2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 소듐-물 반응사고 해석코드 전열관 물/증기 누출모형 개발

Development of Tube Leak Model for Analysis Code of SWR in LMR

어재혁, 김의광, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

한국형 액체금속로 KALIMER의 소듐-물 반응사고 중/후기 계통해석을 위해 개발된 전산코드, SELPSTA의 전열관 물/증기 누출 입력모형을 개발하여 반응요인 격리시점 및 계통압력거동 해석 능력을 개선하고, 기존의 보수적 전열관 누출모형과의 비교를 통해 각 모형의 특성 및 적용대상 범위를 설정하였다. 전열관의 물/증기 누출과 관련된 보수적 모형(conservative model)은 압력개방판(rupture disk) 파열 이후의 shell측 소듐 격리만을 고려하여 과도하게 보수적인 계통압력 및 사고완화 경향을 예측하였으나, 급수측 반응요인 차단모형(reactant isolation model)은 증기발생계통의 운전과 관련하여 급수측 격리를 고려함으로써 보다 현실성 있는 계통 해석이 가능함을 확인하였다. 따라서, 반응요인 차단모형은 계통의 사고 대처설비가 정상적으로 작동하는 경우의 SWR 해석에 활용될 수 있으며, 보수적모형은 급수측 격리 실패시의 shell측 소듐 격리에 의해서만 반응이 종료되는 경우에 적용 가능한 것으로 분석되었다.

Abstract

The reactant isolation model related to the steam injection for the SELPSTA code, which has been developed to analyze the later phase of a SWR event in KALIMER steam generator, is newly developed. The reactant isolation model can be applied to the improvement of the capability for analyzing the termination time of SWR and system pressure transient, and to evaluate the characteristics of the steam injection effect, the comparison with the conservative model is also carried out. Since the major assumption of the conservative model is that a constant and continuous steam injection is maintained until the shell side sodium drain is completed, SELPSTA predicts the higher trend of system pressure than the real phenomena with steam side isolation. On the other hand, the reactant isolation model makes use of the feed water isolation with the operation of steam dump system, therefore, it is expected that more practical approach is available to analyze the ending time of reaction and the pressure behavior. Based on the investigation results of this study, each steam injection model is available to the situation determined by the operational status of feed water isolation system, selectively.

1. 서 론

고온의 액체소듐을 전열매체로 하여 2차측의 급수를 가열하는 KALIMER 증기발생기는 고온/고압의 급수측 물/증기가 전열관을 사이로 두고 상대적으로 저압인 shell측 액체소듐과 열교환을 하고 있으므로, 전열관(tube)의 결함이 발생하면 소듐과 물의 직접 접촉에 의한 발열반응으로 인해 많은 양의 수소가 생성되어 계통의 압력을 급격히 상승시키게 된다. 소듐-물 반응사고는 초기에 급격한 압력파 발생 및 전달 현상인 압력전파단계(wave propagation phase)에서 중/후반기에는 반응 생성물 및 반응열의 계통내 유입량 증가로 인한 압력증가 현상인 질량유입단계(mass transfer phase)로 전환된다. 특히, 중/후반기 해석은 압력전파(wave propagation)를 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. 본 연구에서는 소듐-물 반응사고 중/후기 계통 해석용으로 개발된 전산코드, SELPSTA (Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient Analyzer)의 전열관 물/증기 누출 입력모형을 개선하여 반응요인 격리시점 및 계통 압력거동 해석 능력을 개선하고, 기존의 보수적 전열관 누출모형과의 비교를 통해 각 모형의 특성 및 적용대상 범위를 설정함으로써 계통 해석을 현실화하였다.

2. 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석

2.1 SELPSTA 코드

소듐-물 반응사고(sodium-water reaction ; SWR) 중/후반기 해석을 위해 개발된 SELPSTA(Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient Analyzer) 코드는 증기발생기 shell측 소듐에 대하여 비압축성(incompressible), 1차원 비정상 점성유동(one-dimensional unsteady viscous flow)을 적용하였으며, 증기발생기 상부의 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/증기측과 shell측 소듐이 격리되어 반응이 종료되는 사고 종료시점 계산기능을 포함하며, 반응 초기의 압력전파단계(wave propagation stage) 계산을 위해 기 개발된 SPIKE 코드[1]의 계산 결과를 계산 초기조건으로 활용함으로써 반응 초기 및 중/후기의 일관된 계통해석이 가능하도록 개발되었다[2].

2.2 전열관 누출모형

소듐-물 반응사고 발생시 생성되는 수소량은 전적으로 증기발생기 내부 전열관으로부터 shell측 소듐으로의 물/증기 누출량에 의존한다. 소듐-물 반응에 의한 계통과도 현상은 전열관 파손에 의해 물/증기가 증기발생기 shell측 소듐으로 유입되어 소듐측 계통과도를 유발시키는 현상으로 파손 부위를 통해 누출되는 물/증기는 포화상태의 이상유동으로 존재하며, 일반적으로 시간에 따른 누출유량 모사를 위해 그림 1과 같은 세가지 물/증기 누출모

형이 사용된다[3]. 그림 1(a)의 보수적 모형(Conservative model)은 파손 부위를 통해 소듐으로 유입되는 물/증기의 양이 파손과 동시에 순간적으로 Choked flow가 된다는 가정 하에 실제보다 많은 물/증기 누출을 예상하는 매우 보수적인 모델이다. 그림 1(b)의 Shuttering Model은 전열관 파손과 동시에 일정한 속도로 물이 누출되고 반응에 의한 압력 확장파가 반사되어 단계적으로 증가하는 모델이다. 그림 1(c)의 Inertia controlled model은 전열관의 미세누출로부터 양단파단(double ended guillotine break)에 의한 대규모 누출로 발전하는 현상을 모사하는 것으로, 파손 부위를 통한 물누출율이 계속 증가하다가 임계속도에 도달하면 일정한 양의 물/증기 누출이 유지되는 모델이다. 본 분석에서는 이와 같은 일반적인 전열관 누출모형을 토대로 KALIMER 증기발생계통의 특성에 맞는 전열관 누출모형을 설정하였다.

2.2.1 SWR 초기 전열관 누출모형

소듐-물 반응시 전열관으로부터 shell측 소듐으로의 물/증기 누출은 고압의 전열관측 증기와 상대적으로 저압으로 유지되는 증기발생기 shell측 소듐 간의 큰 압력차로 인해 임계유량으로 가정할 수 있다. 일반적으로 누출이 발생하는 두 부분의 압력비가 다음 식 (1)과 같은 임계압력비(critical pressure ratio) 이상이 되면 임계유량으로 취급한다[4].

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{critical} = \left(\frac{2}{g+1}\right)^{\frac{g}{g-1}} \tag{1}$$

식에서, P_1과 P_2는 각각 고압의 전열관측과 상대적으로 저압인 증기발생기 shell측을 의미하며, g 는 과열증기(superheated steam)의 경우에는 1.3, 포화증기(saturated steam)인 경우에는 1.135의 값을 갖는다[4]. 따라서, 과열증기 싸이클(superheated steam cycle)을 사용하는 KALIMER 증기발생계통의 경우에는 g 가 1.3이 되므로, 임계압력비(critical pressure ratio)는 약 0.546이 된다. 즉, 전열관측 압력이 증기발생기 shell측 압력의 약 2배 이상이 되는 경우에는 임계유량(critical flow)이 발생한다고 볼 수 있으며, 기 수행연구[2]를 참고하면 전열관측 압력과 증기발생기 shell측 압력은 최소한 10배 이상으로 유지되므로, 소듐-물 반응사고 발생시의 누출되는 증기의 양은 식 (2)와 같은 증기의 임계유량 상관식(critical flow correlation)을 통해 계산할 수 있다[5].

$$\dot{m}_{leak} = \frac{0.53\times P_{tube}\cdot 2\times A_{tube}}{1.62708\times(h_g - 430.195)} \tag{2}$$

식에서, P_{tube}, A_{tube}는 각각 전열관측 증기의 포화 압력과 전열관의 파단 단면적을 의미하며, h_g는 해당 조건에서의 증기의 엔탈피(enthalpy)이다. KALIMER 소듐-물 반응사고 발생시의 초기 압력파전파단계(wave propagation stage)의 해석은 기 개발된 SPIKE 코드[1]를

이용하여 수행하며, SPIKE 코드에서는 그림 1(a)의 보수적 모형(conservative model)을 적용한 물/증기 누출모형을 사용하고 있다. 반응 초기의 물/증기 누출은 반응과 거의 동시인 1msec에 1개의 전열관이 순간적으로 양단파단(double ended guillotine break)되는 것으로 설정되었으며, 이는 소듐-물 반응사고 계통 해석에서 사용되는 대규모 물누출을 모사하기 위한 일반적인 접근방법이므로 충분한 타당성을 지닌다. KALIMER 증기발생기 전열관측 운전조건은 증기온도 483.2°C, 압력 15.5MPa이며[6] 이 조건에서 choking flow가 발생하므로, 이를 식 (2)에 대입하면 1개의 전열관 양단파단(double ended guillotine break) 경우의 물/증기의 임계유량은 7.19kg/sec 가 된다. 즉, 그림 2와 같이 초기 "0"누출상태에서 반응 시작과 동시에 1msec에 누출량이 7.19 kg/sec가 되고, KALIMER 소듐-물 반응사고의 설계기준 사고로 설정되어 있는 전열관 3개 동시 양단파열(3-double ended guillotine break ; 3DEGB) 모사를 위해 반응 후 1초부터는 21.57kg/sec의 누출량으로 확장되는 비례 개념의 누출량 변화가 되도록 입력수치를 설정하였다[1].

2.2.2 SWR 중/후반기 전열관 누출모형

소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석용 SELPSTA 코드는 초반기 압력전파단계(wave propagation stage) 해석용 SPIKE 코드와 병행하여 사용할 수 있도록 개발되었으며, 전열관 누출량이 설계기준사고(Design Base Event)에 도달하는 반응 시작후 1초 경과시점부터 계산을 시작한다. 따라서, SELPSTA 코드 계산의 초기조건은 SPIKE 코드에서 사용되는 반응시작 후 1초 경과시점에서의 전열관측 물/증기 누출량 및 계통의 압력이며, 이를 토대로 전열관측 급수격리(feed water isolation) 및 질소기체 주입에 의한 전열관측 반응요인 격리를 고려하여 계산을 수행한다. 급수측 반응요인 격리는 그림 3의 증기발생계통 개략도를 통해 알 수 있다. 즉, 전열관 누출에 의한 소듐-물 반응이 감지되면 급수 차단밸브(feed water isolation valve)가 닫혀 전열관으로의 급수공급을 차단시키고 급수 방출밸브(water dump valve)를 개방하여 전열관 내부의 물/증기를 급수배출탱크(water dump tank)로 방출하며, 증기 출구측에 위치한 질소저장탱크(nitrogen storage tank)로부터 전열관 내부로 질소기체를 주입하여 전열관 내부의 수분을 모두 제거함으로써 전열관측 반응요인을 완전히 제거하도록 설계되어 있다[6].

급수측 격리시간(isolation time)은 반응 감지 후 30초이며, 급수격리 밸브 차단 이후 약 60초 경과 후에 질소기체의 주입에 의해 전열관 내부가 완전히 건조되는 것으로 기술되어 있다[6]. 따라서, 소듐-물 반응사고 중/후기 전열관 누출 시나리오는 반응 시작후 1초 경과시점부터 3-DEGB에 해당하는 21.57kg/sec로 유지되는 초기 누출량이 30초경과 시점부터는 급수측 격리에 의해 서서히 감소하기 시작하고, 이 후 전열관 내부로의 질소기체 주입에 의해 급수측 반응요인이 완전히 제거되는 약 90초 경부터는 더 이상의 물/증기 누출이 발생하지 않는 것으로 설정하였다. 본 분석에서는 이와 같은 급수측 격리 시나리오에 근거하여 전열관 누출모형을 시간의 함수로 설정하였다. 즉, 식 (2)에서와 같이 전열관의 물/증기

누출은 전열관 내부압력의 함수로 주어지므로, 급수밸브 차단 이후의 전열관측 압력은 정상운전중의 15.5MPa에서 전열관 내부의 질소기체 주입시의 압력인 2MPa까지 시간에 대하여 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다. 실제로 급수측의 격리 밸브가 닫히는 시간 동안은 전열관 내부의 증기 온도와 압력이 변할 것으로 예상되지만, 해석의 단순화 및 보수성을 위해 전열관측 증기의 온도는 정상운전중의 온도와 압력으로 일정한 것으로 설정하고, 급수측 격리밸브 차단 시점 이후부터는 전열관 내부에 존재하는 물/증기가 증기발생기 shell측으로 방출되면서 전열관 내부의 압력만이 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다. 따라서 전열관측 압력의 시간에 대한 변화는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 이와 같이 설정된 압력 변화를 식 (1)에 대입하면, 물/증기 누출량 변화는 식 (4)와 같이 설정할 수 있다.

$$P_{tube} = P_2 - \frac{(P_1 - P_2)}{(t_{dry} - t_{isolation})} \cdot (t - t_{dry}) \quad [MPa] \tag{3}$$

$$\dot{m}_{leak}^{1DEGB} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{(2 \cdot A_{tube})}{(h_g - C_3)} \cdot \left\{ P_2 - \frac{(P_1 - P_2)}{(t_{dry} - t_{isolation})} \cdot (t - t_{dry}) \right\} \tag{4}$$

식 (3)에서, P_{tube} 는 전열관측 압력이며, P_1과 P_2는 각각 정상운전중의 전열관측 증기압력과 질소기체 주입시의 전열관측 질소기체 압력을 의미한다. 또한, $t_{isolation}$ 과 t_{dry} 는 각각 급수측 격리밸브 차단 시간과 질소기체 주입으로 인해 전열관측 반응요인이 완전히 제거되는 시간이다. 식 (4)에서, $\dot{m}_{leak}^{1DEGB}$ 는 1개의 전열관이 양단 파단되는 경우의 물/증기 누출량이며, 상수 C_1, C_2 및 C_3는 식 (2)의 값과 동일하다. 또한, 전열관 내부의 수분이 모두 제거되는 시간인, t_{dry} 이후부터는 물/증기의 누출이 0이 된다. 따라서, 소듐-물 반응사고 발생시의 초기 압력전파단계(wave propagation stage) 이후, 중/후반기 전열관 누출량 변화는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{leak} = \begin{cases} N_{DEGB} \times \dot{m}_{leak}^{1DEGB}, & (for \quad t_o \le t < t_{dry}) \\ 0, & (for \ t \ge t_{dry}) \end{cases} \tag{5}$$

식에서, N_{DEGB} 는 KALIMER 설계기준사고(Design Basis Event)인 3개의 전열관이 양단 파단되는 경우를 고려하기 위한 것으로 $N_{DEGB} = 3$ 이며, KALIMER 증기발생기 전열관의 물/증기 누출과 관련된 설계인자를 표 1에 정리하여 제시하였다.

이와 같은 관계를 통해 소듐-물 반응사고 발생시의 과도기 전열관측 압력변화 및 이에 따른 전열관 물/증기 누출률을 시간에 대하여 도시하면 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 전열관측

압력변화를 도시한 그림으로 SELPSTA 코드 계산시작 시간(t_o) 이전에는 전열관측 압력이 정상운전중 압력인 15.5MPa로 일정하며, 시간 t_o와 급수측 차단밸브가 완전히 닫히는 시간($t_{isolation}$)까지도 전열관측 증기 압력이 15.5MPa로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 실제로 급수측 차단 밸브가 닫히기 시작하면 밸브의 개도에 따라 그림 4(a)의 점선과 같이 증기압력의 변화가 나타날 것으로 예상되지만, 앞서 기술한 바와 같이 계산의 단순화 및 보수성을 위해서 그림 4(a)의 실선과 같이 $t_{isolation}$까지는 압력이 일정한 것으로 설정하였다. 또한, $t_{isolation}$부터 t_{dry}까지는 정상운전 압력인 15.5MPa에서 전열관측 반응요인 제거를 위해 주입하는 질소기체 압력인 2MPa[6]까지 선형적으로 감소하는 구간을 모사하고, 이후부터는 주입된 질소기체 압력으로 일정하게 유지되도록 설정하였다. 전열관측 증기 압력변화에 의해 계산되는 과도기 물/증기 누출률 변화는 그림 4(c)의 반응요인 차단모형(reactant isolation model)과 같으며, 기존의 대략적인 물/증기 누출모형과의 비교를 위해 동일 시간대에 대한 보수적 모형(conservative model)을 그림 4(b)에 비교하여 도시하였다. 그림 4(b)의 보수적 모형은 급수측 반응요인 격리와 상관 없이 증기발생기 shell측 소듐의 방출로 인한 소듐측 반응요인 격리시점($t_{leak,end}$)까지 전열관의 물/증기 누출이 계속되는 것으로 설정하는 반면, 반응요인 차단모형은 그림에서 4(c)와 같이 초기 3DEGB에 해당하는 물/증기 누출률이 급수가 완전히 차단되는 시간($t_{isolation}$)까지 지속되고, 이후부터는 전열관측 압력감소에 비례하여 전열관 내부에 남아 있는 물/증기의 누출량이 선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 전열관 누출량의 선형감소는 전열관 내부로 질소기체를 주입하여 전열관측 반응요인을 완전 차단하는 시간(t_{dry})까지 계속되고, t_{dry} 이후부터는 반응요인이 완전히 제거되어 누출량은 0이 된다. 이와 같이 소듐-물 반응시의 반응요인 중 하나인 전열관측 급수차단 시나리오를 고려하여 설정한 전열관 누출모형은 그림 4(b)와 같은 기존의 보수적 모형과 비교하여 수소 발생량을 상당히 현실화할 수 있을 것으로 예상되며, 그림 4(b)의 보수적모형(conservative model)은 급수차단 실패 등과 같은 계통 오작동시 지속적인 반응이 일어나는 경우에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

2.2.3 SWR 중/후반기 수소 생성모형

소듐-물 반응사고 발생시의 수소 생성량은 전적으로 전열관측 물/증기 누출량에 의존하며, 반응에 의해 발생하는 수소의 양은 물에서 수소로의 전환비(conversion ratio)에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다[3]. 다양한 연구 결과를 통해 물에서 수소로 전환되는 몰(mole)단위 양은 최대 전환비, 0.7을 가지며 수소기체의 온도는 약 1300K에서 최대 1660K로 제시되어 있다[3]. 따라서, 이와 같은 관계를 통해 수소의 생성량은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{PRH} = \begin{cases} C_{ratio} \cdot \dot{m}_{leak} & (for \quad t < t_{leak,end}) \\ C_{ratio} \cdot \dot{m}_{leak} \cdot \exp[-g \cdot (t - t_{leak,end})] & (for \quad t \geq t_{leak,end}) \end{cases} \tag{6}$$

식에서, $\dot{m}_{PRH}$ 는 소듐과 물의 화학 반응에 의해 생성된 수소 생성량이며, C_{ratio} 는 물에서 수소로의 질량 단위 전환상수(steam to hydrogen mass conversion factor)를 의미한다. 또한, $\dot{m}_{leak}^{o}$ 는 앞서 계산된 전열관측 물/증기 누출유량이며, 반응요인이 제거되는 시점에서는 수소생성량의 급작 중단으로 인한 계산의 불안정성 방지를 위해 관성항(inertia term)을 고려하여 지수감소(exponential decrease)하는 경향을 모사할 수 있도록 모형화 하였다. 여기서, g 는 지수적으로 감소하는 정도를 정량적으로 입력하기 위한 상수로 반응요인 제거 이후의 수소생성량 감소는 관성상수(inertia constant), g 에 의해 그 기울기가 결정된다. 이때의 수소생성량은 반응요인의 격리로 인해 더 이상의 반응이 일어나지 않는 상태이므로 지수감소에 의해 매우 작은 값이 된다. 따라서, 관성항(inertia term)이 계산결과에는 큰 영향을 미치지 않으나, 물리적으로는 미반응의 물/증기가 소듐과 반응할 수도 있으므로 적절한 설정으로 볼 수 있다.

3. 전열관 누출 입력모형 비교

본 절에서는 앞서 설정된 전열관의 물/증기 누출모형을 SELPSTA 코드의 입력으로 사용하여 입력인자 변화에 의한 계통거동 변화를 분석하였다. SELPSTA 코드의 계산 option인 “ileak”를 통해 앞서 제시한 각각의 입력 모형을 선택할 수 있으며, “ileak=1”은 그림 4(b)의 보수적 모형, “ileak=2”는 그림 4(c)의 반응요인 차단모형(reactant isolation model), 그리고 “ileak=3”은 반응요인의 차단과 관계 없이 물누출이 계속되는 모형이다. 본 분석에서는 기 수행된 연구[2]에서 사용된 보수적 모형(conservative model)과 본 연구에서 개발한 반응요인 차단모형(reactant isolation model)을 입력으로 하여 KALIMER 소듐-물 반응사고 중/후기 계통거동 특성을 비교, 분석하였다.

3.1 SELPSTA 코드 계산 초기조건 설정

소듐-물 반응사고 중/후기 계통 해석을 위한 SELPSTA 코드 계산은 반응 초기의 압력전파단계(wave propagation stage) 해석용 SPIKE 코드와 연계가 가능하도록 초기 1초까지는 SPIKE 코드의 결과를 활용하였다[1]. 그림 5는 SPIKE 코드를 이용하여 소듐-물 반응사고 초기 압력파 전파단계의 정상상태를 계산한 결과로, 전열관측 물 누출이 “0”인 상태임에도 불구하고 비평형 초기상태에서는 수직 위치 차이로 인한 압력 요동이 매우 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 소듐-물 반응사고 해석을 시작하기 전에 계통 내에 이와 같은 초기 압력요동이 존재하는 경우에는 계산의 초기조건 설정에 불안정성이 내포되므로, 이러한 교란을 제거하여 일정한 초기상태를 확립할 필요가 있다. 따라서, 초기 30초간의 정상상태 계산을 통해 얻은 결과를 SPIKE 코드 과도계산을 위한 초기조건으로 설정하고 이를 토대로 과도 해석을 수행하였다.

그림 6은 정상상태 계산 결과를 저장한 restart file을 사용하여 수행한 SPIKE 코드 계산결

과로, 반응초기 1초까지의 cover gas 영역과 압력개방판(rupture disk) pipe의 압력변화를 도시한 그림이다. 본 분석의 목적이 초기 압력전파 단계에서의 결과를 이용하여 중/후기 계통 해석을 위해 개발한 SELPSTA 코드의 초기조건을 설정하기 위한 것이므로, SELPSTA 코드의 계산 시작 시간인 1초까지의 계산만을 수행하였다. 또한, 본 분석에서 선택한 cover gas 영역과 압력개방판(rupture disk) pipe는 각각 증기발생기 최상단과 최하단에 위치하고 있으므로 bulk motion을 나타내는 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통거동 특성을 고려할 때 증기발생기 내부의 전체적인 압력 거동을 분석하기에 적절할 것으로 판단된다. 그림에서와 같이 Cover gas 영역과 압력개방판(rupture disk) pipe에서의 압력은 반응 초기 급격한 spike 압력에 의해 심하게 요동을 하며, 이 후 질량유입효과(mass transfer effect)가 나타나는 0.3초경 부터는 서서히 증감을 반복하고 있음을 볼 수 있다. 이 경우, Cover gas의 압력과 압력개방판(rupture disk) pipe의 압력은 증감이 상호 반대되는 특성을 나타내므로, bulk motion을 보이는 중/후반기 계통거동의 특성을 고려하여 평균 값을 SELPSTA 코드의 입력으로 사용하였다. SELPSTA 코드의 입력으로 사용되는 SPIKE 코드 계산결과 및 계통 설계인자는 표 2와 같다.

3.2 SELPSTA 코드 전열관 누출모형 민감도 분석

SELPSTA 코드의 전열관 누출 입력모형은 앞서 언급한 바와 같이 “ileak=1”과 “ileak=2”로 선택하여 입력할 수 있으므로, 보수적 모형(conservative model)과 반응요인 차단모형(reactant isolation model)을 사용하여 계산한 수소생성량 변화를 그림 7에 비교하여 도시하였다. 그림에서와 같이 보수적 모형(conservative model)에서는 압력개방판 파열 이후에 증기발생기 내부 소듐이 모두 방출되는 소듐측 반응요인 제거에 의해 수소 발생이 중단되지만, 급수측 반응요인 차단모형(reactant isolation model)을 사용하는 경우에는 소듐 액위 감소와 관계없이 소듐 방출보다 빠른 시간대에 이루어지는 급수측 반응요인 차단에 의해 수소 생성이 중단됨을 볼 수 있다. 또한, 반응요인 차단모형(reactant isolation model)에서는 급수측 격리시점($t_{isolation}$)부터 질소기체 주입에 의한 전열관 내부 수분제거시점(t_{dry})까지 전열관측 압력의 선형 감소에 의해 수소 발생량 역시 서서히 감소하고 있으나, 기존의 보수적 모형(conservative model)에서는 이러한 전열관 누출감소와 상관 없이 일정한 전열관 누출을 가정하고 있으므로, 반응요인 차단모형(reactant isolation model)에 비해 매우 보수적인 수소발생을 예측하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 두가지 누출모형에 대한 계통 압력변화를 비교한 그림으로, 초기 30초까지는 수소 생성량이 두가지 입력모형에서 동일하므로 압력변화 역시 동일하게 나타나지만, 30초 이후부터는 보수적 모형(conservative model)이 계통압력 변화를 과도하게 예측하고 있으며, 특히 급수측 반응요인이 완전히 제거되는 90초 이후부터는 두 입력모형 간의 압력차가 비교적 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한, 기존의 보수적 모형(conservative model)에서는 증기발생기 내부 소듐이 모두 방출되면 전열관 누출이 급격히 감소하도록 모형화 되어 있으므로 압력의 급격변동으로 인해 불연속점이 발생할 가능성이 높은 반면, 전열관 누출량을 비교적 현실적으로 설정한 반응요인 차

단모형(reactant isolation model)의 경우에는 압력의 불연속점 없이 비교적 부드러운 압력 변화 경향을 나타내고 있으므로, 이 모형이 계산의 안정성에서 우수한 것으로 판단할 수 있다. 그림 9와 그림 10은 각각 압력개방판(rupture disk) 파열 이후 소듐배출탱크로 방출되는 소듐 유량과 증기발생기 내부 소듐의 자유표면 액위 변화를 비교한 그림으로 보수적 모형에서는 동일 시간대에 계통과 소듐 배출탱크 간의 압력차를 크게 계산하므로 소듐 방출유량이 반응요인 차단모형(reactant isolation model)에 비해 높게 계산됨을 볼 수 있다. 또한, 매우 큰 방출유량으로 인해 증기발생기 내부 소듐액위 역시 보수적 모형(conservative model)에서 다소 빠른 감소를 나타냄을 볼 수 있으며, 정량적으로는 약 79초의 차이를 나타내는 것으로 분석되었다. 이상에서 분석한 바와 같이, 기존의 보수적 모형(conservative model)은 급수측 반응요인 차단과 관계 없이 증기발생기 shell측 소듐의 배출로 인한 소듐측 반응요인 차단에 의해서만 반응이 종료되는 것으로 간주함에 따라 상대적으로 긴 시간동안 반응이 지속되므로, 물/증기 누출량 또는 수소 생성량 측면에서 과도한 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 KALIMER 증기발생계통 운전과 관련하여 소듐-물 반응사고 중/후기 계통 해석용 SELPSTA 코드의 전열관 누출 입력모형을 개발하고, 입력 모형별 민감도 분석을 통해 각 모형의 특성을 비교, 분석하였다. 전열관의 물/증기 누출과 관련된 기존의 보수적 모형(conservative model)은 급수측 반응요인 차단을 고려하지 않고 압력개방판(rupture disk) 파열 이후 소듐방출에 의한 증기발생기 shell측 소듐 격리만을 고려함으로써 과도하게 보수적인 계통압력 및 사고완화 경향을 예측하였으나, 본 연구에서 개발한 급수측 반응요인 차단모형(reactant isolation model)은 계통운전과 관련하여 shell측 소듐 격리 시간보다 빠른 시간대에 이루어지는 급수측 격리를 고려함으로써 보다 실질적인 계통 해석을 가능케 함을 알 수 있다. 본 연구를 통해 개발된 반응요인 차단모형(reactant isolation model)은 계통의 사고 대처설비가 정상적으로 작동하는 일반적인 소듐-물 반응사고 해석에 활용될 수 있으며, 기존의 보수적모형(conservative model)은 급수측 반응요인 차단 실패시의 증기발생기 shell측 소듐 격리에 의해서만 사고가 종료되는 경우에 활용이 가능할 것으로 판단된다. 본 분석에서 수행한 SELPSTA 코드의 전열관 누출 입력모형 개선 및 민감도 분석 결과는 향후 소듐-물 반응사고와 관련한 액체금속로 중간열전달계통(IHTS) 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김연식 외, "KALIMER 중간계통의 SWR 초반기 압력파 거동 분석", 한국원자력학회, 2002 춘계학술발표회, 2002
2. 어재혁 외, "KALIMER 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드 개발", 한국원자력학회, 2002 춘계학술발표회, 2002
3. A.K. Rajput, "Pressure Transients Resulting from Sodium-Water Reaction Following a Large Leak in LMFBR Steam Generator", Reactor Research Centre, Kalpakkam, India
4. K.C. COTTON, "Evaluating and Improving Steam Turbine Performance", 2nd ed., Cotton Fact Inc., Rexford New York, 1998
5. Nahvandi, A. N. and Rashvsky, M., "Computer Program for Critical Flow Discharge of Two Phase Steam-Water Mixtures", CVNA-128, 1962
6. D. H. Hahn, et al., "KALIMER Conceptual Design Report", Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002, 2002

표 1. 전열관 누출모형 설정을 위한 설계인자

Parameter	Unit	Value	Description
P_1	MPa	15.5	Steam-side nominal pressure
P_2	MPa	2.0	Tube-side pressure after water/steam clearing
$t_{isolation}$	sec	30	Feed water isolation time
t_{dry}	sec	90	Water/steam dumping time in tube-side
N_{DEGB}	-	3	Number of tube failure (guillotine break)
A_{DEGB}	m^2	-	Leak area of tube ($2\times A_{tube}$)
$\dot{m}_{steam/water}$	kg/sec	-	Total leak rate of water/steam

표 2. SELPSTA 코드 주요 입력인자

Parameters	Unit	Value
System Pressure (IHTS) at normal operation	MPa	0.1
Initial Cover Gas Volume	m^3	9.23
Cover Gas Pressure (at 1sec, SPIKE code)	MPa	0.7831
Sodium Drain Tank Volume	m^3	150
Rupture Disk Breaking Pressure	MPa	1.5

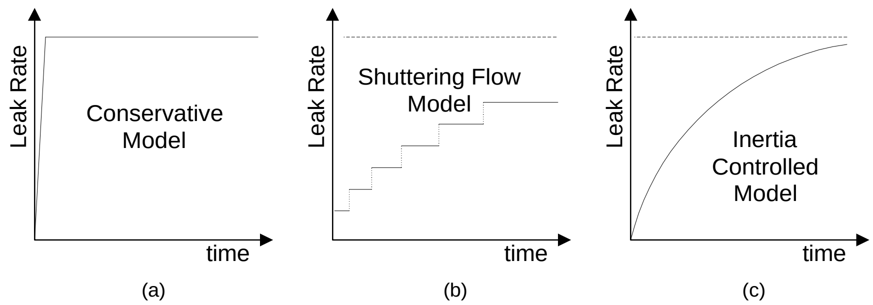

그림 1. 소듐-물 반응사고 발생시의 전열관 누출모형

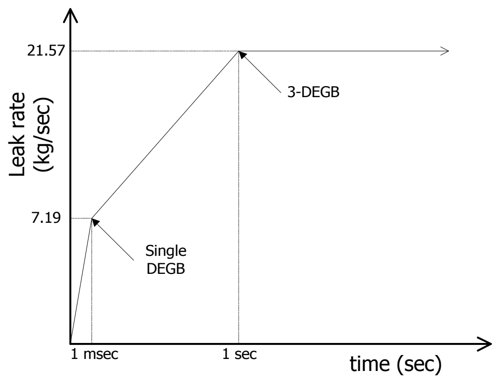

그림 2. SWR 초기 전열관 누출모형

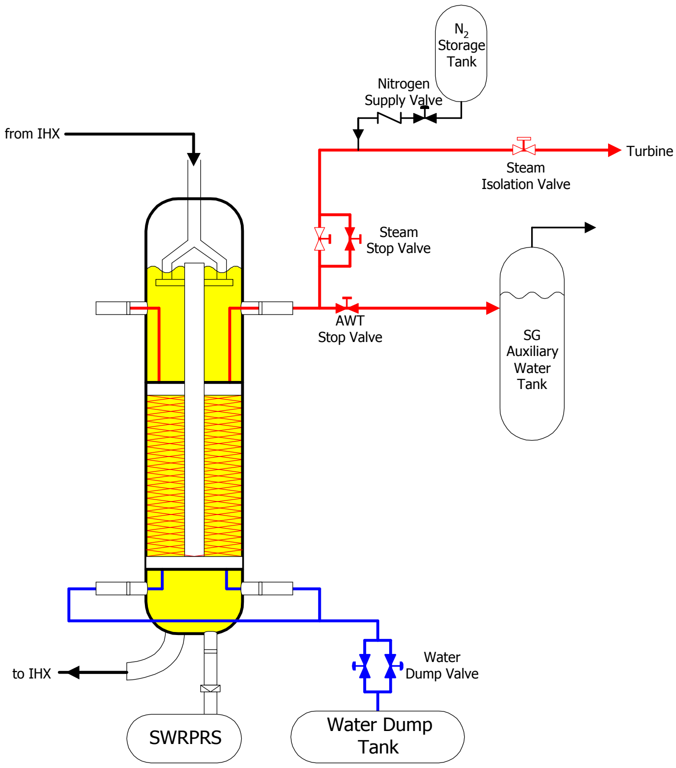

그림 3. 증기발생계통 개략도

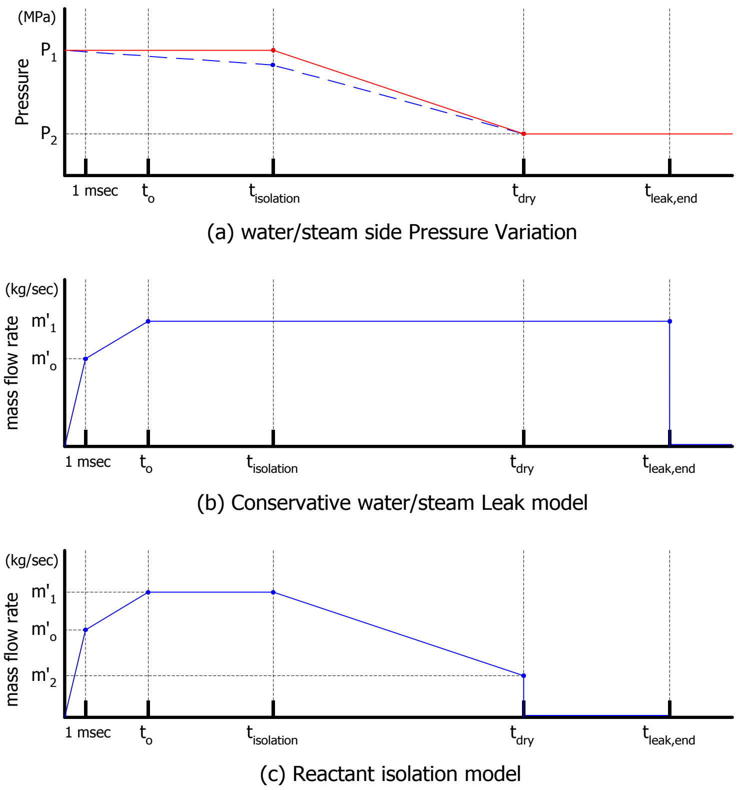

그림 4. 전열관 누출 입력모형 비교

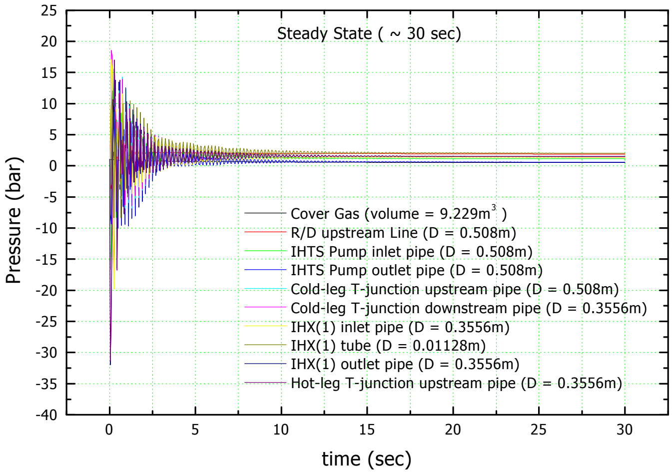

그림 5. SPIKE 코드 정상상태(steady-state) 계산

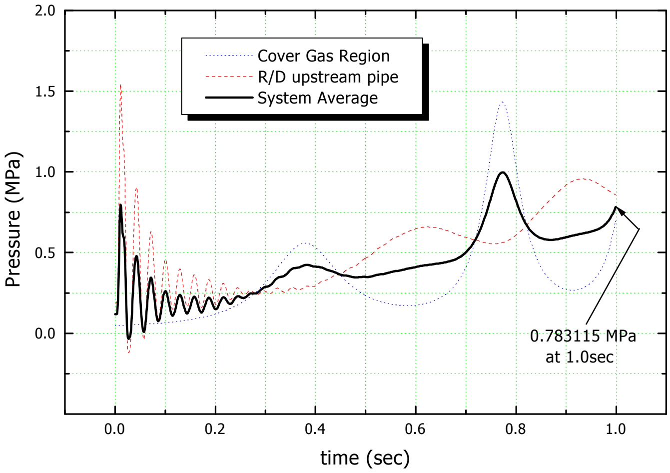

그림 6. 소듐-물 반응사고 초기 압력거동 (~1초)

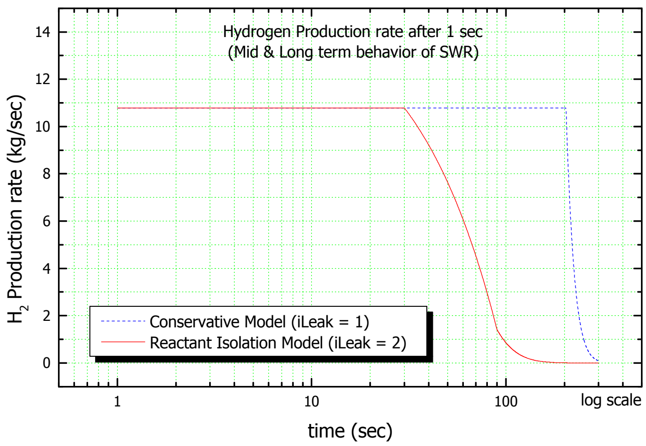

그림 7. 수소 생성모형 비교

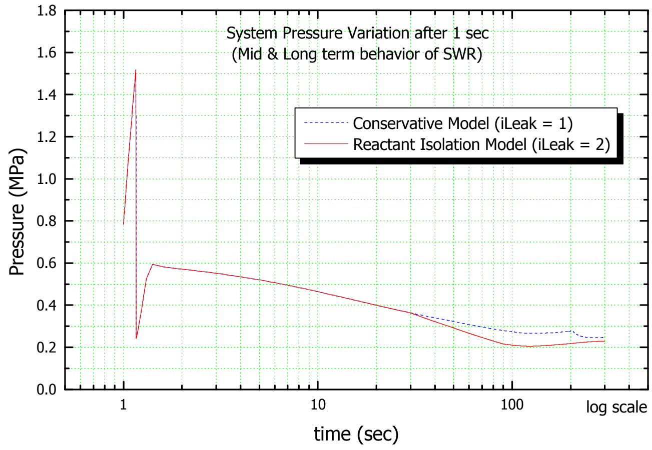

그림 8. 계통압력 변화 비교

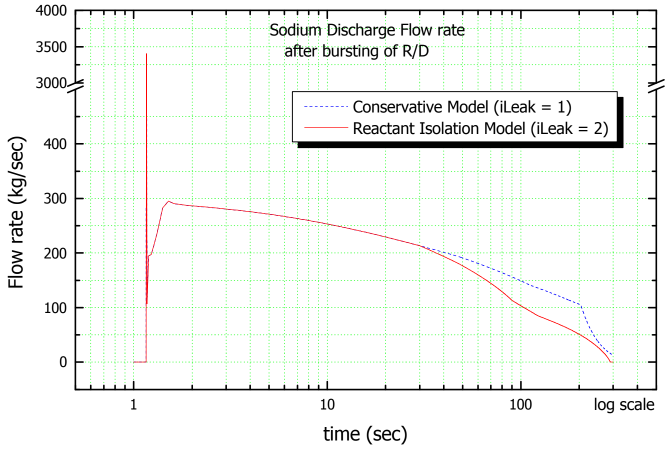

그림 9. 소듐 방출유량 비교

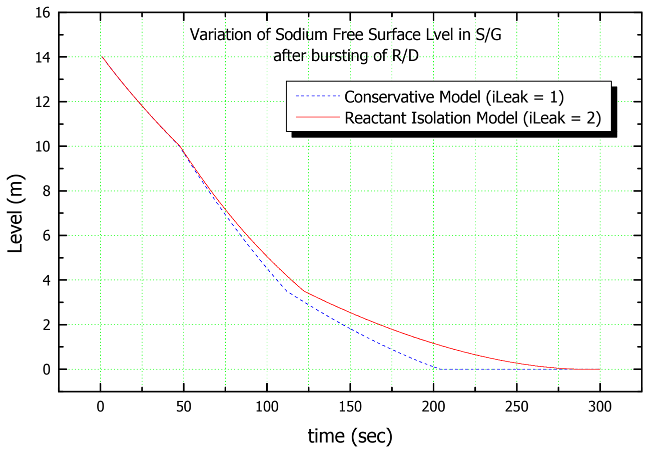

그림 10. 증기발생기 내부 소듐 자유표면 액위변화 비교