

칼리머 증기발생계통 성능해석 간이모형 개발

A Simplified Computational Model Development for the KALIMER's Steam Generation System

김연식, 심윤섭, 김의광, 어재혁

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

칼리머의 증기발생계통에 대한 성능해석 모형을 개발함에 있어서 증기발생계통 모형에 중요한 영향을 미치는 관류형 증기발생기에 대한 단순 모형을 개발하고 이와 연결된 증기급수계통을 검토하였다. 그리고 증기급수계통의 특성이 성능해석에 잘 나타날 수 있도록 증기급수제어 개념을 설정하였다. 칼리머 성능해석용 이차계통 간이 모형으로서 단순 관류형 증기발생기 모형, 단순 급수증기계통 모형, 그리고 증기급수제어 모형과 사용된 주요 가정과 특성을 기술하였다. 개발된 모형에 대한 시산을 통하여 계통 거동이 타당한 결과를 보이고 있는 것을 확인하였으며 향후 성능해석 코드에 반영하여 칼리머 성능분석에 활용할 예정이다.

Abstract

In the developing a performance analysis computer code, a simplified BOP model including an once-through steam generator and turbine extraction is developed. Assumptions and major features for the model are, also, described. A concept of steam pressure control logic for the BOP model is suggested. Computational results using the model show a reasonable trend. The model is going to be used for the KALIMER's performance analysis in the future.

1. 서 론

액체급속로 칼리머는 일차계통, 중간계통, 그리고 증기발생계통으로 구성되어 있다. 칼리머의 성능해석을 위해서는 위와 같이 관련된 모든 계통을 모의할 수 있는 모형이 개발되어야 한다. 칼리머를 개발함에 있어서 일차계통과 중간계통에 대한 성능해석 모형은 그사이 상당한 진전이 있어서 이제 증기발생기를 포함한 증기발생계통에 대한 모형을 개발하여 완전한 성능해석 코드를 개발할 단계에 와 있다. 증기발생계통에 대한 모형 개발에 있어서 개념설계에서 검토가 이루어지지 않은 터빈계통 등에 대한 모형은 비교적 단순한 계통으로 가정하되 발전소 운전 및 성능에 직접적인 영향을 미치는 증기 및 급수제어에 대하여는 비교적 자세하게 검토하였다.

칼리머의 증기발생계통에 대한 성능해석 모형을 개발함에 있어서 증기발생계통 모형에 중요한 영향을 미치는 관류형 증기발생기에 대한 단순 모형을 검토하고, 이와 연결된 증기급수계통을 검토

하였다. 증기급수계통의 특성은 터빈과 밀접한 관계가 있기 때문에 터빈계통에 대하여도 검토하였다.

본 논문에서는 칼리머 성능해석용 이차계통 간이 모형으로서 단순 관류형 증기발생기 모형, 단순 증기급수계통 모형, 그리고 증기급수제어 모형 등을 제시하고 사용된 주요 가정과 특성을 기술하였다.

2. 본 론

본 절에서는 칼리머 성능해석용 이차계통 간이 모형으로서 단순 관류형 증기발생기 모형, 단순 증기급수계통 모형, 그리고 증기급수제어 모형 등을 제시하고 사용된 주요 가정과 주요 특성을 검토하였다.

2.1 단순 관류형 증기발생기 모형

칼리머의 증기발생기(SG)는 들어온 급수가 모두 과열증기로 되는 관류형 과열 증기발생기로서 튜브측 영역은 과냉물 영역, 포화 영역, 그리고 과열증기 영역으로 나누어지며 영역간의 경계는 셀측과의 관계에 의하여 움직일 수 있다. 또한 저출력에서는 경우에 따라 영역수가 변하여 과냉물 영역과 포화 영역 두 영역만이 혹은 과냉물 한 영역만이 형성될 수 있다.

각 영역을 나타내는 셀측 및 튜브측 제어체적 내에는 관련된 구조물의 영향을 고려할 수 있도록 구조물의 질량을 반영하되 온도는 제어체적 내에서 같은 lumped개념으로 처리되었다. 소듐측인 셀측의 제어체적 내에는 셀 구조물의 질량이 그리고 튜브측인 물(증기)측의 제어체적 내에는 튜브의 질량이 포함된다.

셀측의 압력강하는 중간계통 전체 모형에서 고려하는 압력강하 계산에 의하여 처리되며 튜브측은 일정한 증기압 하에서 계산되며 열전달 계수는 셀측과 튜브측 영역별로 일정한 값을 사용하였다.

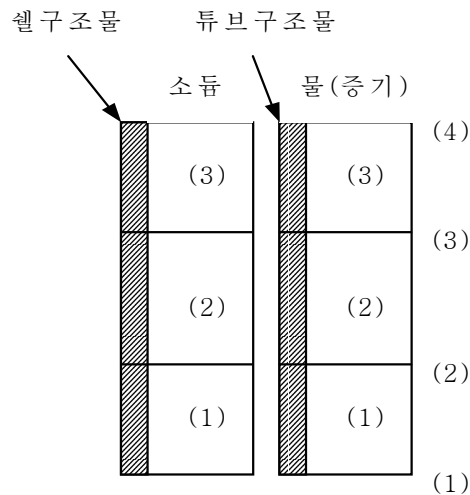


그림 1 SG 셀/튜브측 제어체적 모형

증기발생기 각 셀측 및 튜브측 제어체적에 대한 에너지 방정식은 다음과 같다[1].

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ (\Delta mc_p T)_{st} + (\rho \Delta V h)_m \} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{ex} h_{ex} - h_f \Delta A_h (\bar{T} - \bar{T}_s) + \Delta \dot{Q} \quad (1)$$

이를 정리하여 차분화된 식으로 바꾸면 유동 영역 별로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(가) 단상유동 영역 ($\Delta h = c_{pm}\Delta T$ 인 지역)

$$h_i^{j+1}\{a_{ex} + g_2(d + b + R_{mc})\} = \{a_{in} - g_1(d + b + R_{mc})\}h_{i-1}^{j+1} + (g_1)\bar{h}_{i-1}^j + (g_2)h_i^j + (c_{pm})\bar{T}_{s^{j+1}} - (d + b + R_{mc})c_h^{j+1} + c_h^j + \frac{\Delta\dot{Q}\Delta t}{\Delta m_m} + c_{et} \quad (2)$$

(나) 이상유동 영역 ($T^{j+1} = T^j = \text{일정}$)

$$h_i^{j+1}(a_{ex} + g_2d) = (a_{in} - g_1d)h_{i-1}^{j+1} + (g_1)\bar{h}_{i-1}^j + (g_2)h_i^j - bc_{pm}(\bar{T}_{s^{j+1}} - \bar{T}_s) + \frac{\Delta\dot{Q}\Delta t}{\Delta m_m} + c_h^j - dc_h^{j+1} \quad (3)$$

단,

$$a \equiv \frac{\Delta t}{\Delta m_m / \dot{m}}; R_{mc} \equiv \frac{(\Delta mc_p)_{st}}{(\Delta mc_p)_m}; r_m \equiv \frac{\Delta m_{st}}{\Delta m_m}; b \equiv \frac{h_k \Delta A_k \Delta t}{\Delta m_m c_{pm}} \quad (4)$$

$$c_{et} \equiv r_m c_{pst} \bar{T}_j - (T_{ref} - \frac{h_{ref}}{c_p})_m (bc_{pm} + r_m c_{pst}); \Delta h_{ss} \equiv \frac{\Delta\dot{Q}}{\dot{m}_m} \quad (5)$$

$$\bar{\phi} = g_1\phi_{i-1} + g_2\phi_i + c_h \leftarrow \phi = T, h; \bar{h}_{i-1} = \frac{1}{\sum_k \dot{m}_k} \sum_k^{원구} \dot{m}_k h_{i-1k} \quad (6)$$

이며 \bar{T}_s 는 벽면을 통한 열전달 대상 지역의 공간 평균온도를 의미한다. (시간과 노드 위치 표시는 그림 2를 참조.)

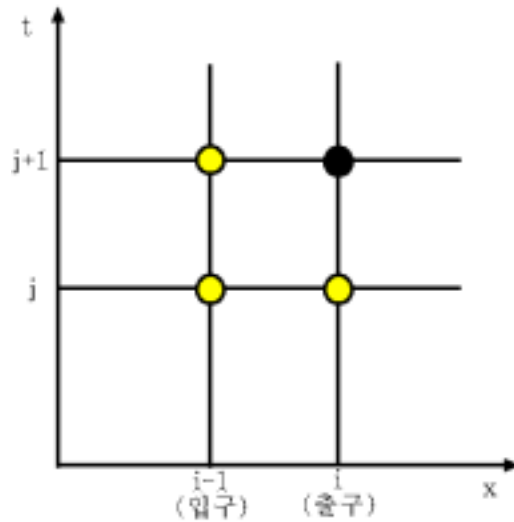


그림 2 제어체적 모형의 시간 및 노드 위치 정의

그리고 제어체적 특성에 따라 달라지는 계수(d)와 열역학적 영역에 따라 달라지는 계수(g_1, c_h)는 다음과 같이 정의된다.

(가) 제어체적 특성에 따라 달라지는 계수, d

o 부피 일정 경우

$$d = d_{vc} = (2 - \frac{\rho^j}{\rho^{j+1}})_m \quad \text{단, } |\frac{\rho^j}{\rho^{j+1}} - 1| \ll 1 \text{ 인 경우에 한함} \quad (7)$$

o 부피 변화 경우

$$d = d_{vm} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{ex}) \frac{\Delta t}{\Delta m_m} + 1 \quad (8)$$

(나) 열역학적 영역에 따라 달라지는 계수, g_1, c_h

o 단상유동 영역

$$g_1 = \begin{cases} \frac{0.5}{1 + b/a_{in} + R_{mc}}, a_{in} > 1 \\ \frac{a_{in}}{1 + b + R_{mc}}, a_{in} \leq 1 \end{cases}; \quad g_2 = 1 - g_1 \quad (9)$$

$$c_h = \begin{cases} 0, a_{in} > 1 \\ (a_{in} - 1) \frac{\Delta h_{ss}}{1 + r_m}, a_{in} \leq 1 \end{cases}; \quad h - h_{ref} = c_p(T - T_{ref}) \quad (10)$$

o 이상유동 영역

$$g_1 = \begin{cases} 0.5, a_{in} > 1 \\ a_{in}, a_{in} \leq 1 \end{cases}; \quad g_2 = 1 - g_1 \quad (11)$$

$$c_h = \begin{cases} 0, a_{in} > 1 \\ (a_{in} - \frac{1}{2}) \frac{1}{1 + r_m} \{ \Delta h_{ss} + bc_{pm}(\bar{T}_s - \bar{T}) \}, a_{in} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

2.2 단순 증기급수계통 모형

칼리머의 증기급수계통 모형을 설정하기 위하여 모형 개발 방법에 대한 검토가 이루어졌다. 표 1은 증기급수계통 모형 개발을 위한 방향 검토를 요약한 것으로서 단순화한 증기급수계통 모형을 개발하는 것이 타당하다는 것을 나타내주고 있다.

표 1 증기급수계통 모형 개발 방법에 대한 비교 검토

방법	코드입수	장.단점	적용성
기존경수로 코드 ¹⁾	연구소내에서 쉽게 입수가능	-복잡한 소스를 이해해야 됨 -계통 특성을 고려하여 코드를 수정.보완해야 됨 -기기들에 대한 사양이 상당량 필요함 -연결코드와의 연계성 작업이 필요함	×
발전소 모의 SW	한전 협조로 사용 가능 (TOPMERET) [2]	-비교적 단순한 작업으로 소스를 생산할 수 있음 -SW사용전문가의 도움을 받는데 어려움이 있음 -기기들에 대한 사양이 상당량 필요함 -필요한 모듈을 개발해야 됨 -사용 경험이 전혀 없음	△(×)
	연구소내에서 쉽게 사용 가능 (MMS)[3]	-비교적 단순한 작업으로 계통 동특성 모형을 생산할 수 있음 -ACSL언어와 C++에 대하여 상당히 알고 있어야 함 -SW사용전문가의 도움을 받을 수 있음 -기기들에 대한 사양이 상당량 필요함 -필요한 모듈을 개발해야 됨 -필요한 file로 전환하는데 연구소의 경험이 없음 -사용 경험이 전혀 없음	△(×)
간이모형	NA	-단순한 모형을 가정하여 개발할 수 있음 -간이모형을 위한 계통 단순화가 필요함 (증기계통+급수계통, 급수/증기 제어밸브+펌프) -기기들에 대한 사양을 단순화 가정할 수 있음	○

주 1) 가용한 기존 경수로 계통 성능해석 코드로서 CE 계통의 LTC[4], KWU 계통 코드인 NLOOP[5], 그리고 BOP 계통 코드인 MINET[6] 등이 있음

증기급수계통을 포함한 BOP 모형에 있어서는 원칙적으로 경수로와 화력이나 액금로는 크게 차이는 없으나 사용 증기의 종류에 따른 터빈(TBN)의 특성과 과열기/재열기 특성 등의 차이만이 있다. 성능해석을 위한 간이 BOP 모형에는 발전소 출력 제어를 위한 터빈제어밸브(TCV)와 급수 온도를 결정짓는 응축기와 추출증기에 대한 모형이 필수적이다. 그림 3은 간이 BOP 모형에 대한 개념도로서 증기발생기를 포함하여 증기 dome, TCV, 추출배관, 응축기, 예열기, 급수펌프(FWP), 그리고 급수제어밸브(FWCV) 등을 포함하고 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 BOP는 단순한 모형을 가지지만 계통의 운전이나 성능에 영향을 많이 미치는 제어개념 즉, 증기압력제어와 급수 유량제어에 대하여는 가능하면 자세한 제어개념이 반영되도록 하였다. 주요 개념에 대한 모형을 정리하면 다음과 같다.

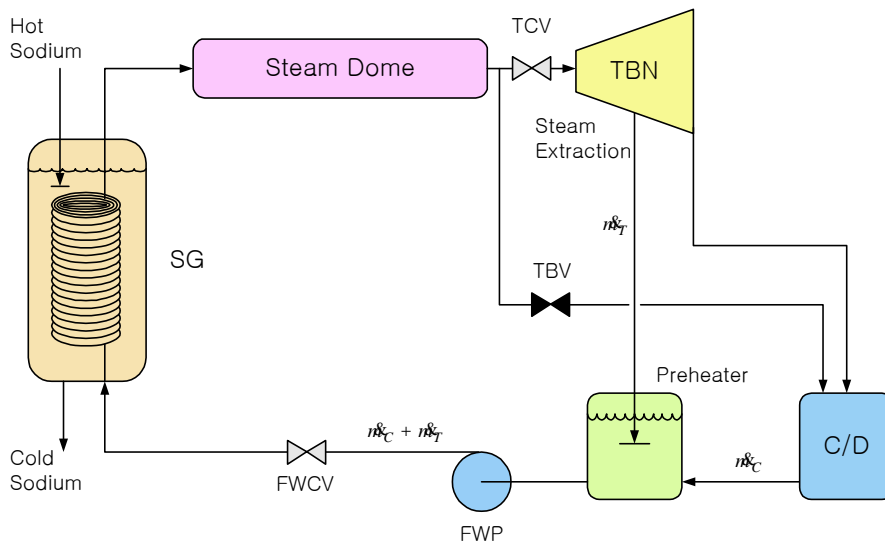


그림 3 간이 BOP 모형 개념도

증기 dome 압력은 증기발생기에선 공급되는 증기 양과 엔탈피, 그리고 TCV를 통하여 빠져나가는 증기량에 따라 변한다(그림 4 참조). 유입.유출 증기에 의하여 변화하는 증기 dome 압력을 구하는 관계식은 다음과 같이 구하였다.

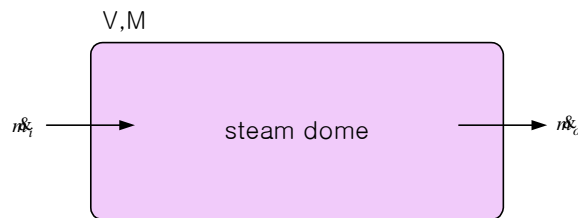


그림 4 증기 dome 개념도

증기 dome에서의 에너지 방정식은

$$M\dot{h} = \dot{Q} - h\dot{M} + V\dot{p} \quad (13)$$

$$\text{단, } \dot{Q} = \dot{m}_i h_i - \dot{m}_o h_o$$

이며 증기 dome의 체적 요건은

$$\frac{dV}{dt} = v\dot{M} + \dot{v}M (= 0) \quad (14)$$

이다. 상태방정식

$$\dot{v} = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_h \dot{p} + \left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)_p \dot{h} \quad (15)$$

을 에너지방정식 (13)에 대입하면

$$M\dot{v} - M\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_h \dot{p} = (\dot{Q} - h\dot{M} + V\dot{p})\left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)_p \quad (16)$$

이고 상태방정식 (14)를 사용하여 식(17)에 대입.정리하면 다음과 같은 증기 dome 압력 관계식

$$\dot{p} = -\frac{v\dot{M} + (\dot{Q} - h\dot{M})\left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)_p - \dot{V}}{V\left(\frac{\partial v}{\partial h}\right)_p + M\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_h} \quad (17)$$

이 된다

터빈 제어밸브(TCV)는 모든 출력에서 choke 유동이 발생하고 개도에 따라 출력이 비례하는 것으로 하였으며 임계유속 관계식은

$$G_c = \frac{0.53 * p}{1.62708 \times 10^{-7} * (h_g - 430.195)} \quad (18)$$

단, G_c : critical flow flux (kg/m²)

p: pressure (MPa)

h_g : steam enthalpy (kJ/kg)

을 사용하였다.

증기 추출량은 터빈의 설계에서 결정될 사항이지만 칼리머의 경우가 초임계압력 화력 발전소[7]의 경우와 경수로 경우[8,9,10]의 중간에 해당하므로 두 경우와 액체금속로인 CRBRP[11]를 참고하여 추출량에 대한 상관식을 다음과 같이 가정하였다. 즉,

$$w_e = w_o * \left(0.157 * \frac{p_{1st}}{p_{1st100}} + 0.213\right) \quad (19)$$

단, w_e : extraction flow rate (kg/s)

w_o : TCV 유량 (kg/s)

p_{1st} : 1st stage pressure (MPa)

p_{1st100} : 1st stage pressure at nominal power (MPa)

이다. 일반적으로 증기추출은 고압 터빈이든 저압 터빈이든 고정된 지점에서 이루어지며 추출되는 상태는 근본적으로 터빈에 흐르는 증기유량에 의존하게 된다. 왜냐하면 TCV를 통하여 터빈내로 들어온 증기는 일정한 유로를 따라 흐르면서 증기의 운동 에너지를 터빈의 회전 에너지로 전달하는 개념으로서 터빈내 경로에서의 증기의 압력이나 온도 조건은 증기유량에 주로 의존한다. 식 (19)도 이와 같은 특성을 고려한 것이다. 참고한 발전소의 설계에서 top heater로의 증기 추출압력은 발전소 별로 p_{1st} 에 대하여 일정한 비율을 가짐을 알 수 있었으며 초임계 사이클에서는 0.25, 과열증기 사이클에서는 0.33, 그리고 포화증기 사이클에서는 0.45 정도의 값을 가졌다.

증기발생기에서의 유량에 따른 압력강하는 유량의 제곱에 비례하는

$$\Delta p_{SG} = K_{SG} * w^2 \quad (20)$$

단, Δp_{SG} : 압력강하 (MPa)

K_{SG} : 압력강하 계수 (1.3×10^{-4})

w : 증기발생기 유량 (kg/s)

으로 가정하였다.

급수제어 밸브는 C_v 가 개도에 따라 선형으로 변하는 것을 가정하였으며 C_v 관계식은 SI 단위에 서는 다음의 형태이다.

$$C_v = 41.66 \frac{w}{\sqrt{\rho \Delta P}} \quad (21)$$

단, C_v : 유량계수

w : 밸브 유량 (kg/s)

ρ : 유체 밀도 (kg/m^3)

Δp : 밸브양단 압력강하 (MPa)

개도에 따른 C_v 값을 계산하기 위하여 먼저 100% 개도($w=87.7\text{kg/s}$, $\rho=840\text{kg/m}^3$)에서의 C_v 값이 178.3이므로 개도에 따른 C_v 관계식은 선형으로 다음과 같다. 즉,

$$C_v = 178.3 * f_{cv} \quad (22)$$

단, f_{cv} : 급수제어 밸브 개도 (%)

급수펌프는 변속펌프로써 발달압력이

$$\Delta p_{pp} = a_1 * w^2 + a_2 * w + a_3 \quad (23)$$

단, Δp_{pp} : 펌프 발달압력 (MPa)

w : 펌프유량 (kg/s)

a_1, a_2, a_3 : 계수 (-0.0009, 0.021, 21.48 가정)

의 관계식으로 a_2 가 펌프 회전속도에 무관하다고 가정하면, a_3 값이 펌프 회전속도에 의하여 결정되는 값으로 간주하였다. 실제 계통에서는 급수펌프이전에 응축수 펌프나 booster 펌프 등으로 어느 정도는 압력이 상승되지만 단순화를 위하여 응축기 압력(p_{CD})을 0.1MPa로 가정하고 급수펌프에 의하여 한꺼번에 압력이 승압된다고 하면 정격 운전에서의 요구 발달압력은 다음과 같다.

$$100\% \text{ 출력에서의 요구발달 압력} = \text{증기압력} + \text{SG압력강하} + \text{FWCV압력강하} - \text{응축기압력} \quad (24)$$

그런데, 증기압력=15.0MPa, SG압력강하= $1.3 \times 10^{-4} \times 87.7^2 = 1.0\text{MPa}$, FWCV압력강하=0.5MPa (모든 유량에 대하여 일정한 압력강하를 가지도록 설정), 응축기압력=0.1MPa 이므로 요구 발달 압력은 16.4MPa가 되어 펌프 특성 곡선에서의 회전수 관련 인수 a_3 의 값은 21.48이 된다. 같은 방법으로 30% 출력에서는 증기압력=15.0MPa, SG압력강하= $1.3 \times 10^{-4} \times 26.31^2 = 0.09\text{MPa}$, FWCV압력강하=0.5MPa, 응축기압력=0.1MPa 이므로 요구 발달 압력은 15.49MPa가 되어 a_3 의 값은 15.56이 된다. 출력대 회전수 인자 a_3 가 비례 관계가 아니지만 출력 변화에 대한 a_3 값의 범위가 작으므로 선형을 가정할 수 있다. 따라서 출력에 대한 a_3 관계식은

$$a_3 = 8.457 * p_R + 13.023 \quad (25)$$

단, p_R : power 을 (nominal $p_R=1.0$)

이되어 출력에 따른 회전수 인자 a_3 가 계산되면 식 (23)에 의하여 유량에 따른 발달수두가 계산 된다.

2.3 증기급수제어 모형

먼저 각종 제어기의 수학적 모델링을 정리하면

o filter or lag controller:

$$\frac{y_o(s)}{y_i(s)} = \frac{1}{\tau_1 s + 1} \quad (26)$$

이것을 Laplace 역변환후 차분화 하면

$$y_{onew} = \frac{\tau_1 * y_{old} + \Delta t * y_{inew}}{\tau_1 + \Delta t} \quad (27)$$

o lead/lag controller:

$$\frac{y_o(s)}{y_i(s)} = \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1 s + 1} \quad (28)$$

단, $\tau_2 / \tau_1 > 1$: lead 성격이 강함

$\tau_2 / \tau_1 < 1$: lag 성격이 강함

이것을 Laplace 역변환후 차분화 하면

$$y_{onew} = \frac{\tau_1 * y_{old} - \tau_2 * y_{old} + (\tau_1 + \Delta t) * y_{inew}}{\tau_1 + \Delta t} \quad (29)$$

o filtered derivative controller:

$$\frac{y_o(s)}{y_i(s)} = \frac{\tau_2 s}{\tau_1 s + 1} \quad (30)$$

입력의 미분형에 lag 즉, filter의 성질이 더해진 것으로서 이것을 Laplace 역변환후 차분화 하면

$$y_{onew} = \frac{\tau_1 * y_{old} - \tau_2 * y_{old} + \tau_2 * y_{inew}}{\tau_1 + \Delta t} \quad (31)$$

o P-I-D controller:

$$\frac{y_o(s)}{y_i(s)} = K \left(1 + \frac{1}{\tau_1 s} + \tau_2 s \right) \quad (32)$$

이것을 Laplace 역변환후 차분화 하면

$$y_{onew} = y_{old} + K * \left[y_{inew} * \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_1} + \frac{\tau_2}{\Delta t} \right) - y_{old} * \left(1 + \frac{2\tau_2}{\Delta t} \right) + \frac{\tau_2 * y_{old}}{\Delta t} \right] \quad (33)$$

단, $\tau_1 \rightarrow \infty, \tau_2 \rightarrow 0$: P controller

$\tau_2 \rightarrow 0$: P-I controller

$\tau_1 \rightarrow \infty$: P-D controller

실제로 P, P-I, P-D, P-I-D 조절기는 각각 다른 hardware가 아니라 각 시정수를 적절히 조절함으로써 다양하게 사용된다.

칼리머의 증기급수계통의 제어 모형에는 증기 온도제어와 압력제어가 있으며 급수의 유량제어는 이를 만족하기 위하여 연동되는 제어개념이다. 본 단순 BOP 모형에서는 열원인 원자로는 고려하

지 않았으므로 원자로 열출력과 관계가 있는 증기 온도제어는 고려 대상에서 제외하였다. 증기 압력제어에 관련된 증기급수계통의 주요 기기는 터빈 제어밸브와 급수 유량제어밸브, 그리고 급수 펌프 등이 있다.

요구되는 증기량을 TCV를 통하여 터빈에 보내면 증기 dome의 압력이 변하게 되는데 이를 보상하여 dome 압력을 제어하는데는 증기발생기에서 공급되는 증기양을 조절하는데 이는 결국 급수량과 같다. 따라서, 증기 압력을 제어하는데는 급수량을 제어하는 것이 관건이 되어 그림 5와 같이 증기 압력제어 개념도를 나타낼 수 있다. 목표 증기압력을 유지하기 위하여 실제 증기압력을 참고로 압력편차에 대하여 PI 제어기로 FWCV의 개도를 조절하게 된다. FWCV의 개도가 조절되면 출력별 FWCV 목표 압력차에 대한 실제 압력에 대한 편차를 PI 제어기로 FWP의 속도를 조절하게 된다(그림 6참조). 즉, 증기 dome의 압력제어는 먼저 증기압력 보상을 위한 급수밸브가 작동하고 급수밸브의 목표 압력차를 만족하기 위하여 급수펌프가 속도를 조절하는 두 단계의 제어 개념으로 이루어진다[12].

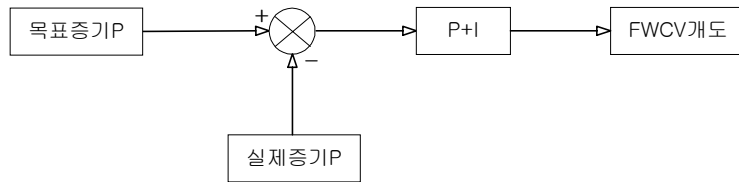


그림 5 증기 압력제어 개념도

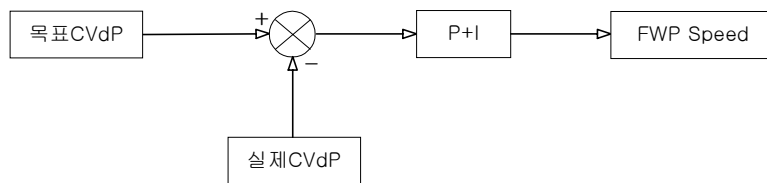


그림 6 급수펌프 속도제어 개념도

2.4 개발된 모형에 대한 시산

개발된 간이 BOP 모형에서 단순 관류형 증기발생기와 증기급수계통에 대한 시산을 수행하였다.

단순 관류형 증기발생기에 대하여는 증기 압력이 일정한 상태에서 쉘측 입구 온도 즉, 고온 소듐의 온도를 임의적으로 변화하였을 때 소듐 출구 온도와 증기온도가 어떻게 변화하는지를 시산한 결과 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 초기 200초 구간에서는 정상상태를 찾아가는 것을 알 수 있으며, 300초부터 600초까지 소듐 입구의 온도를 선형으로 증감시킨 결과 소듐의 출구온도와 증기온도는 타당한 경향을 보이면서 변화하는 것을 알 수 있으며 최종적으로는 정상상태를 다시 찾아가는 것을 알 수 있다. 그림 8에는 이러한 과도상태에서 튜브측의 영역별 길이가 시간에 대하여 어떻게 변화하는 가를 나타내고 있다.

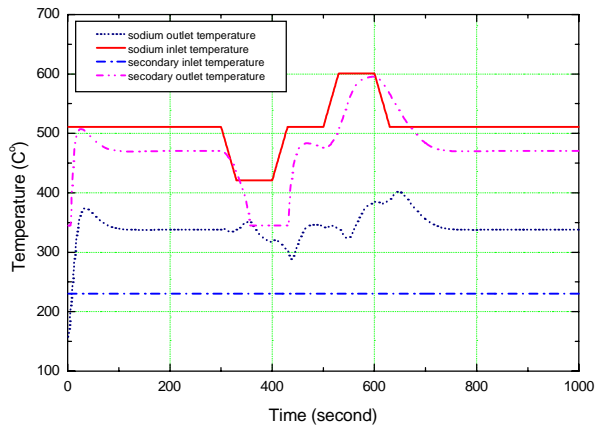


그림 7 SG 모듈 과도시산 온도 변화

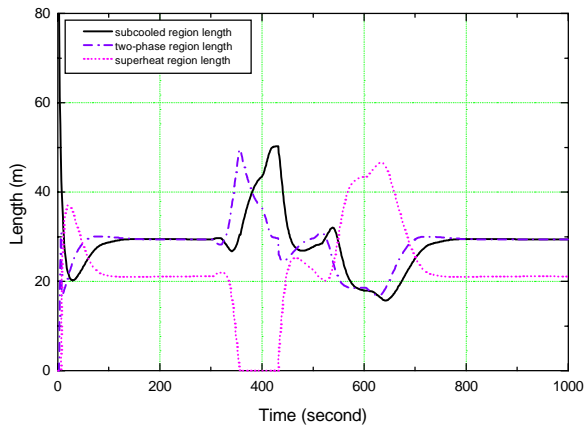


그림 8 SG 모듈 과도시산의 튜브측 영역별 길이 변화

증기급수계통에 대한 시산은 증기발생기는 단순 경계 조건으로 처리하고 증기 dome으로부터 증기발생기 입구까지를 해석 대상으로 수행하였다. 증기급수계통에 대한 증기 압력 제어를 위한 것은 온도 제어와는 달리 엔탈피의 변화가 크지 않으면 증기 유량에 의하여 지배를 받기 때문에 이것의 결과가 현실성 있다고 판단된다. 그림 9는 TCV의 개도를 원하는 출력변화(tcv open)에 대하여 터빈 증기량과 급수량, 그리고 증기 압력의 변화를 나타낸 것이다. TCV의 급격한 변화에 대하여도 증기 dome의 압력은 목표치를 비교적 신속하게 찾아가는 것을 알 수 있다. 여기에 사용된 주요 제어 시상수는 다음과 같다.

급수제어밸브(FWCV): $K=0.1$; $\tau_1=20$

급수펌프(FWP): $K=0.1$; $\tau_1=20$

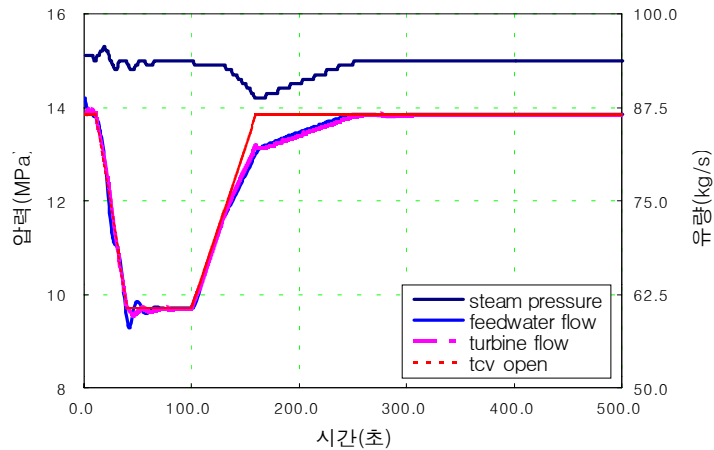


그림 9 증기급수계통 압력 및 유량 변화

3. 결론

칼리머의 증기발생계통에 대한 성능해석 모형을 개발함에 있어서 증기발생계통 모형에 중요한 영향을 미치는 관류형 증기발생기에 대한 단순 모형을 개발하고 이와 연결된 증기급수계통을 검토하였다. 그리고 증기급수계통의 특성이 성능해석에 잘 나타날 수 있도록 증기급수제어 개념을 설정하였다.

칼리머 성능해석용 이차계통 간이 모형으로서 단순 관류형 증기발생기 모형, 단순 급수증기계통 모형, 그리고 증기급수제어 모형과 사용된 주요 가정과 특성을 기술하였다. 개발된 모형에 대한 시산을 통하여 계통 거동이 타당한 결과를 보이고 있는 것을 확인하였으며 이를 칼리머 성능해석 코드에 반영하여 성능분석에 활용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

1. 심윤섭 외1, 소듐 관-통 열교환기의 교차류 열전달 해석 특성, KNS '96 춘계학술발표회
2. TOPMERET User's Manual, S3 Technologies, Sep. 1993
3. MMS Basic Manual, Framatome Technologies, Inc., 1999
4. LTC User's Manual, CE, Dec. 1986
5. Code Manual on NLOOP, KWU, Sep. 1987
6. MINET Code Documentation, NUREG/CR-3668, Dec. 1989
7. 한국전력공사 보령훈련센터, 보령3-6호기 모의제어반 운전실무, Jun. 1997
8. 영광3&4호기 열평형 자료: FSAR Chapter 10

9. 울진3&4호기 열평형 자료: FSAR Chapter 10
10. SYSTEM 80+ Heat Balance Data: CESSAR-DC Chapter 10
11. CRBRP Heat Balance Data: PSAR Chapter 10
12. 김연식, 영국 AEAT/NNC와 액체금속로 유체계통설계 기술협의 귀국보고서, Dec. 1999