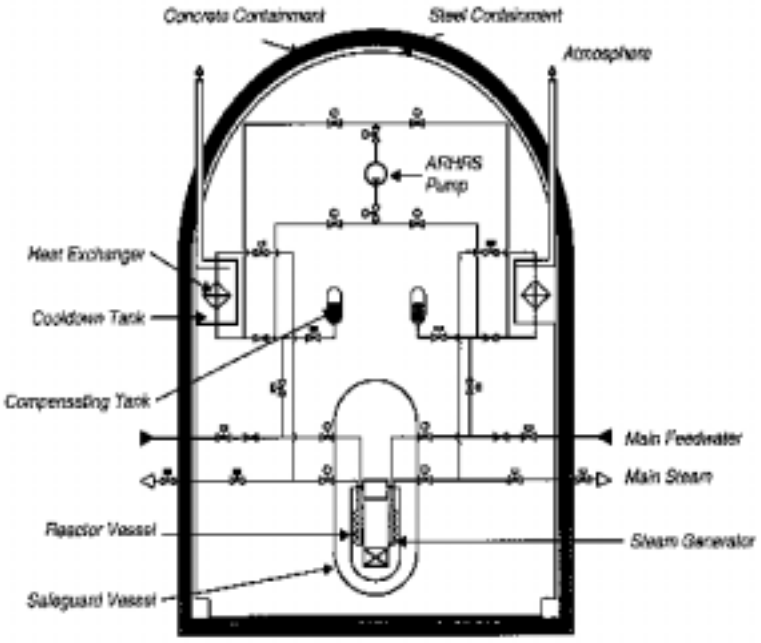

그림 1. SMART 피동잔열제거계통

이러한 상변화가 수반되는 2상 자연순환 유동에서는 유체의 체적변화에 따른 압력강하 특성 변화에 의한 2상유동 불안정이 내재되어 있다. 이러한 2상유동 불안정은 유동의 진동을 유발시켜 계통을 구성하는 기계적인 장치의 진동, 제어의 어려움, 열피로 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 2상유동 불안정은 유로의 기하학적 형상, 운전조건, 경계조건 등에 따라 여러 가지 형태로 나타날 수 있으며, 크게 정적 불안정(static instability) 과 동적 불안정(dynamic instability)으로 나뉘어진다[1,2,3]. 정적 불안정은 미소한 유동 변화에 의해 한 정상(평형)상태로부터 전혀 다른 정상상태로 유동조건이 바뀌는 현상으로 이탈 불안정(excursion instability), 유동 양식의 변화에 의한 불안정 그리고 기포핵생성(nucleation)에 의한 불안정 등이 여기에 속하며, 동적 불안정의 초기 조건으로 작용될 수 있다. 반면에 동적 불안정은 관성이나 되먹임 (feedback) 효과 등으로 인해 유량이나 압력이 정상상태를

기준으로 주기성을 가지고 변동하는 현상을 말하며, 여기에는 밀도파 진동(density wave oscillation), 압력강하 진동(pressure drop oscillation) 등이 포함된다. 이러한 불안정 중 흔히 발생하는 불안정으로는 이탈 불안정과 밀도파 진동을 들 수 있다.

본 연구에서는 SMART 피동잔열제거계통에서 발생할 수 있는 정적 불안정 현상 중, 대표적인 이탈 불안정에 대한 평가를 수행하였다. 이탈 불안정 현상은 정상상태 방정식을 이용해 예측할 수 있기 때문에, 일차계통 및 비상냉각탱크의 유동조건을 경계조건으로 하여 피동잔열제거계통의 계통압력 및 일차계통 고온관온도의 변화에 따른 정상상태 자연순환 해석을 수행하였다. 해석 결과를 토대로 증기발생기에서 제거되는 열량에 따른 유량 변화를 이용하여 안정 영역과 불안정 영역을 예측하였으며, 각 영역에 속한 유동조건의 이탈 불안정 발생 여부는 압력강하 특성곡선과 구동력 특성곡선에 의해 결정되는 유량을 조사함으로써 평가하였다.

2. 본 론

2.1 이탈 불안정 발생 조건

이탈 불안정은 Ledinegg 불안정[4]이라고도 불리며, 비등유로에서 유량이 감소할 때 유로의 압력강하가 증가하는 영역의 존재로 인해 발생한다[1,2,3]. 그림 2는 일정한 열유속으로 가열되는 유로에 액상상태의 유체가 유입될 경우, 전형적인 유량 변화에 따른 압력강하의 변화를 나타낸다. 유량 증가에 따라 압력강하가 증가하다가 감소하고 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 유체의 유량이 적은 경우, 유로에 유입된 액상상태의 유체 대부분이 비등에 의해 증기상태로 나타나기 때문에 많은 체적 유량을 가지고 유로를 통과하며 이로 인하여 압력강하가 크게 나타난다. 그러나 유량이 증가하게 되면 비등에 의한 상변화에 의해 나타나는 증기의 양이 줄어들게 되어 유로를 통과하는 체적유량이 감소하여 압력강하는 감소하게 된다. 한편 계속해서 유량이 증가하면 유로를 통과하는 유체는 단상의 액상상태를 유지하게 되어, 유량이 증가할수록 압력강하는 다시 증가하게 된다. 이러한 압력강하 특성을 갖는 유로에서 계통의 유량은 유동을 형성시키는 구동력의 특성에 따라 다르게 결정된다. 그림 2에서 I_a, I_b 그리고 I_c는 구동력 특성곡선으로 강제순환의 경우 펌프 특성곡선을 표시하며, 자연순환인 경우에는 수두차를 의미한다. 구동력의 특성이 I_a 또는 I_c로 주어지는 경우에는, 압력강하 특성곡선과 구동력 특성곡선이 교차하는 점에서 단 하나의 유량이 결정되며 교란이 발생해도 원래의 유량으로 되돌아가는 안정된 조건이다. 그러나 구동력 특성이 I_b 와 같고 유량이 B인 경우에는 작은 교란에 의해

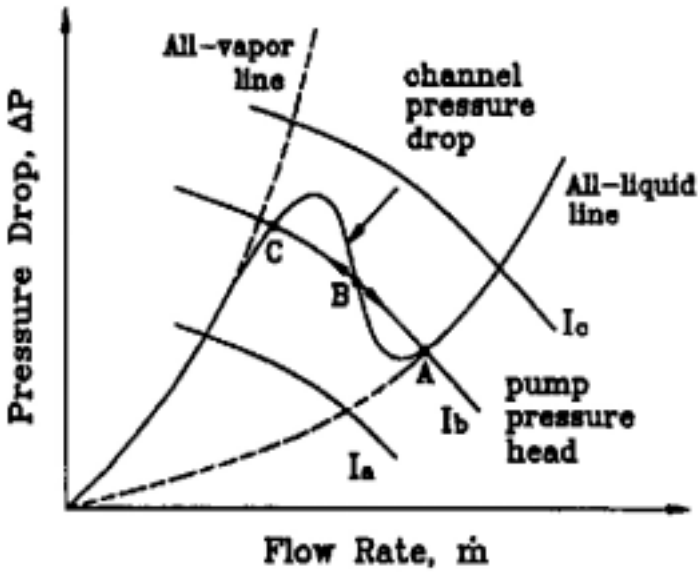

그림 2. 비등유로에서 유량에 따른 압력강하 특성곡선

A 또는 C로 유량이 급격히 변화된다. 따라서 이탈 불안정은 계통의 압력강하 특성곡선에 음(-)의 기울기 영역이 존재하고, 구동력 특성곡선이 압력강하 특성곡선의 음(-)의 기울기 영역과 양(+)의 기울기 영역에서 모두 교차점을 갖는 경우에 발생하게 된다.

본 연구에서는 피동잔열제거계통의 이탈 불안정 발생 여부를 평가하기 위해, 일차계통 및 비상냉각탱크의 유동조건을 경계조건으로 하여 정상상태 자연순환 해석을 통해 계통압력 및 일차계통 고온관온도에 따른 정상상태 유동조건을 계산한 후, 계산된 유동조건을 이용하여 유량의 변화에 따른 압력강하 특성곡선과 구동력 특성곡선을 산출하였다. 산출된 특성곡선을 이용하여, 이탈 불안정 발생 여부는 구동력 특성곡선이 압력강하 특성곡선의 음(-)의 기울기 영역 및 양(+)의 기울기 영역에서 모두 교차하는지의 여부를 통해 평가하였다.

2.2 해석 모델

균질유동모델을 적용하여 피동잔열제거계통의 정상상태 자연순환 해석을 수행하였으며, 해석을 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

(1) 1 차원 유동
(2) 열역학적 비평형 효과 (과냉 비등) 무시
(3) 소산 및 공간의 압력 변화에 따른 엔탈피 변화 무시
(4) 비상냉각탱크내의 압력 및 냉각수 온도는 일정
(5) 일차계통의 계통압력 및 유량은 일정

1 차원 유동장 해석을 위한 지배방정식은 연속 방정식, 운동량 방정식 그리고 에너지 방정식으로 구성되며 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{f}{2D_e}\rho u^2 + \rho g \cos\theta = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}[\rho u\,(h + \frac{u^2}{2})] + \rho u g = Q \tag{3}$$

또한 지배방정식에서 미지수의 수는 4개 (ρ, u, P, h)이나 방정식의 수는 3개 이기 때문에 다음과 같은 상태방정식을 적용하였다.

$$\rho = \rho\,(P, h) \tag{4}$$

위에 주어진 지배방정식과 상태방정식을 이용한 수치해석을 위해 식 (1)~(3)에 주어진 지배방정식을 격자점 i에서 격자점 i+1까지 적분하면, 다음과 같은 차분방정식을 얻을 수 있으며;

$$(\rho u)_{i+1} = (\rho u)_i \tag{5}$$

$$P_{i+1} + \rho_{i+1}[g\frac{\Delta x}{2} + (1+\frac{f}{2D_e}\frac{\Delta x}{2})u_{i+1}^2] = P_i + \rho_i[g\frac{\Delta x}{2} + (1+\frac{f}{2D_e}\frac{\Delta x}{2})u_i^2] \tag{6}$$

$$h_{i+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2} = h_i + \frac{u_i^2}{2} - g\Delta x + \frac{Q_i \Delta x}{(\rho u)_i} \tag{7}$$

격자점 i에서의 상태방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\rho_i = \rho(P_i, h_i) \tag{8}$$

식 (2)에서 f는 마찰계수를 의미하며 증기발생기에서는 SKBK 상관식[5]을, 응축열교환기 및 연결 배관에서는 Idelchik 상관식[6]을 적용하였다. 2상유동 영역에서는 균질유동모델의 2상 증배계수 (two-phase multiplier)[7]를 마찰계수 상관식에 곱하여 적용하였다. 식 (3)에서 Q는 유체의 단위체적 당 가해진 열량을 의미하며, 증기 발생기 및 응축열교환기의 격자점 i와 i+1사이의 제어체적 i에 대해 열전달이 일어나는 튜브의 바깥쪽 열전달 면적의 관점에서 다음과 같이 정의된다[8].

$$Q_i V_i = U_{o,i} A_{o,i} \Delta T_{LMTD,i} \tag{9}$$

식 (9)에서 $U_{o,i}$는 총 열전달계수(overall heat transfer coefficient)를 의미하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{U_{o,i}} = \frac{1}{h_{i,i}}\frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{2k_{w,i}}\ln\frac{d_o}{d_i} + \frac{1}{h_{o,i}} \tag{10}$$

이 식에서 $h_{i,i}$와 $h_{o,i}$는 제어체적 i에 대해 튜브 안쪽면과 바깥쪽면에서의 열전달 계수를 의미한다. 단상의 액상유동, 2상유동 및 과열증기 유동 영역이 형성되는 증기발생기의 튜브 안쪽면과 단상의 일차계통 냉각재가 통과하는 튜브 바깥쪽면에서의 열전달계수는 SKBK 상관식[5]을 적용하였다. 또한 응축열교환기 튜브 안쪽의 단상 영역에서는 Dittus-Boelter 상관식[7]을, 2상유동 영역에서는 Saha 상관식[9]을 이용하였으며, 바깥쪽면에서는 단상의 자연대류 열전달 계수를 적용하였다.

2.3 해석 절차

피동잔열제거계통의 자연순환 유동 해석은 식 (5)~(8)에 주어진 차분방정식과 필요한 열전달계수 및 마찰계수에 대한 상관식을 이용하여 수행되었다. 계산은 그림 1에서 보상탱크와 잔열제거계통의 배관이 만나는 지점 (i=1)에서 시작하여, 증기발생기 및 응축열교환기를 거쳐 다시 시작점 (i=N)에 돌아올 때까지 수행하였으며, i+1 격자점에서의 유동변수는 i 격자점에서의 유동변수를 이용하여 다음과 같은 절차에 의해 계산되었다.

ρ_{i+1} 가정

↓

연속 방정식으로부터 u_{i+1} 계산

↓

에너지 방정식으로부터 h_{i+1} 계산

↓

운동량 방정식으로부터 P_{i+1} 계산

↓

계산된 h_{i+1}와 P_{i+1}를 이용해 상태방정식으로부터 $\overline{\rho_{i+1}} = \bar{\rho}(P_{i+1}, h_{i+1})$ 계산

↓

ρ_{i+1}와 $\overline{\rho_{i+1}}$ 사이의 수렴도 판정

ρ_{i+1}와 $\overline{\rho_{i+1}}$사이의 수렴도가 수렴허용한도를 만족시키지 못하면 $\rho_{i+1} = \overline{\rho_{i+1}}$로 가정하여 수렴허용한도를 만족시킬 때까지 계산을 수행하였다.

증기발생기 및 응축열교환기에서는 고온부로부터 제거되는 열량과 저온부로 공급되는 열량이 균형을 이루어야 하기 때문에 각 제어체적에서 Q_i에 대한 추가의 반복계산이 필요하며, Q_i에 대한 반복계산은 다음과 같은 절차에 의해 수행하였다.

증기발생기 및 응축열교환기의 모든 제어체적에서 Q_i 가정

↓

지배방정식 및 상태방정식을 이용해 모든 격자점에서의 유동변수 계산

↓

계산된 유동변수를 이용해 식 (10)으로부터 총 열전달계수 계산

↓

식 (9)를 이용해 $\overline{Q_i}$ 계산

↓

모든 제어체적에서 Q_i와 $\overline{Q_i}$ 수렴도 판정

Q_i와 $\overline{Q_i}$ 수렴도가 수렴허용한도를 만족시키지 못하면 $Q_i = 0.3\ (Q_i + \overline{Q_i})$로 가정하여 수렴허용한도를 만족시킬 때까지 계산을 수행하였다.

피동잔열제거계통의 이탈 불안정 평가를 위한 정상상태 유동조건은 위에서 기술된 해석 절차를 적용하여 계산되었다. 즉 경계조건(일차계통 및 비상냉각탱크의 열수력 변수와 잔열제거계통의 계통압력)이 주어지면 시작점에서 속도 및 온도를 가정하여, 계통의 유로를 따라 차분방정식 및 열전달 관계식을 이용해 모든 격자점에서의 유동변수를 계산한 후, 종료점에서 얻어진 온도와 압력을 주어진 계통압력과 가정된 온도와 비교하여 상대 오차가 주어진 수렴 범위에 도달할 때까지 계산을 수행하여 정상상태 유동조건을 계산하였다. 주어진 경계조건에 대해 정상상태 유동조건을 산출하기 위한 해석 절차를 정리하면 다음과 같다

입력자료 작성

(잔열제거계통의 기하학적 자료, 프로그램 수렴제어 자료, 경계조건 자료)

↓

시작점에서의 속도, u_1 가정 ⇐ A

↓

시작점에서의 온도, T_1 가정 ⇐ B

↓

차분방정식 및 열전달 관계식을 이용해 증기발생기 및 응축열교환기를 거쳐

종료점, N (=시작점)에 돌아올 때까지 모든 격자점에서의 유동변수 ($\rho_i, u_i, P_i, h_i, T_i$) 계산

↓

가정된 온도, T_1과 계산된 온도, T_N 사이의 수렴도 판정

$|T_1 - T_N| / T_1 \le \varepsilon$ ⇒ 아니오 ⇒ B

↓ 예

계산된 압력, P_N과 경계조건으로 주어진 계통압력을 이용해 계산된

시작점에서의 압력, P_1사이의 수렴도 판정

$|P_1 - P_N| / P_1 \le \varepsilon$ ⇒ 아니오 ⇒ A

↓ 예

계통 압력강하, 유량 등의 계산 결과 출력

계산된 정상상태 유동조건의 이탈 불안정 여부를 평가하기 위한 구동력 특성곡선 및 압력강하 특성곡선은 계산된 시작점에서의 온도 및 경계조건에 대해 속도(유량)를 변화시켜가면서 유로의 압력강하와 중력수두를 계산하여 산출하였다.

2.4 해석 결과 및 논의

2.2절 및 2.3절에 기술된 해석 방법론의 적용성을 검증하기 위해 SMART 증기발생기의 열전달 면적 산정에 이용된 ONCESG[10] 코드의 해석 결과와 비교하였다. 100 % 출력 조건에서 계산을 수행하였으며, 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산 결과는 ONCESG가 계산한 온도 분포를 잘 예측하고 있으며, 압력강하도 상대오차 0.3 %로 거의 일치함을 보여주었다. 비록 검증 계산이 적용된 유량 범위가 자연순환 유량에 비해서는 매우 크나, 사용된 열전달 및 마찰계수 상관식이 Re수가 작은 자연대류 유동의 경우에도 적용할 수 있기 때문에 이 비교계산으로부터 해석 방법론의 적용성을 어느 정도 확인할 수 있었다.

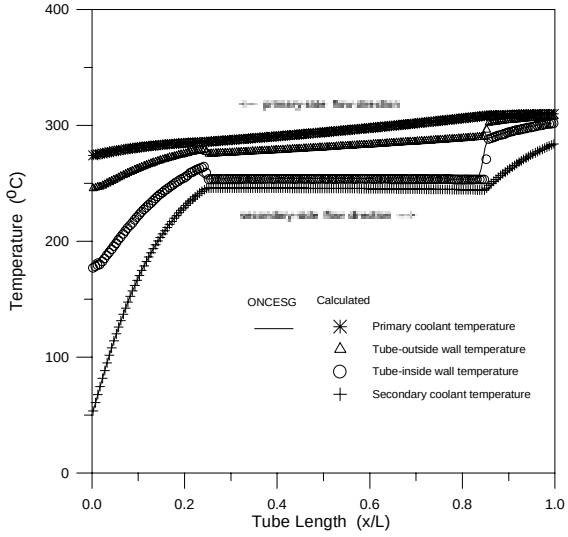

그림 3. ONCESG와의 비교계산 결과

피동잔열제거계통의 자연순환 해석은 일차계통 압력, 유량, 고온관온도 그리고 비상냉각탱크의 온도 및 잔열제거계통의 계통압력을 경계조건으로 지정하여 수행하였다. 일차계통 압력은 일차계통 정상운전 압력인 15 MPa로 가정하였으며, 일차계통 유량은 노심의 잔열이 1%일 경우에 간단한 단상 자연대류 계산을 통해 산정하였으며, 피동잔열제거계통 한 계열에 속한 3개의 증기발생기 카세트를 통해 19 kg/s가 통과하는 것으로 가정하였다. 또한 비상냉각탱크의 온도는 30 ºC로 가정하였다. 일차계통의 고온관 온도는 100 % 정상 출력에서의 온도인 310 ºC부터 증기발생기 출구에서 단상의 액상유동이 형성될 때까지 변화시켰으며, 잔열제거계통의 계통압력은 보상탱크의 초기 압력 조건인 4.5 MPa과 계통 운전 초기의 압력상승을 고려하여 8.0 MPa에 대해 계산을 수행하였다.

자연순환 유동 시, 유동변수의 분포형태를 보기 위해 계산된 정상상태 유동조건 중, 증기발생기 및 응축열교환기에서 단상의 액상유동, 2상유동 그리고 단상의 기상유동이 모두 형성되는 경우의 증기발생기 및 응축열교환기에서의 유동변수 분포를 그림 4와 5에 나타내었다. 일차계통 고온관의 온도가 290 ºC, 잔열제거계통의 계통압력이 4.5 MPa인 경우에 대해 계산된 결과를 도시하였다. 그림에서 보여지듯이, 증기발생기 및 응축열교환기의 벽면온도는 기상에서 2상으로 또는 2 상에서 기상으로 상변화가 일어날 때 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 반면에 유체의 밀도는 단상의 액상유동이 2상유동으로 변화하거나 2상유동이 액상유동으로 변화하면서 급격히 변한다. 또한 2상유동이 형성되면서 열전달이 증가하여 고온의 유체와 벽면온도의 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 비상냉각탱크의 온도 조건을 일정하게 유지하고 비등이 일어나지 않는 것으로 가정하고 해석을 수행하였으나, 실제 탱크가 대기에 노출될 경우에는 비등 열전달 방식에 의해 열제거가 이루어지게 되며, 이 경우 증기발생기와 응축열교환기의 평균온도 차이가 변하여 계통유량이 변화할 것으로 예측된다. 따라서 비상냉각탱크에서의 비등 열전달 모델의 보완이 요구되며, 이러한 작업은 향후 연구업무를 통하여 수행할 예정이다.

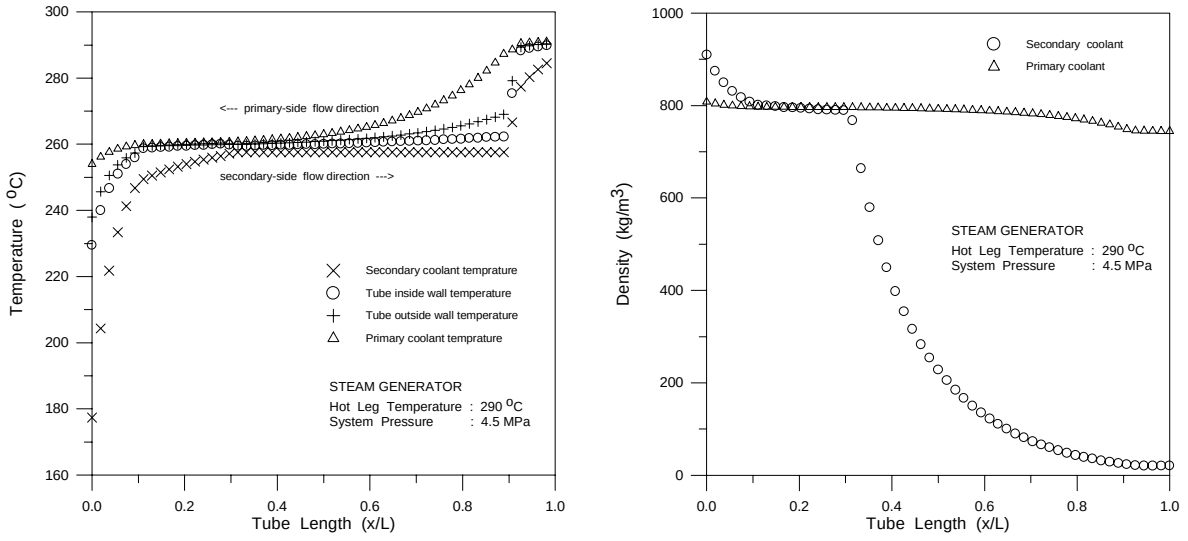

그림 4. 증기발생기에서의 온도 및 밀도 분포

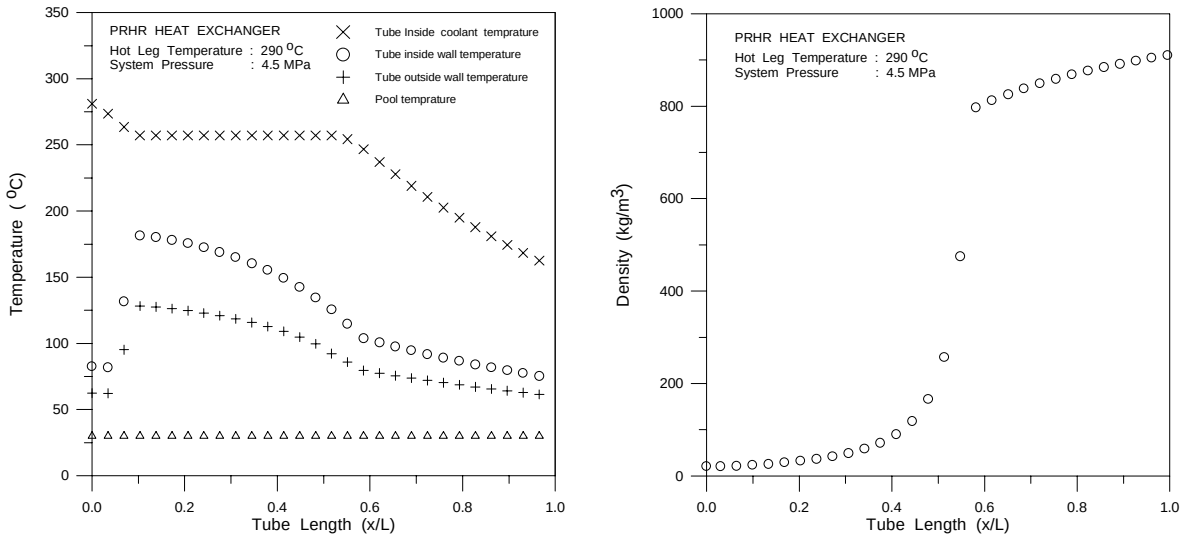

그림 5. 응축열교환기에서의 온도 및 밀도 분포

일차계통 고온관온도 및 잔열제거계통의 계통압력 변화에 따른 정상상태 유량 변화를 증기발생기에서 제거되는 열량의 변화에 따라 그림 6에 나타내었다. 그림에서 x축은 증기발생기에서 제거되는 열량을 100 % 노심 열출력으로 나눈 % power를 의미하며, y축은 계통유량을 100 % 출력에서의 급수유량으로 나눈 % 유량을 나타낸다. 계통압력이 4.5 MPa인 경우에는 일차계통 고온관의 온도가 288 ºC가 되는 시점부터 증기발생기 출구에서 2상유동이 형성되기 시작하며, 고온관의 온도가 245 ºC에 이르렀을 때 증기발생기 출구에서 단상의 액상유동이 형성되기 시작하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 고온관의 온도가 262 ºC에서 268 ºC사이의 2상유동 영역에서는 하나의 열량에 대해 2개 이상의 순환유량이 존재하는 이탈 불안정이 예측되었다. 한편 계통압력이 8 MPa인 경우에는 증기발생기 출구에서 과열증기가 형성되지 않았으며, 고온관의 온도가 290 ºC에 이르렀을 때 단상의 액상유동이 형성되기 시작하였다. 또한 이 경우에는 열량에 따른 순환유량이 하나만 존재하기 때문에 이탈 불안정은 발생하지 않으며, 따라서 이러한 결과는 계통압력이 높을수록 계통은 이탈 불안정에 대해 더 안정화되는 경향을 나타내고 있다.

그림 6에서 예측된 안정 영역과 불안정 영역에서의 안정성 여부를 판별하기 위한 구동력 특성곡선 및 압력강하 특성곡선을 그림 7에 나타내었다. 안정유동 영역에 속하는 것으로 예측된 압력 4.5 MPa, T_{hot} =290 ºC 과 압력 8.0 MPa, T_{hot} =300 ºC의 유동조건은 안정한 것으로 확인되었으며, 압력이 4.5 MPa에서 불안정한 유동조건으로 예측된 T_{hot} =266 ºC의 경우에는 구동력 특성곡선이 압력강하 특성곡선의 음(-)의 기울기 영역에서 교차하여 이탈 불안정이 발생할 가능성이 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 이탈 불안정 현상을 방지하고 계통을 안정하게 유지하기 위해 Lahey & Podowski[11]는 계통압력을 증가시키고 가열부의 입구 저항을 증가시켜 이탈 불안정을 억제할 수 있음을 제시하고 있으며, Lee & Kim[12]은 보상탱크 연결관의 길이를 증가시키거나 유동면적을 작게 하여 안정화 시킬 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서는 일차계통의 고온관온도 및 계통압력을 가정하여 계통의 정상상태 운전조건을 산출하였으나, 실제로 계통이 운전되는 조건은 잔열제거계통의 초기 유체 충전량, 일차계통의 유량 및 계통압력의 변화 등을 고려하여야 하기 때문에 성능해석을 통해 얻어져야 할 것이다. 그러나 계통

의 유동변수 변화가 시간에 따라 서서히 진행되는 계통 운전 초중반 이후부터는 일차계통의 유량 및 계통압력의 변화 등을 고려한 준 정상상태(quasi-steady state) 해석을 통해 운전조건을 산출할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 모델 개선 작업은 향후 계속하여 수행해 나갈 예정이다.

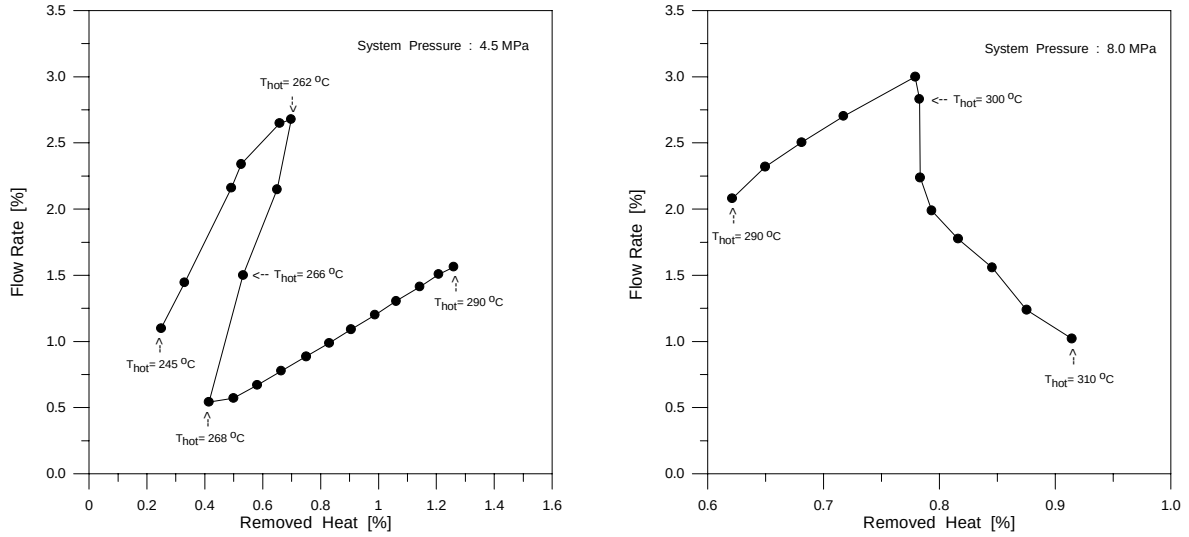

그림 6. 증기발생기에서 제거되는 열량의 변화에 따른 계통유량

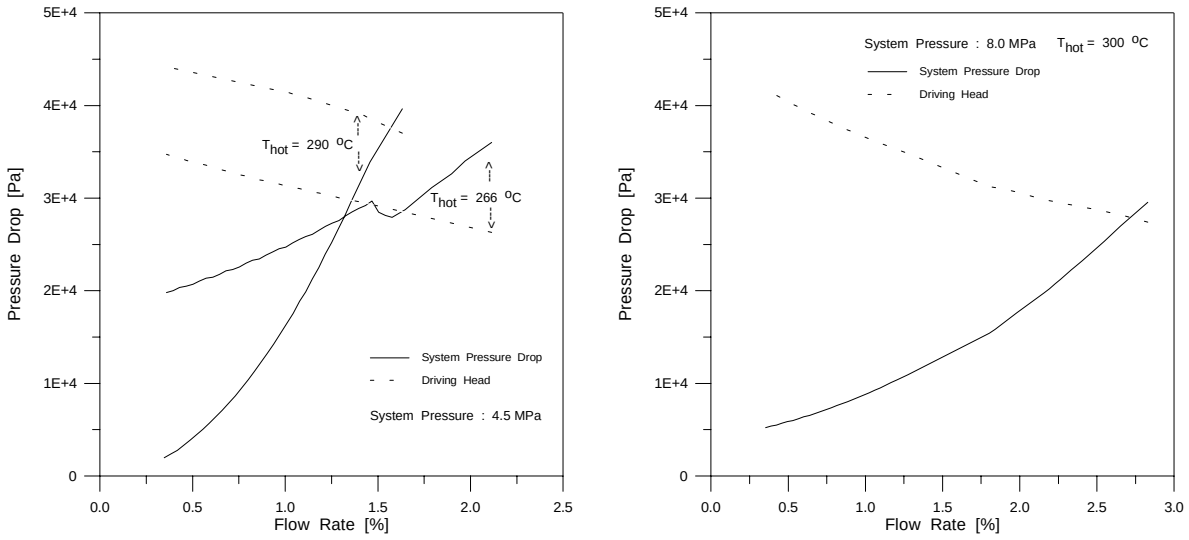

그림 7. 유량 변화에 따른 압력강하 및 구동력

3. 결론

일차계통 및 비상냉각탱크의 열수력 변수와 잔열제거계통의 계통압력을 경계조건으로 SAMRT 피동잔열제거계통의 정상상태 자연순환 해석을 통해 계통의 이탈 불안정 발생 여부를 평가하였다. 균질유동모델을 이용한 1 차원 자연순환 해석을 위한 모델을 개발하였으며, 해석 모델의

적용성을 검증하기 위해 ONCESG 코드와의 비교 해석을 수행하였다. 일차계통 고온관온도 및 잔열제거계통의 계통압력 변화에 따른 정상상태 유량은 계통압력이 4.5 MPa일 경우, 증기발생기에서 제거되는 열량의 변화에 따라 하나의 열량에 대해 2개 이상의 순환유량이 존재하여 이탈 불안정이 예측되었으며, 압력이 8.0 MPa로 증가하면 이탈 불안정이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 압력이 높을수록 계통은 이탈 불안정에 대해 안정화되는 경향을 보여주었다. 낮은 압력에서 예측된 이탈 불안정 현상은 구동력 특성곡선이 압력강하 특성곡선의 음(-)의 기울기 영역에서 교차한다는 점으로부터 확인할 수 있었다. 계산된 정상상태 운전조건을 확인하기 위해 잔열제거계통의 초기 유체 충전량, 일차계통의 유량 및 계통압력의 변화 등을 고려한 모델 개선 작업을 계속하여 수행해 나갈 예정이며, 이러한 개선 작업을 통해 불안정한 운전조건이 확인되면 안정하게 유지하기 위한 설계 개선 작업을 수행해나가야 할 것으로 판단된다.

Nomenclature

A : 면적 (m^2)
d : 직경 (m)
D_e : 등가직경 (m)
f : 마찰계수
g : 중력가속도 (m/s^2)
h : 엔탈피 (J/kg) 혹은 열전달계수 (W/m^2-K)
k_w : 벽면의 열전도도 (W/m-K)
P : 압력 (Pa)
Q : 유체의 단위체적 당 가해진 열량 (W/m^3)
T_{hot} : 일차계통 고온관온도 (^oC)
U : 총 열전달계수 (W/m^2-K)
u : 속도 (m/s)
V : 체적 (m^3)
x : 좌표 혹은 길이 (m)
ρ : 밀도 (kg/m^3)
θ : 경사각 (radian)
ΔT_{LMTD} : log mean temperature difference (^oC)

아래 첨자

i : 안쪽 혹은 격자점
o : 바깥쪽

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. A. Boure et al., ″Review of Two-Phase Flow Instability,” Nucl. Eng. Des., Vol. 25, pp. 165-192, 1973.
2. A. E. Bergles, ″Instabilities in Two-Phase System,″ Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries, Chap. 13, Hemisphere Publishing Corporation, 1981.
3. G. Yadigaroglu, ″Two-Phase Flow Instabilities and Propagation Phenomena,” Hemisphere Publishing Corporation, Chap 17, 1981.
4. R. T. Lahey, Jr. and F. J. Moody, ″The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Reactor,” Second Edition, ANS Publications, 1993.
5. SKBK, “Steam Generator with Helically Coiled Heat Transfer Area-Analytical Method,” SKBK Internal Report, 1984.
6. I. E. Idelchik, ″Handbook of Hydraulic Resistance″, Second Edition, Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
7. N. E. Todreas and M. S. Kazimi, ″Nuclear System I – Thermal Hydraulic Fundamentals,” Hemisphere Publishing Corporation, 1990.
8. F. M. White, “Heat and Mass Transfer,” Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
9. M. M. Saha, ″A General Correlation for Heat Transfer during Film Condensation inside Pipes,” Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 547-556, 1989.
10. J. H. Yoon et al., ″Development of a Computer Code, ONCESG, for the Thermal-Hydraulic Design of a Once-Through Steam Generator,” J. Nucl. Sci. Tech. Vol. 37, No. 5, pp. 445-454, 2000.
11. R. T. Lahey, Jr. and M. Z. Podowski, “On the Analysis of Various Instabilities in Two-Phase Flow,” Multiphase Science and Technology, Vol. 4, pp. 183-370, Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
12. S. Y. Lee and Y. L. Kim, “An Analytical Investigation of Role of Expansion Tank in Semi-Closed Two-Phase Natural Circulation Loop,” ” Nucl. Eng. Des., Vol. 190, pp. 353-360, 1999.