2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드 개발

Development of Analysis Code for Later Phase of Sodium-Water Reaction Event in KALIMER

어재혁, 심윤섭, 김연식, 김의광

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 소듐-물 반응사고시의 계통 해석을 위하여 중/후반기의 물리적 현상 분석 및 해석 모형 설정을 통해 KALIMER 중간열전달계통의 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석용 SELPSTA(Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient Analyzer) 코드를 개발하고, 코드의 계산 알고리즘 및 계산 결과를 제시하였다. 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석모형은 복잡한 소듐-물 반응 현상의 단순화를 위해 반응에 의해 생성되는 수소 및 반응열이 모두 증기발생기 상부의 cover gas 영역으로 유입되는 것으로 가정하여 반응에 의한 계통 압력 변화를 cover gas의 압력 변화로 계산할 수 있도록 설정하였다. 또한, SELPSTA 코드를 이용하여 KALIMER 중간열전달계통 소듐-물 반응시의 중/후반기 계통 해석을 수행한 결과, 반응에 의한 계통 압력 증가로 인해 반응 시작후 약 1.32초에 압력개방판이 파열되고, 증기발생기 내부 shell측 소듐은 약 345초경에 모두 방출되어 사고가 종료되는 것으로 계산되었다. 따라서, SELPSTA 코드는 KALIMER 중간열전달계통의 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석을 위한 충분한 기능성을 가지고 있음을 확인하였다.

Abstract

To analyze the later phase of the sodium-water reaction (SWR) event in KALIMER IHTS, the simple analysis model for the mass transfer phase of SWR was developed and, using this analytical model, the SELPSTA (Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient Analyzer) code was developed with the presentation of its algorithm and calculation results of SWR in KALIMER IHTS. To simplify complex phenomena of SWR, it is assumed that all the hydrogen gas and exothermic energy due to the sodium-water reaction merged into the cover gas region in steam generator. By using this assumption, the simple analysis model of the later phase of SWR was set up such that the system pressure transient could be regarded as the cover gas pressure transient. And also, the analysis of the later phase of SWR in KALIMER IHTS was performed by using the SELPSTA code, and the calculation results showed that the rupture disk bursting time and the total drain time of sodium in shell side of steam generator were about 1.32sec and 345sec after the initiation of SWR, respectively. Accordingly, the SELPSTA code had enough capability to predict the phenomena of the later phases of SWR in KALIMER IHTS.

1. 서 론

KALIMER 증기발생기는 고온의 소듐을 열전달 매체로 하여 2차측의 급수를 가열하며 고온 고압의 급수측 물/증기와 상대적으로 저압인 shell측 액체소듐이 전열관(tube) 을 사이로 격리되어 흐르고 있으므로 증기발생기 전열관(tube)의 결함 등이 발생하면 소듐과 물의 직접 접촉에 의한 발열반응으로 인해 많은 양의 수소가 생성되어 계통의 압력을 급격히 상승시키므로 소듐과 물의 반응으로 인한 계통의 안전성 확보에 대한 연구가 필수적이라 할 수 있다. 소듐-물 반응은 반응 요인인 물/증기의 소듐상으로의 유입률에 따라 계통에 미치는 영향이 다르게 나타나며, 편의상 물 누출율에 따라 사고유형을 분류하고 있다[1]. 소듐-물 반응시, 소듐 상으로 지속적으로 유입되는 물/증기에 의한 격렬한 반응으로 인해 생성된 수소는 소듐상을 밀어내면서 증기발생기 내부의 압력을 급격히 증가시키며, 반응 생성물의 대부분을 차지하는 수소는 초기에 구형의 단일 기포를 형성하여 성장하다가 안정성을 잃으면 수소와의 균질 2상 흐름을 형성하고, 물의 누출이 더 증가하면 기체상의 수소, 액상의 소듐, 그리고 이 두가지 상이 공존하는 비균질 2상 유동을 형성한다. 이러한 대규모 물 누출 사고의 해석은 반응 초기의 압력 Spike와 그 이후 발생하는 2차 압력 상승기간 이후의 중/후기 준정상상태(quasi steady state) 압력 거동으로 구분하여 분석을 수행하게 되며, 본 연구에서는 준정상상태(quasi steady state)에서 압력개방판(rupture disk) 파열 이후, 사고 종료시점까지의 증기발생기 및 압력방출계통의 압력 변화에 대한 해석 모형을 이용하여 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석 전산코드, SELPSTA (Sodium-water reaction Event Later Phase Systm Transient Analyzer)를 개발하였다.

2. 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석 모형

소듐-물 반응사고는 초기에 급격한 압력파의 발생 및 전달 현상인 wave propagation phase에서 중/후반기에는 반응 생성물 및 반응열의 계통내 유입량 증가로 인한 압력증가 현상인 mass transfer phase로 전환된다. 특히, 중/후반기 해석은 wave propagation 을 포함하는 초기(수 msec) 급격한 계통과도 현상보다는 압력개방판(Rupture Disk) 파열 이후의 소듐-물 반응 압력방출계통(SWRPRS) 및 관련 배관계통 전체에 대한 상대적으로 긴 시간동안(~수 sec)의 계통 해석에 주안점을 둔다. 실제로, 소듐-물 반응시 2차계통 내부는 액체상의 소듐 및 수소기체의 혼합상이 존재하므로 2상유동 모델이 필요하지만, 해석의 단순화와 wave propagation의 영향 감소를 고려하여, 기 수행된 연구를 통해 분리이상유동모델(discrete two-phase flow model)을 개발한 바 있으며[2], 이를 이용하여 mass transfer phase의 특성상을 반영한 보다 단순한 해석 모형을 설정할 수 있다. 즉, 소듐-물 반응시 반응 부위에서 발생하는 계통의 물리적/화학적으로 복잡한 현상은 결국 반응에 의해 생성되는 수소기포의 총 부피 및 반응열에 등가하는 증기발생기 내부의 cover gas의 부피 및 온도 증가에 의한 압력변화로 이어져 중간열전달계통(IHTS) 및 증기발생계통(SGS)의 과압 형태로 나타나게 되므로, 그림 1과 같이 소듐-물 반응시 생성되는 모든 수

소기포가 발열반응에 의한 반응열과 함께 cover gas 영역으로 유입되어 궁극적으로는 cover gas의 압력 변화로 이어지는 보다 단순한 중/후반기 계통 해석모형 설정이 가능하다. 이 때, 소듐은 비압축성(incompressible) 유체로 가정하여 열역학적 성질은 온도만의 함수이며, 증기발생기 내부의 cover gas 및 소듐-물 반응시 발생하는 수소기포 등은 모두 이상기체로 가정하여 보다 단순한 중/후반기 해석 모형을 설정하였다. 또한, 소듐-물 반응이 시작되는 시점부터 증기발생기 shell측 소듐과 급수측이 완전히 격리되어 사고가 종료되는 시점까지 증기발생기 외벽 또는 cover gas 영역을 통한 에너지의 입/출입이 없는 단열계(adiabatic system)로 가정하여 해석을 단순화하였으며, 이 경우 해석 영역의 압력방출계통(SWRPRS)까지로의 확장이 용이하여 압력개방판(Rupture disk) 파열 및 이후의 shell 측 소듐 배출 등의 해석이 가능한 장점이 있으므로 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석에 적합한 모형이라고 할 수 있다.

3. 해석코드 개발

소듐-물 반응사고 중/후반기 해석 코드는 증기발생기 shell 측 소듐에 대하여 비압축성(incompressible), 1차원 비정상 점성유동(one-dimensional unsteady viscous flow)을 적용하였으며, 증기발생기 상부에 채워져 있는 cover gas와 소듐-배출 탱크의 비활성 기체는 이상기체(ideal gas)로 가정하여 이상기체 방정식을 적용하였다. 또한, 소듐-물 반응사고 중/후반기 특성을 반영하여 압력개방판(Rupture disk) 파열 이후의 소듐 배출현상 및 물/증기 측과 shell측 소듐이 격리되어 반응이 종료되는 사고 종료시점 계산 기능을 포함하도록 개발하였다.

3.1 기본 지배방정식

증기발생기 상단의 cover gas 영역은 Helium 기체가 채워져 있으며, 소듐-물 반응시 생성된 수소기체가 cover gas 영역으로 유입되어 수소와 헬륨의 두가지 기체가 공존하게 된다. 이 때의 에너지 수지는 다음과 같다.

$$\frac{\partial E_{CG,tot}}{\partial t} = Q_{gen} - Q_{\sin k} - \dot{W} + Q_{in} - Q_{out} \tag{1}$$

여기서, $E_{CG,tot}$ 은 cover gas의 총 에너지이며, Q_{gen} 과 $Q_{\sin k}$ 는 각각 계 내에서 발생하는 열량과 소멸되는 열량을 나타낸다. 또한, $\dot{W}$ 는 계가 외부에 행하는 일, 그리고 Q_{in} 과 Q_{out} 은 각각 계로 유입되는 열량과 빠져나가는 열량을 의미한다. 소듐-물 반응 중후반기 단순해석 모형의 경우, cover gas를 기준으로 볼 때, 생성되는 열량이 존재하지 않으므로 Q_{gen} 은 0이며, $Q_{\sin k}$ 는 cover gas 영역으로부터 증기발생기 내부의 shell 측 소듐으로의 열전달량을 의미한다. 또한, 증기발생기 외부의 단열조건을 가정하여 외부로의 열손실은 무시하므로 Q_{out} 은 0이 되며, 이 때 증기발생기 내부의 소듐은 정체된 것으로 가정하여 IHTS

를 순환하는 소듐유동은 무시하였다. 따라서, 소듐-물 반응에 의한 과도기 cover gas 내부의 총 에너지 변화는 식 (2)와 같으며, 식 (1)의 우변 각 항을 식으로 표시하면 식(3) 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial E_{CG,tot}}{\partial t} = c_{pH_2}\frac{dm_{H_2}}{dt}(T_{CG} - T_{CG,o}) + \{m_{He}c_{PHe} + m_{H_2}^{acc}c_{PH_2}\}\frac{dT_{CG}}{dt} \tag{2}$$

$$Q_{in} = \dot{m}_{H_2}c_{P,H_2}(T_{H_2} - \overline{T}_{CG}) \tag{3}$$

$$Q_{\sin k} = \frac{\Delta m_{H_2}}{\Delta t}c_{P,CG}(T_{CG} - \overline{T}_{Na}) = \dot{m}_{H_2cP,CG}(T_{CG} - \overline{T}_{Na}) \tag{4}$$

$$\dot{W} = \frac{\partial}{\partial t}(P_{CG}\cdot V_{CG}) = P_{CG}\dot{V}_{CG} + V_{CG}\dot{P}_{CG} \tag{5}$$

이 식에서, m_{H_2} 와 m_{He} 는 각각 수소와 헬륨기체의 질량이며, 하첨자 "CG"와 "o"는 각각 cover gas와 초기값을, 그리고 상첨자 "acc"는 누적량을 의미한다. 또한, V_{CG} 와 P_{CG} 는 각각 cover gas의 부피와 압력을 나타내며, 소듐을 비압축성 유체로 가정하였으므로, 압력개방판(Rupture disk)이 파열되기 전까지는 증기발생기 내부의 cover gas와 소듐 자유표면 간의 경계면을 rigid boundary로 설정하여, dV_{CG}/dt 는 0으로 간주하고, 압력개방판(Rupture disk) 파열 이후에 증기발생기 내부의 소듐이 배출되는 시점부터 cover gas 부피의 변화량을 고려하였다. 이를 통해 설정한 소듐-물 반응시의 cover gas의 온도 및 압력 과도 관계식을 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} & c_{P,H_2}\frac{dm_{H_2}}{dt}(T_{CG} - T_{CG,o}) + \{m_{He}c_{P,He} + m_{H_2}^{acc}c_{P,H_2}\}\frac{dT_{CG}}{dt} \\ &= \frac{dm_{H_2}}{dt}c_{P,H_2}(T_{H_2} - \overline{T}_{CG}) - \frac{dm_{CG}}{dt}c_{P,CG}(T_{CG} - \overline{T}_{Na}) - \dot{W} \end{aligned} \tag{6}$$

이 식에서, cover gas 부피변화에 수행하는 일에 관련한 $\dot{W}$ 의 2번째 항은 계통의 압력개방판(Rupture disk) 파열 시점 이후부터 계산되므로, 압력개방판(Rupture disk) 파열시점 이후부터는 계통의 온도 감소 폭이 줄어드는 현상을 수학적으로 잘 모사하고 있다. 또한, 계통은 단열계(Adiabatic System)라는 가정에 의해 증기발생기 상단의 cover gas 영역으로부터 소멸되는 열량이 shell측 소듐으로의 전달되는 열량과 동일하다고 가정하면 증기발생기 내부 소듐의 온도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}E_{add,Na} = -Q_{\sin k,CG} = \frac{dm_{Na}}{dt}c_{P,Na}(T_{CG} - \overline{T}_{Na}) + m_{Na}c_{P,Na}\frac{d}{dt}(T_{CG} - \overline{T}_{Na}) \tag{7}$$

여기서, $c_{P,Na}$ 는 소듐의 열용량(heat capacity)이며, m_{Na} 와 $\overline{T}_{Na}$ 는 각각 shell측 소듐의 질

량과 평균온도를 의미한다. 또한, 하첨자 “add”는 계로 가해지는 양을 의미하며, $Q_{\sin k,CG}$ 는 cover gas로부터 소듐으로 전해지는 열량이다.

cover gas 영역의 수소와 헬륨 기체는 이상기체로 가정하고, 증기발생기 내부 shell측의 소듐은 비압축성(incompressible)으로 가정하여 소듐-물 반응 기간 동안 소듐의 온도 증가에 의해서만 밀도 변화가 나타나는 것으로 간주하였으므로, 계통의 압력은 cover gas의 압력에 의해 결정된다. 따라서, 계통의 압력을 압력개방판(rupture disk) 파열 전과 후로 표시하면 각각 다음 식 (8) 및 식 (9)와 같다.

$$\frac{dP_{CG}}{dt}=\frac{dm_{H_2}}{dt}\frac{\overline{R}}{M_{H_2}}\frac{T_{CG}}{V_{CG}}+\left[\frac{m_{H_2}^{acc}}{M_{H_2}}+\frac{m_{He}}{M_{He}}\right]\cdot\frac{\overline{R}}{V_{CG}}\cdot\frac{dT_{CG}}{dt} \tag{8}$$

$$\frac{dP_{CG}}{dt}=\frac{\overline{R}\cdot T_{CG}}{M_{H_2}V_{CG}}\cdot\frac{m_{H_2}^{j+1}-m_{H_2}^{j}}{\Delta t}+\left[\frac{m_{H_2}^{acc}}{M_{H_2}}+\frac{m_{He}}{M_{He}}\right]\cdot\frac{\overline{R}}{V_{CG}}\cdot\frac{dT_{CG}}{dt}-\frac{P_{CG}}{V_{CG}}\frac{dV_{CG}}{dt} \tag{9}$$

이 식에서, $\overline{R}$ 는 일반기체상수(universal gas constant)이며, M 은 각 기체의 분자량으로, 압력개방판(rupture disk) 파열 이후에는 cover gas 부피변화에 의한 감압항(depressurization term)이 포함되어 있음을 알 수 있다.

3.2 소듐 배출탱크(SDT) 압력 계산

소듐-물 반응시 계통의 압력이 상승하여 rupture disk의 파열 설정압력(2.5MPa)에 도달하면, 계통의 압력개방판(Rupture disk)이 파열되고 증기발생기 내부와 소듐 배출 탱크(SDT ; Sodium Drain Tank)와의 큰 압력차로 인해 shell 측 소듐은 소듐 배출탱크로 급격히 배출된다. 따라서, 상압으로 유지되고 있던 소듐 배출 탱크는 고온의 소듐으로 인해 급격한 온도 및 압력 과도를 겪게 되고 따라서, 탱크 내부의 압력이 상승한다. 탱크 내부는 비활성 기체(noble gas)로 채워져 있으므로 탱크의 압력 계산에도 앞선 증기발생기 내부의 cover gas 영역과 동일한 가정을 이용하여 이상기체 방정식을 적용하였으며, 소듐 배출 탱크는 외부가 단열된 것으로 가정하여 탱크 내부로 유입된 소듐의 열손실을 무시하였다. 또한, 탱크 내부의 비활성 기체(noblw gas)로의 열전달만을 고려하여 탱크 내부의 기체 온도는 소듐의 온도와 순간적으로 동일해 지는 것으로 가정하였으며, 이러한 가정을 통해 소듐 배출 탱크(SDT) 내부의 압력은 다음 식 (10)과 같이 계산된다.

$$\frac{dP_{NG}}{dt}=\frac{m_{NG}}{M_{NG}}\cdot\frac{\overline{R}}{V_{NG}}\cdot\frac{dT_{NG}}{dt}-\frac{P_{NG}}{V_{NG}}\cdot\frac{dV_{NG}}{dt} \tag{10}$$

여기서, 하첨자 "NG"는 소듐배출탱크 내부의 비활성기체(noble gas)를 의미하며, 초기의

탱크 내부 비활성기체 부피는 소듐 배출탱크의 부피와 동일한 것으로 설정하였다.

3.3 소듐 배출유량 및 증기발생기 소듐 액위 계산

압력개방판(rupture disk)이 파열되면, 증기발생기 내부의 소듐이 소듐배출탱크(SDT ; Sodium Drain Tank)로 배출된다. 이 때의 주된 소듐 배출 구동력은 계통의 높은 압력과 소듐 배출탱크의 압력차 및 소듐 배출 배관의 압력손실의 함수가 되며, 배출되는 소듐의 유량을 식으로 표현하면 다음 식 (11)과 같이 표시할 수 있다.

$$\dot{m}_{ex}(t) = \sqrt{\frac{P_{SYS}(t) + P_{ST,Na}(t) - P_{NG}(t)}{C_{R/D,pipe}}} \tag{11}$$

여기서, $\dot{m}_{ex}$ 는 압력개방판(Rupture disk) 파열로 인해 소듐배출탱크로 방출되는 소듐 유량이며, P_{SYS} 는 cover gas의 압력 상승에 기인하는 계통의 총 압력으로, 증기발생기 내부 shell측 소듐을 비압축성으로 가정하였으므로, cover gas의 압력과 동일하다고 할 수 있다. 또한, $\Delta P_{ST,Na}$ 와 $C_{R/D,pipe}$ 는 증기발생기 내부에 존재하는 소듐의 정압(static pressure)과 소듐 배출 배관의 압력손실 계수를 의미한다.

또한, shell 측 소듐의 방출로 인한 증기발생기 내부 소듐 액위는 그림 2와 같이 증기발생기(SG) 내부의 유체 공간을 기준으로 소듐의 배출에 따른 자유액면 액위 계산을 수행하게 된다. 그림에서 영역 I, II, III 및 IV는 각각 cover gas 영역, 상부 플레넘(upper plenum), tube bundle 영역, 그리고 하부 플레넘(lower plenum)이며, V, A, H는 각각 해당 영역의 부피, 유동 면적, 그리고 높이를 의미한다. 특히, 유동면적 "A"는 증기발생기 내부의 구조물 등에 관계없이 유체가 이동할 수 있는 순 유동면적을 의미하는 것으로 증기발생기(SG) 내부 소듐 액위 계산에 가장 지배적인 영향을 미치는 설계인자로 참고문헌을 참조하여 계산에 활용하였다[3]. 이와 같은 관계를 이용하여 증기발생기 내부의 소듐 액위는 다음 식 (12)와 같이 계산할 수 있으며, $V_{ex}(t)$ 는 식 (11)에서 계산된 배출소듐 부피이며, 해당 시간에서의 SG 내부의 기준 잔류량을 유동면적으로 나누어 소듐 액위를 계산하도록 설정하였다. 이 때, 소듐 배출 유량은 소듐 온도의 함수로 주어지므로 소듐 자유액면 액위 역시 이에 준함을 알 수 있다.

$$H_{Na} = \begin{cases} (H_{III} + H_{IV}) + \dfrac{(V_{II} - V_{ex}(t))}{A_{II}}, & (\mathit{for}\ H_{II} < H_{Na} < H_{I}) \\ H_{IV} + \dfrac{(V_{II} + V_{III} - V_{ex}(t))}{A_{III}}, & (\mathit{for}\ H_{III} < H_{Na} < H_{II}) \\ \dfrac{(V_{II} + V_{III} + V_{IV} - V_{ex}(t))}{A_{IV}}, & (\mathit{for}\ H_{IV} < H_{Na} < H_{III}) \end{cases} \tag{12}$$

3.4 수소생성 모형

소듐-물 반응사고 발생시의 초기 복잡한 압력파의 거동은 기 개발된 바 있는 SPIKE 코드의 계산 결과를 이용하여 본 코드의 초기 조건으로 활용하였으며, 계산의 source 항으로 사용되는 소듐-물 반응시의 수소 생성량은 전적으로 증기발생기 내부 전열관으로부터 shell측 소듐으로의 물 누출량에 의존하게 되므로, 이 관계를 코드에서는 다음 식 (13) 및 식 (14)와 같이 모형화하였다.

$$\dot{m}_{leak} = \dot{m}^{o}_{leak} \cdot \exp[-g \cdot (t - t_{leak,end})] \quad , \quad (\,for \quad t \geq t_{leak,end}\,) \tag{13}$$

$$\dot{m}_{PRH} = a \cdot b \cdot \dot{m}_{leak} = a \cdot b \cdot \dot{m}^{o}_{leak} \cdot \exp[-g \cdot (t - t_{leak,end})] \tag{14}$$

여기서, $\dot{m}^{o}_{leak}$ 는 SG shell측으로 누출되는 초기 물/증기 누출량을 의미하며, 소듐-물 반응 종료시 inertia를 고려하여 물 누출이 서서히 감소하는 경향을 모사하기 위해 초기 물 누출량에 지수적으로 감소하는 항을 곱할 수 있도록 모형화하였다. 이 때, g 는 지수적으로 감소하는 정도를 정량적으로 입력하기 위한 상수이다. 또한, $\dot{m}_{PRH}$ 는 shell측 소듐으로 누출된 물로부터 생성된 수소 생성량이며, a 와 b 는 각각 물에서 수소로의 전환비를 의미한다. 이러한 수소 생성량은 대규모 물누출 사고시의 초기 물 누출량, $\dot{m}^{o}_{leak}$에 의존하게 되며 KALIMER 소듐-물 반응사고의 설계기준사고(Design Basis Event)인 전열관 양단파단(double ended guillotine break) 경우의 초기 물 누출량은 다음 식 (15)와 같이 계산될 수 있다[4].

$$\dot{m}''_{crit} = \frac{0.53 \times P}{1.62708 \times (h_g - 430.195)} \tag{15}$$

식에서, $\dot{m}''_{crit}$ 는 단위면적당 임계유량으로 단위는 [kg/m^2-sec]이며, P 는 계통 압력으로 [MPa] 단위이다. 또한, h_g 는 누출되는 물/증기의 엔탈피이며 단위는 [kJ/kg]이다. 따라서, 누출 유량은 양단파단(Double Ended Guillotine Break) 면적을 곱하여 사용한다. 이를 이용하여 KALIMER 중간열전달계통(IHTS) 및 증기발생계통(SGS)의 설계인자를 적용하여 계산하면 초기 물 누출량은 7.19 kg/sec이며, KALIMER 설계기준사고(Design Basis Event)인 세 개의 전열관이 양단파단되는 3DEGF를 가정하면 총 물누출량은 21.57 kg/sec가 된다. 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드 계산의 source 항으로 적용되는 수소 생성량은 다음 그림 3과 같은 물/증기의 누출율을 토대로 계산된다. 그림 3은 물 누출이 끝나는 시간인 $t_{leak,end}$ 까지의 물 누출율을 나타낸 그림으로 증기발생기 내부의 소듐이 배출되거나 다른 요인으로 인해 반응요인이 제거되었을 경우의 inertia 항에 의해 물 누출이 서서히 감소되는 경향을 보여주고 있으며, 반응요인 제거 이후의 물누출 감소는 앞서 언급한 바와 같이 inertia 상수, g 에 의해 그 기울기가 결정된다. 또한, 물 누출량은 과도

계산의 source 항으로 사용되는 수소 생성량 계산에 직접적인 관계가 있으므로, 소듐-물 반응사고 초기 계통거동 해석을 위한 SPIKE 코드와 연계가 가능하도록 초기 1초까지는 SPIKE 코드의 결과를 이용하였다[5].

4. 수치해석 및 결과 고찰

4.1 수치계산 흐름도

본 연구에서 개발한 소듐-물 반응사고 중후반기 해석 코드는 계통의 과도현상 분석을 위해 time step, "t"에서의 압력(pressure), 유량(flowrate), 수두(elevation), cover gas 부피 등의 시간에 대한 변화율(rate of change)을 계산하고 이를 과도기 계산을 위한 시간 간격, "Δt"에 대해 고려하여 "$t+\Delta t$"에서의 새로운 값을 계산한다. 본 계산에서 Δt는 계산의 수렴 조건에 의해 적절한 시간 간격으로 변화하도록 설정하였으며, 압력의 급격한 변화가 상대적으로 적게 나타나는 시간대에서는 일정한 시간 간격으로 계산을 수행하도록 설정하여 수치해석 상의 안정성을 도모하였다. 소듐-물 반응사고 중후반기 해석 코드인 SELPSTA 코드의 계산 흐름도(flow chart)는 그림 4와 같다.

4.2 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석

소듐-물 반응사고 중후반기 해석용으로 개발된 SELPSTA 코드를 이용하여 KALIMER 소듐-물 반응사고의 설계기준사고(Design Basis Event ; DBA)로 선정한 3DEGF(3개의 전열관이 양단파단되는 사고)에 대하여 분석을 수행하였다. 그림 5는 KALIMER 소듐-물 반응사고의 설계기준사고(Design Basis Event)인 3DEGF에 대한 수소 생성량을 도시한 그림으로, 초기 수소 생성량은 SPIKE 코드의 계산 결과를 이용하여 설정하였으며, 이 후 일정한 양의 수소가 발생하다가 증기발생기 shell측 소듐이 소듐배출탱크(sodium dump tank)로 모두 방출되어 증기발생기 shell측 소듐과 전열관측 급수가 완전 격리되는 사고 종료시점에서는 급격히 감소하여 0이 되는 것으로 설정하였다. 이러한 초기 계산 source 항 설정은 초기 압력파의 전파를 나타내는 SPIKE 코드와 2차 압력상승 등의 mass transfer를 주로 계산하게 되는 SELPSTA 코드의 source 항을 일치시켜, 소듐-물 반응사고시의 초반기 계통 해석과 중/후반기 계통 해석의 일관성을 기하기 위함이며, 본 분석에서 사용하는 물누출 종료시점에서의 수소 생성량 곡선의 형태는 사용자 입력으로 변경할 수 있게 하여 현상 분석에 여유도를 부여하였다.

본 분석에서는 이와 같은 계산 source 항을 토대로 초기 1초까지는 SPIKE 계산 결과를 이용하여 1초에서의 계통 온도 및 압력 조건을 본 연구에서 개발한 중후반기 해석 코드인 SELPSTA 코드의 초기 조건으로 사용하였으며, 반응 시작 후 15분 동안의 계통 거동을 분석하였다. 그림 6은 소듐-물 반응사고시의 계통의 전체적인 압력 변화를 나타낸 그림으로, 계통의 압력은 압력개방판(rupture disk) 파열 이전까지 급격히 증가하다가 압력개방판

(rupture disk) 설정압력에 도달하면 급격히 감소하게 되고, 이 시점부터는 증기발생기(SG) 내부의 소듐 배출로 인해 소듐 배출탱크의 압력이 서서히 증가한다. 이 때까지 계통의 압력은 지속적으로 감소하며, 증기발생기 내부의 소듐이 모두 배출되는 시점인 약 345초 경과 후에는 계통의 압력과 소듐배출탱크의 압력이 거의 유사해지는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 소듐-물 반응 시작 후 3초까지의 계통 압력거동을 확대하여 나타낸 그림으로, 반응 시작 후 초기 1초까지는 압력파의 전파에 의한 계통 거동이 주로 나타나게 되므로 초기 spike 압력 해석용으로 개발된 SPIKE 코드의 결과[5]를 사용하고 사고 시작 후 1초경부터는 SELPSTA 코드의 결과를 사용하여 계통 압력 변화를 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 계통의 압력은 반응 직후인 수 msec 경에 스파이크 압력이 발생하지만, 압력개방판 파열압력인 2.5MPa에는 미치지 못하는 것을 볼 수 있으며, 지속적인 반응에 의한 2차, 3차 압력파가 발생하면서 계통의 압력이 점차적으로 상승하는 준정상상태(quasi steady state)에 도달하며, 약 1.32초경에 압력개방판(rupture disk)이 파열되고 압력개방판 파열 직후에는 압력개방판 파열 설정 압력인 계통압력 2.5 MPa와 소듐 배출탱크의 초기 압력 0.1 MPa 간의 큰 압력차로 인해 chocking에 가까운 소듐 배출 유량이 형성되어 계통의 압력이 순간적으로 많이 감소하였다가 곧 이어 압력 균형(Pressure balance)에 의해 다소 회복되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 높아진 계통 압력은 증기발생기 내부의 소듐이 계속 배출되면서 다시 서서히 감소하는 경향을 보인다. 그림 8은 압력개방판(rupture disk) 파열 이후, 소듐 배출 탱크로 방출되는 소듐의 유량을 나타낸 그림으로, 소듐 배출유량은 압력개방판(rupture disk) 파열 이전에는 0으로 유지되다가 압력개방판(rupture disk) 파열 직후에는 chocking에 가까운 큰 유량을 나타내고, 이 후 서서히 감소하여 물 누출이 종료되는 시점부터는 급격한 감소 경향을 나타낸다. 이는 이 시점에서 계통의 압력과 소듐 배출 탱크의 압력이 유사해 지기 때문이며, 그림에서는 현상을 명확히 나타내기 위해 log scale을 사용하였다. 그림 9는 증기발생기 내부의 소듐 액위를 나타낸 그림으로 전열관 다발 영역에서의 소듐 액위의 감소가 상대적으로 급하게 나타나며, 약 345초경에는 증기발생기 shell측 소듐이 모두 배출됨을 알 수 있다. 그림 10은 소듐-물 반응사고 발생 후 15분까지의 cover gas 및 증기발생기 소듐의 온도 변화를 나타낸 그림으로, cover gas 및 소듐의 온도 모두 초기 온도를 기준으로 초반에 급격히 상승하다가 압력개방판(rupture disk) 파열 이후부터는 상승 폭이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 이는 증기발생기 내부의 소듐이 압력개방판(rupture disk) 파열에 의해 소듐배출탱크로 방출되면서 cover gas 공간이 상대적으로 증가하고, 이로 인해 압력이 감소하기 때문이며 지속적인 반응으로 인해 발생하는 고온의 수소 기체의 영향으로 계통의 온도는 미미하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 특히, 증기발생기 내부의 소듐온도 상승이 두드러지는 것은 압력개방판(rupture disk) 파열로 인해 shell측 소듐이 빠져나가면서 증기발생기 내부에 존재하는 소듐의 양이 계속 감소하기 때문으로, 소듐이 모두 배출되는 약 345초경부터는 소듐의 양이 고갈되면서 cover gas 온도와 동일해지는 것으로 계산된다.

5. 결 론

소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드 개발을 위한 해석모형은 복잡한 소듐-물 반응 현상을 단순화하기 위해서 증기발생기 내부의 전열관 다발에서 누출되는 물과 shell측 소듐과의 반응에 의해 생성되는 수소가 모두 증기발생기 상부의 cover gas 영역으로 유입되는 것으로 가정하여 반응에 의한 계통의 압력 증가를 cover gas의 압력 증가로 계산할 수 있도록 설정하고, 이러한 단순 해석모형을 이용하여 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드인 SELPSTA 코드를 개발하였다. 본 분석에서는 기 수행된 연구인 SPIKE 코드를 이용한 소듐-물 반응사고 초반기 해석 결과를 SELPSTA 코드의 초기조건으로 사용하여 KALIMER 중간열전달계통의 SWR 중/후반기 계통 거동 분석을 수행하여, 증기발생기 내부의 cover gas 압력, 소듐 배출 탱크로의 소듐 배출 유량, 증기발생기 내부 소듐 액위 및 rupture disk 파열시간, 물 누출 종료 시간, 그리고 사고가 종료되는 시점 등을 계산하였다. 이를 통해 SELPSTA 코드는 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석을 위한 충분한 기능성을 가지고 있음을 확인할 수 있었으며, 본 연구에서는 향후 SELPSTA 코드의 해석모형에 사용한 가정 및 코드 입력자료로 사용되는 계통 설계자료의 보완을 통해 신뢰성 있는 KALIMER 중간열전달계통의 소듐-물 반응사고 중/후반기 분석을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M.Hori, "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors", Atomic Energy Review pp.707~778, 1980
2. 어재혁 외, "액체금속로 소듐-물 반응사고 후반기 계통거동 해석 모형 평가", 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회, May, 2001
3. 위명환, "System Description for Steam Generation System", 한국원자력연구소, KALIMER 팀 내부문서, LMR/FS400-DD-01 Rev.4/02, 2002
4. Nahvandi, A. N. and Rashevsky, M., "Computer Program for Critical Flow Discharge of Two Phase Steam-Water Mixtures", CVNA-128, February, 1962
5. 김연식, " KALIMER SWR 초반기 거동 해석 " , 한국원자력연구소, KAERI/TR-1918/2001

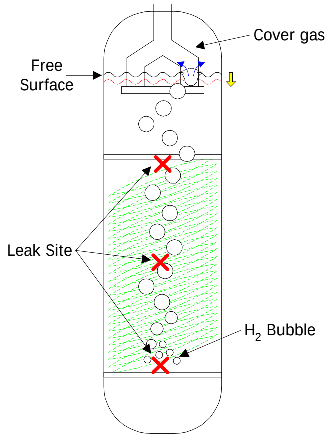

그림 1. SWR 중/후반기 단순 해석모형

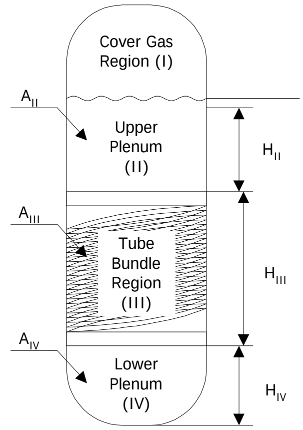

그림 2. 증기발생기 유동 영역 설정

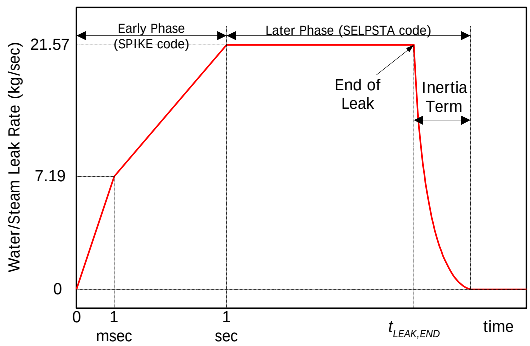

그림 3. 물/증기 누출량 변화

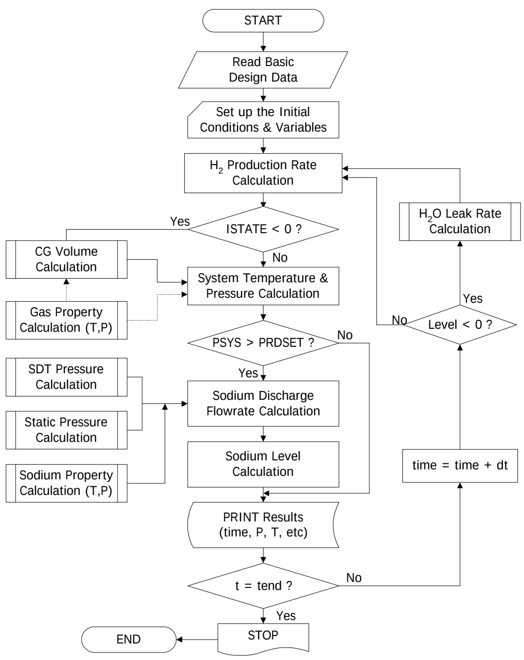

그림 4. SELPSTA 코드 계산 흐름도(Flow Chart)

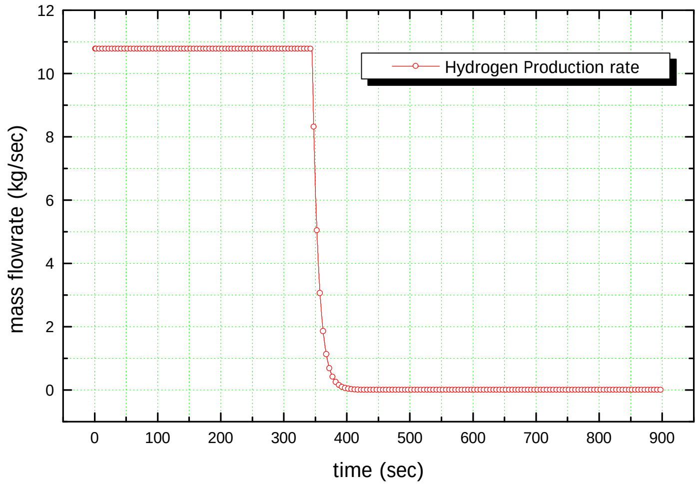

그림 5. SWR 과도기 수소 생성량

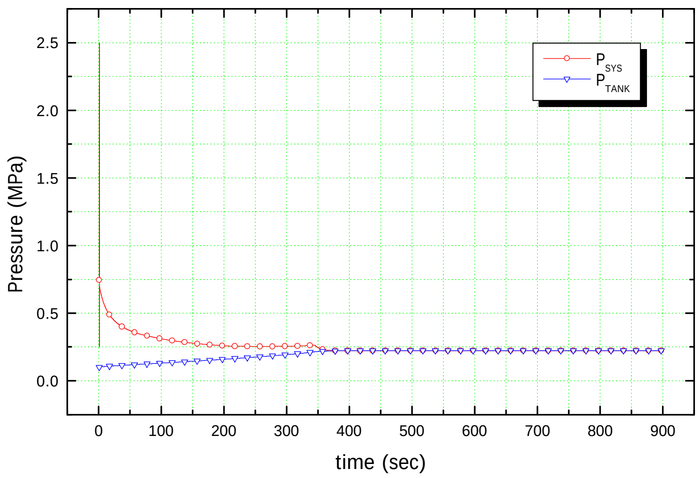

그림 6. 계통 압력 변화 (~15분)

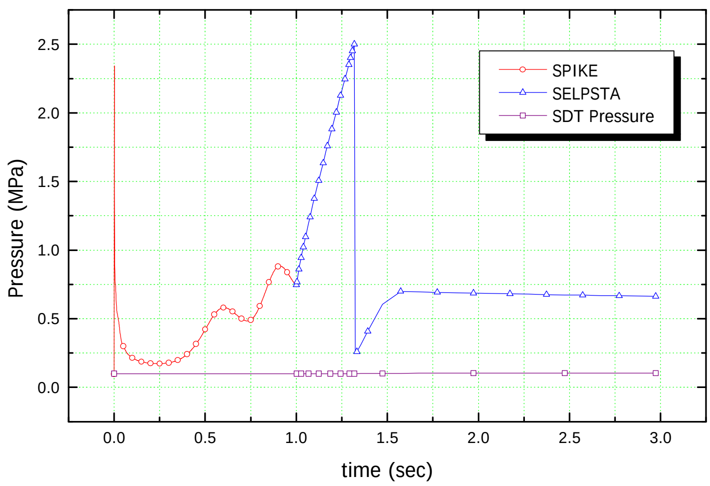

그림 7. 계통 압력 변화 (~3초)

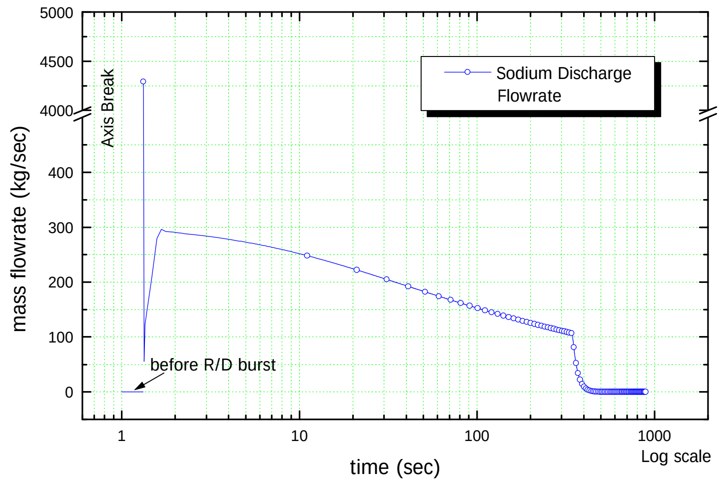

그림 8. 소듐 배출 유량

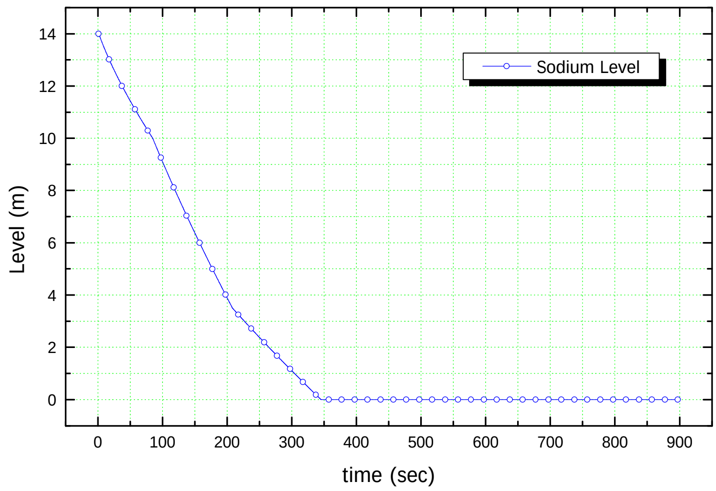

그림 9. 증기발생기 내부 소듐 액위

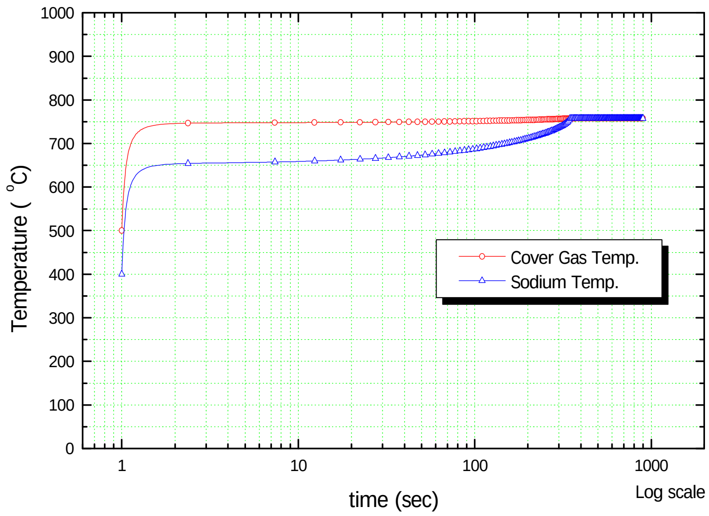

그림 10. 계통 온도변화 (15분)