2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 소듐-물 반응사고 해석코드의 SDT 해석모형 특성 평가
Assessment of the SDT Model for the Analysis Code of a SWR Event in a LMR

어재혁, 정지영, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로의 소듐-물 반응사고 준정상상태 계통 해석을 위해 개발된 SELPSTA (Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient Analyzer) 코드의 소듐 배출탱크 (sodium dump tank ; SDT) 해석 모형을 개선하고, SDT 내부의 온도 및 압력 거동에 영향을 미치는 탱크 내부 자유기체 공간 체적 및 SDT 저압 파열판 (low-pressure rupture disk) 설계 특성에 대한 민감도 분석을 수행하여 개선된 SDT 해석모형의 물리적 타당성을 검토하였다. SDT 해석모형은 계통 파열판 (rupture disk) 파열시 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 고온 소듐과 탱크 하부의 저온 소듐 풀간의 에너지 혼합 및 탱크 내부의 기체공간 체적 변화 현상을 복합적으로 고려하여 개선하였으며, 이를 통해 기존의 SDT 해석 모형의 현실화가 가능함을 확인하였다. 또한, 개선된 SDT 모형을 적용하여 SDT 내부의 자유기체 공간 체적 변화에 대한 민감도 분석을 수행한 결과, SDT 상부 cover gas 체적이 감소할수록 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 고온 소듐에 의한 에너지 혼합 효과가 보다 지배적으로 나타나면서 탱크 내부가 상대적으로 급격한 온도 및 압력과도를 나타냄을 확인하였다.

Abstract

To investigate the quasi-steady system transient of a sodium-water reaction (SWR) event in KALIMER, the code SELPSTA (Sodium-water reaction Event Later Phase System Transient Analyzer) has been developed. In this study, the sodium dump tank (SDT) model of the code is improved and the physical validity of the improved model is also inspected by performing the sensitivity analyses of the system design parameters associated with the cover gas volume and the low-pressure rupture disk in SDT. The improvement of the SDT model is performed by reflecting the overall effects of the cold pool sodium existing in the bottom space of the tank, and it is confirmed that the model has superiority in the aspect that the sodium mixing effects are well reflected as a function of the mixed sodium temperature and the gas volume variation. Based on the analysis results, the SDT model reasonably predicts the quasi-steady system transients including the pressure relief system, and it is also confirmed that the decrease of the cover gas volume in SDT results in a drastic pressure and temperature transient of the pressure relief system since the energy mixing effects are more dominantly appeared in the cover gas region of SDT.

1. 서 론

한국형 액체금속 원자로인 전기출력 150MWe의 KALIMER-150은 고온의 액체소듐을 냉각재로 사용하여 2차측의 급수를 가열하며, 고온/고압의 급수측 물/증기가 전열관을 사이로 두고 상대적으로 저압인 shell측 액체소듐과 열교환을 수행하므로, 전열관 결함이 발생하면 소듐과 물의 직접 접촉에 의한 급격한 화학반응으로 인해 많은 양의 수소와 열이 생성되어 계통의 압력을 급격히 상승시킨다. 소듐-물 반응사고는 초기에 급격한 압력파 발생 및 전달현상인 압력 전파단계(wave propagation stage)에서 반응 중/후기의 준정상상태에서서는 반응 생성물 및 반응열의 계통내 유입량 증가로 인한 압력증가 현상인 매질이동단계(mass transfer stage)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 연구는 기 수행 연구의 일환으로써 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통해석을 위해 자체 개발된 SELPSTA 코드의 소듐배출탱크 (sodium dump tank ; SDT) 해석모형을 개선하고, 기존의 SDT 단순 해석모형과의 비교를 통해 개선된 해석모형의 계통 압력방출계통 해석 특성을 평가하여 향후 KALIMER-600 소듐-물 반응사고 압력완화계통(SWRPRS) 설계 및 해석을 위한 SELPSTA 코드의 기능상 적용성 향상을 목적으로 한다.

2. KALIMER 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석

2.1 SELPSTA 코드

KALIMER 소듐-물 반응사고 (Sodium-Water Reaction) 중/후반기 계통해석을 위해 자체 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 소듐배출탱크 (sodium dump tank ; SDT) 내부의 비활성 기체는 이상기체(ideal gas)로 가정하여 이상기체 방정식을 적용하였다. 또한, 소듐-물 반응사고 중/후반기 특성을 반영하여 파열판(rupture disk) 파열 이후의 소듐 배출현상 및 물/증기측과 shell측 소듐이 격리되어 반응요인 차단에 의해 소듐-물 반응이 완전히 종료되는 사고 종료시점 계산기능을 포함하며, 반응 초기의 압력전파단계(wave propagation stage) 계산을 위해 기 개발된 SPIKE 코드의 계산결과를 계산 초기조건으로 활용함으로써 반응 초기 및 중/후기의 일관된 계통해석이 가능하도록 개발되었다[1].

2.2 SWR 발생시의 소듐방출 현상

소듐-물 반응사고 발생시 증기발생기를 포함하는 중간열전달계통(IHTS)은 반응영역으로부터 발생하는 다량의 수소기체 및 급격한 반응열 발생에 의해 과압되고, 계통의 압력이 계통 압력개방 설정압력에 도달하면 증기발생기 하단에 설치된 파열판(rupture disk)이 파열되면서 증기발생기 shell측 소듐이 증기발생기 하단과 연결된 SDT 내부로 방출되어 반응요인 차단에 의해 소듐-물 반응사고가 종료된다. 이 때, 증기발생기 shell측 소듐 방출의 주요 구동력은 과압된 계통압력과 SDT 간의 압력차 및 증기발생기 하단과 SDT를 연결하는 배관에서의 압력손실의 함수로 주어진다. 따라서, 소듐-물 반응사고 발생시 반응요인 차단을 위해 증기발생기 shell측 소듐을 SDT로 방출시키기는 SWR시의 압력방출 현상 분석을 위해서는 계통의 에너지 변화와 소듐-배출탱크(SDT)의 기하형상을 반영하는 적절한 SDT 해석모형이 요구된다. 본 연구에서는 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통 해석을 위해 기 개발된 바 있는 SELPSTA 코드의 기존 SDT 단순 해석모형을 보완하여 파열판(rupture disk) 파열 이후의 소듐 배출 현상을 보다 적절히 모사하기 위해 소듐배출탱크 해석모형을 개선하고, 기존 해석모형과의 비교를 통해 개선된 SDT 모형을 적용한 SELPSTA 코드의 계통 압력방출계통 해석 특성을 평가하였다.

2.3 KALIMER-150 소듐배출탱크 (SDT) 기능 및 형상

KALIMER-150 증기발생기 전열관의 대규모 물/증기 누출사고 발생시 증기발생기 shell측으로부터 방출되는 고온 소듐 및 소듐-물 반응 생성물을 수용하는 SDT는 그림 1과 같이 배관을 통해 증기발생기 하단과 연결되며, 증기발생기를 포함하는 중간열전달계통(IHTS) 내부의 소듐을 모두 수용할 수 있을 만큼의 체적이 요구된다. 특히, 증기발생기 shell측 소듐 및 반응에 의해 생성된 수소기체를 포함하는 반응 생성물의 유입에 의해 탱크 내부압력 증가 및 수소기체의 국부적인 농도 증가에 의한 폭발 방지를 위해 그림 1과 같이 SDT와 연결된 수직 배관에 저압 파열판(low-pressure rupture disk)을 설치하고, 탱크 압력증가시 이를 파열시켜 탱크 내부의 압력을 대기로 방출시킨다[2]. 이 때 수소기체와 같은 기체 반응 생성물과 증기발생기 shell측 소듐, 그리고 소듐 slug와 같은 고체 반응 생성물의 효과적인 분리 및 방출을 위해 수직 배관에 반응 생성물 분리기(SWR product separator) 및 수소점화기 (hydrogen flare tip) 등을 설치한다[2][3].

KALIMER-150 설계의 SDT 내부는 계통 파열판(,rupture disk) 파열시 증기발생기 shell측으로부터 급격하게 유입되는 다량의 고온 소듐에 의한 열충격 (thermal shock) 완화를 위해 정상운전 중에도 200°C의 저온 소듐이 탱크 하부에 0.5m 높이로 채워져 있으며, SDT의 총 체적은 150m^3 [4]로 이는 증기발생기 및 중간열전달계통 (IHTS)의 소듐을 충분히 수용할 수 있도록 KALIMER-150 설계자료[2]를 토대로 설정된 값이다. 하지만, 현재 KALIMER-150에 대한 SDT의 구체적인 형상 설계가 수행되어 있지 않은 관계로 PRISM 설계자료[3][4]를 참조하여 수평으로 긴 원통형 구조로 대략적인 형상을 가정하였으며, 향후 3-루프를 사용하는 KALIMER-600 중간열전달계통(IHTS) 설계를 통해 구체적인 형상 및 설계자료가 생산될 예정이다. 따라서, 현재 KALIMER-150 SDT의 대략적인 기하형상 및 크기 자료는 참고문헌 [2]를 참조하여 그림 2와 같이 도시할 수

있다. 그림과 같이 KALIMER-150의 SDT는 수평 원통형 구조이며, PRISM Mod-A 자료(직경: 14ft, 수평길이: 33ft)[3]를 참조하여 직경은 4.5m로 설정하였으며, SDT의 요구체적이 150m^{3}임을 고려하여 길이는 약 9.5m로 설정하였다. 또한, 하부에는 0.5m의 저온 소듐이 채워져 있으며, 탱크 상부에는 cover gas인 Argon 기체 공간이 형성된다. 본 연구에서는 상기 SDT 형상 및 크기자료를 토대로 SELPSTA 코드의 SDT 해석모형을 개선하고 소듐-물 반응사고 발생시의 압력방출계통 과도 특성 분석을 수행하였다.

2.4 SELPSTA 코드 SDT 해석모형 비교

SELPSTA 코드의 기존 SDT 해석모형은 SDT 내부에 기 존재하는 하부 소듐 풀(lower sodium pool)을 무시하고 SDT 전체가 argon 기체로 채워진 빈 탱크로 가정하여 계산을 수행하였다. 이 경우, 소듐과 물간의 급격한 화학 반응열에 의해 증가한 증기발생기 shell측 고온 소듐이 계통 파열판(rupture disk) 파열 이후 SDT 내부로 고온 상태를 그대로 유지하면서 유입되어 탱크 내부의 압력과도를 유발시키는 것으로 가정하므로, 탱크 내부에 존재하는 200^{o}C 저온 소듐에 의한 소듐 및 탱크 내부 기체온도 강하 현상을 모사하기에 적절치 않다. 즉, 기존의 SELPSTA 코드 SDT 내부 온도 및 압력계산은 다음 식 (1) 및 식 (2)와 같이 수식적으로 표현된다.

$$T^{j}_{Na,SDT} = T^{j}_{Na,SG} \tag{1}$$

$$P^{j+1}_{g,SDT} = P^{j}_{g,SDT}\left\{1-\frac{V^{j+1}_{g,SDT}-V^{j}_{g,SDT}}{V^{j}_{g,SDT}}\right\}+\frac{m^{o}_{g,SDT}}{M^{o}_{g,SDT}}\cdot\frac{\overline{R}}{V^{j}_{g,SDT}}\cdot(T^{j+1}_{Na,SG}-T^{j}_{Na,SG}) \tag{2}$$

식에서, 하첨자 SDT, SG, g는 각각 소듐배출탱크, 증기발생기, 그리고 탱크 상단의 기체공간을 의미하며, m, M, $\overline{R}$ 는 각각 질량, 분자량 및 기체상수를 나타낸다. 또한, 상첨자 o는 초기 값을 의미한다. 식 (1)은 SDT 내부로 유입되어 존재하는 소듐 온도가 소듐-물 반응시의 반응열에 의해 가열된 고온의 증기발생기 shell측 소듐 온도와 동일한 것으로 가정함을 의미하며, 이에 따라 식 (2)의 우변의 소듐 온도차 항이 증기발생기 shell측 소듐 온도차이로 반영되었음을 보여주고 있다. 따라서, 탱크 내부의 압력과도를 직접적으로 유발시키는 소듐 온도차를 나타내는 식 (2)의 우변 마지막 항은 증기발생기 shell측 소듐 온도를 반영하는 경우, 초기에 급격한 증가를 나타내게 되며 이후 전열관 물/증기 누출양의 감소로 인해 온도 증가 경향이 감소함에 따라 실제보다 낮은 온도 증가를 계산할 것으로 예상된다. 즉, 기존의 SELPSTA 코드는 증기발생기 상단의 cover gas 영역 및 압력개방판 파열시점 등의 현상 해석에 주 목적을 두고 개발됨에 따라 압력방출계통(SWRPRS)의 하나인 SDT 내부 해석모형은 별도로 고려하지 않고 간략히 처리되었음을 보여주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 보다 현실성 있는 압력방출계통 해석을 수행하고자 식 (1) 및 식 (2)의 SDT 내부의 소듐온도 및 탱크 압력에 대한 해석모형을 개선하고 개선된 해석모형의 해석기능을 평가하였다.

3. SELPSTA 코드 SDT 해석모형 개선

본 절에서는 소듐-물 반응사고 중/후반기 계통해석을 위해 자체 개발된 SELPSTA 코드[1]의 해석 알고리즘(그림 3)을 토대로 기존의 SDT 단순 해석모형을 검토하여 해석모형의 적절한 개선을 수행하였다. 또한, 소듐-물 반응사고 발생시 계통 파열판(rupture disk) 파열 이후 증기발생기 내부로부터 방출되는 고온 소듐이 소듐배출탱크 내부의 열유체적 거동에 미치는 영향을 적절히 반영하기 위한 SDT 해석모형 개선 과정 및 개선된 해석모형을 이용한 KALIMER-150의 소듐-물 반응사고 중/후반기 압력방출계통 특성 분석 결과를 기술하였다. 그림 3은 SELPSTA 코드의 SDT 해석모형 개선을 위한 계산 흐름도상의 해당 계산 루틴을 보여주고 있다.

3.1 소듐배출탱크 (SDT) 하부 소듐 풀 특성 반영

앞서 기술한 바와 같이 계통 파열판(rupture disk) 파열 이후 증기발생기 shell측으로부터의 급격한 고온 소듐 유입시 열충격 완화를 위해 SDT 하부에는 0.5m 깊이로 200°C의 저온 소듐이 채워져 있으며, 이 저온 소듐으로 인해 탱크 내부의 소듐 및 기체 온도가 영향을 받을 수 있으므로, 탱크 내부 저온 풀 소듐의 체적 및 질량 등을 계산하여 계산에 반영시켜야 한다. SDT 내부의 저온 소듐 체적은 그림 2와 같이 수평 원통형 구조의 하부에 형성되며, 구체적인 크기자료는 참고문헌[2][3][4]을 참조하여 그림 4에 도시하였다. 그림 4(a)와 같이 탱크 하부에는 0.5m 깊이로 저온 소듐이 채워져 있으며, 하부 소듐 풀의 체적은 그림 4(b)와 같이 반경 R의 원 방정식으로 표시되는 함수의 면적 적분을 이용하여 계산될 수 있다. 즉, 하부 소듐 풀의 수직 단면적은 식 (3) 및 (4)와 같이 표현된다.

$$S_1 = \int_a^R y \cdot dx = \int_a^R + \sqrt{R^2 - x^2} \cdot dx \tag{3}$$

$$S_2 = \int_a^R - y \cdot dx = \int_a^R - \sqrt{R^2 - x^2} \cdot dx \tag{4}$$

식에서 a 및 R은 각각 초기 저온 소듐 풀 액위 및 탱크의 수직 반경이며, L은 탱크의 수평 길이를 의미한다. 식에서, S_1과 S_2는 소듐배출탱크가 수평으로 설치되어 있는 경우에 동일한 값을 가지며, 식 (3)과 식 (4)의 적분 결과 및 초기 저온 소듐 풀 체적은 각각 식 (5) 및 식 (6)과 같이 표현된다.

$$S^o_{Na,SDT} = S_1 + S_2 = R^2 \left\{ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{a}{R}\right) - \frac{a}{R}\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{a}{R}\right)\right) \right\} \tag{5}$$

$$V^o_{Na,SDT} = S^o_{Na,SDT} \cdot L_{SDT} = R^2 \left\{ \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{a}{R}\right) - \frac{a}{R}\cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{a}{R}\right)\right) \right\} \cdot L_{SDT} \tag{6}$$

식 (6)을 이용하여 계산된 SDT 내부 초기 소듐 체적은 200°C를 기준으로 약 9.2m^3으로 전체 탱크 체적의 약 6%에 해당한다. 따라서, SDT 내부 소듐의 과도 온도변화는

증기발생기 shell측으로부터 유입된 고온 소듐과 탱크 내부의 저온 소듐이 혼합된 탱크 내부 소듐의 평균 밀도를 이용하여 식 (7)과 같이 계산이 가능하다.

$$\bar{\rho}_{Na,SDT}(t) = \frac{V^{o}_{Na,SDT} \cdot \rho^{o}_{Na,SDT} + \left[V^{o}_{Na,SG} + \int \frac{\partial V_{Na,SG}(t)}{\partial t} dt \right] \cdot \rho_{Na}(T_{Na,SG})}{V^{tot}_{Na,SDT}(t)} \tag{7}$$

$$T_{Na,SDT} = f(\bar{\rho}_{Na,SDT}) \tag{8}$$

식에서, $V^{tot}_{Na,SDT}(t)$ 는 SDT 내부의 과도기 소듐 체적으로서, 기 존재하는 200°C 저온소듐의 초기체적과 증기발생기 shell측으로부터 유입된 고온 소듐 누적 체적의 합을 의미하며, SDT 내부의 과도기 소듐 온도는 식 (7)의 계산 결과를 토대로 식 (8)과 같이 역으로 계산된다. 물론 탱크 내부의 소듐 온도는 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 고온 소듐에 의해 탱크내부에서 국부적인 온도구배를 가질 수 있으나, SELPSTA 코드에서 사용하는 SDT 해석모형의 단순화를 위해 다음과 같은 가정을 설정하였다.

- 가정 : 증기발생기로부터 유입되는 고온의 소듐은 SDT 내부에 존재하는 소듐과 순간적으로 완전히 혼합되어 에너지 교환을 통해 체적평균 온도를 나타내는 혼합 소듐을 현성한다.

따라서, 식 (7) 및 식 (8)은 상기 가정에 의해 타당성을 지니며, 이를 토대로 SDT 내부의 과도 압력계산에 직접적인 영향을 미치는 탱크 내부의 기체 체적은 식 (9) 및 식 (10)과 같이 계산이 가능하다.

$$V_{SDT,g}(t) = V^{o}_{SDT,g} - \Delta V_{SDT,Na}(t) \tag{9}$$

$$\Delta V_{SDT,Na}(t) = V^{o}_{SDT,Na} + \int_{t_1}^{t} V^{ex}_{Na,SG}(t) \cdot dt \tag{10}$$

대부분의 경우, 계통 파열판(rupture disk) 파열 이후 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 소듐 체적의 누적량에 의해 식 (10)은 양의 값을 가지므로, 식 (9)는 탱크 내부의 초기 cover gas 공간 체적과 식 (10)의 탱크 내부 소듐의 누적 증가 체적간의 차이로 과도기 탱크 내부 기체공간 체적을 표시할 수 있다. 또한, SDT 내부의 소듐 온도와 탱크 내부 기체공간의 cover gas 온도가 순간적으로 동일해진다는 가정을 사용하여 해석모형을 단순화하였으며, 탱크 상부의 argon cover gas 영역은 이상기체로 가정하여 이상기체 방정식에 의한 온도 및 압력거동 변화를 나타내는 것으로 가정하였다. 따라서, SDT 상부의 cover gas 공간 온도 및 압력 거동은 식 (11) 및 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_{g,SDT}(t) = f(\bar{\rho}_{Na,SDT}(t)) \tag{11}$$

$$P_{g,SDT}(t) = f(V_{SDT,g}(t),\ T_{Na,SDT}(t)) \tag{12}$$

상기 과정을 통해 기존 SELPSTA 코드[1]의 SDT 해석모형을 나타내는 식 (2)는 SDT

내부 cover gas의 온도 및 압력거동을 나타내는 다음 식 (13)으로 대체 가능하다.

$$P_{g,SDT}^{j+1} = P_{g,SDT}^{j}\left\{1 - \frac{V_{g,SDT}^{j+1} - V_{g,SDT}^{j}}{V_{g,SDT}^{j}}\right\} + \frac{m_{g,SDT}^{o}}{M_{g,SDT}^{o}} \cdot \frac{\overline{R}}{V_{g,SDT}^{j}} \cdot (T_{g,SDT}^{j+1} - T_{g,SDT}^{j}) \tag{13}$$

식에서, 탱크 내부의 온도 변화를 나타내는 우변 마지막 항은 기존의 해석모형에서는 증기발생기 shell측 온도 변화 항을 의미하는 것에서 탱크 하부 저온 소듐 풀 영향을 고려한 실질적인 SDT 내부의 기체공간 온도 변화 항으로 적용되어, 실제 현상 모사를 위해 보다 적절한 해석모형으로 개선되었음을 알 수 있다.

3.2 소듐배출탱크 (SDT) 저압 파열판 해석모형 설정

KALIMER SDT 설계와 관련하여, 기존의 SELPSTA 코드 해석모형에는 탱크 내부 압력의 상한치가 적용되어 있지 않다. 이러한 경우, 수소기체를 포함하는 반응 생성물 유입시 SDT에서의 국부적인 수소 농도 증가로 인한 폭발 가능성이 존재하므로 그림 5와 같이 SDT 내부기체의 방출배관에 저압 파열판(low-pressure rupture disk)을 추가로 설치하여 탱크 내부 압력 증가시 이를 파열시켜 탱크 내부를 감압시킬 필요가 있다. 프랑스의 SPX 및 EFR 또는 미국 GE의 PRISM 설계[3]의 경우, 탱크 내부 감압시에는 SDT에 chimney를 설치하고 chimney 상단에 저압 파열판(low-pressure rupture disk)를 설치하여 2.5bar(0.25MPa)에서 파열판(rupture disk)이 파열 되도록 설정하고 있으며, 수소 점화기(Hydrogen igniter) 등의 추가 장비는 고려하지 않고 있다[5]. 따라서, 본 연구에서는 SDT와 연결된 수직 배관에 설치하는 저압 파열판(low-pressure rupture disk)의 파열 설정압력을 참고문헌 [5]를 참조하여 0.25MPa로 설정하고 분석을 수행하였다. 저압 파열판(low-pressure)의 파열 설정압력은 증기발생기와 SDT를 연결하는 배관에 설치되어 증기발생기 및 중간열전달계통 (IHTS)의 압력 완화를 담당하는 계통의 파열판 설정압력인 1.5MPa[2]과 비교하여 상당히 낮은 압력이지만, 정상운전 중의 SDT 압력인 0.1MPa와 비교할 때 증기발생기 shell측의 고온 소듐 유입에 의한 탱크 내부의 압력 증가 현상을 고려하여 PRISM 또는 EFR 등에서 사용하는 적절한 수치이므로 KALIMER-150 설계에 그대로 적용하였으며, 이러한 설계를 SELPSTA 코드 SDT 해석모형에는 다음 식 (14)와 같이 모형화하였다.

$$P_{g,SDT}(t) = \begin{cases} P_{g,SDT}(t) & for \quad P_{g,SDT} < P_{LPRD} \\ P_{env} & for \quad P_{g,SDT} > P_{LPRD} \end{cases} \tag{14}$$

식에서, P_{env} 및 P_{LPRD} 는 각각 대기압과 SDT의 저압 파열판 파열 설정압력을 의미하며, SELPSTA 코드의 사용자 입력을 통해 SDT 저압 파열판 설치 여부를 선택적으로 결정할 수 있도록 option 입력 처리가 가능하도록 하였다.

3.3 소듐배출탱크 (SDT) 해석모형 특성 평가

본 절에서는 상기 과정을 통해 개선된 SDT 해석모형이 SWR 시의 계통 압력방출 현상 해석에 미치는 영향을 기존의 해석모형과 비교하고, 이를 통해 SDT 해석모형의 적절성 및 특성을 평가하였다. 그림 6은 개선된 SDT 해석모형에 의한 과도기 cover gas 영역 및 증기발생기 shell측 소듐온도, 그리고 SDT 내부 소듐 온도분포를 도시한 그림으로, 기존의 SDT 해석모형에서는 계산이 불가능하던 SDT 내부 소듐온도 분포가 새롭게 계산됨을 알 수 있으며, 초기 200°C로 유지되던 SDT 내부 소듐이 계통 파열판(rupture disk) 파열시점 이후 급격히 상승함(그림은 log scale인 점에 유의)을 볼 수 있다. 즉, 기존의 SDT 해석모형에서는 탱크 하부의 저온 소듐온도를 초기온도로 그대로 가정하고 탱크 내부로 유입되는 증기발생기 shell측 소듐에 의해 탱크 내부가 과압되는 것으로 가정하여 계산을 수행함에 따라 실제 현상과 비교하여 초기에는 실제 현상보다 높은 소듐 온도를 반영함으로써, 보수적인 계산결과를 예측할 소지가 있음을 알 수 있다. 하지만, 개선된 해석모형에서는 초기 증기발생기 shell측으로부터 유입된 고온 소듐이 탱크 하부의 저온 소듐 풀과 혼합되어 에너지를 상실함에 따라 오히려 낮은 온도증가를 나타내다가, 증기발생기 shell측으로부터의 지속적인 고온 소듐 유입에 의해 탱크 하부의 혼합 소듐 풀 온도가 급격히 증가하여 반응 종료시점(*증기발생기 shell측 소듐이 모두 방출되어 소듐 측 반응요인 격리(reactant isolation)에 의해 반응이 종료되는 시점*)으로 갈수록 증기발생기 shell측 소듐 온도에 근접하는 경향을 보인다. 그림 7은 개선된 SDT 해석모형을 이용하여 계산한 계통 파열판(rupture disk) 파열 시점 이후의 SDT로 방출되는 증기발생기 shell측 소듐 체적 및 증기발생기 내부에 잔류하는 소듐 체적, 그리고 SDT 내부에 존재하는 소듐체적 증가 및 이로 인한 탱크 기체공간 감소 경향을 일목요연하게 도시한 그림이다. 그림에서와 같이 증기발생기 shell측으로부터 방출되는 소듐으로 인해 SDT 내부의 소듐 체적이 증가하면서 이에 상응하여 탱크 내부의 기체공간 체적이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이 때, 기체공간에서의 소듐 체적 감소는 탱크 내부의 소듐 온도증가에 기인하는 argon cover gas 공간 온도 증가와 함께 SDT 내부의 과도 압력변화 경향에 지배적인 영향을 미치게 되므로, 이와 같은 과도기 온도분포 경향 및 탱크 내부 기체공간 체적 변화 경향을 토대로 SDT 내부를 포함하는 계통의 과도압력 변화 경향을 기존의 SDT 해석모형과 비교하여 그림 8 및 그림 9에 도시하였다.

그림 8은 그림 6 및 그림 7에서 보인 SDT 내부의 과도기 온도변화 경향 및 탱크 내부 기체공간 체적변화를 반영하여 개선된 SDT 해석모형을 사용하여 계산한 과도기 탱크 내부압력 변화 경향을 도시한 그림으로, 식 (2)와 같이 탱크 내부 기체공간의 압력 계산에 증기발생기 shell측 소듐의 온도변화 경향을 그대로 적용한 바 있는 기존의 해석모형에 비해 계통 파열판(rupture disk) 파열 직후에는 개선된 해석모형에 의한 계산결과가 더 낮은 압력거동을 나타냄을 알 수 있다. 이는 고온 소듐의 유입 직후에는 고온 소듐이 기존재하던 저온 소듐 풀과의 혼합에 의해 에너지를 상실하면서 증기발생기 shell측 소듐 온도를 그대로 사용하는 기존의 해석모형에 비해 탱크 내부소듐 온도가 상대적으로 서서히

증가하기 때문인 것으로 판단되며, 이후 지속적인 고온 소듐 유입에 의해 탱크내부의 소듐온도 증가폭이 급격히 증가하면서 약 10초 경과시점 이후로는 개선된 해석모형이 훨씬 더 높은 압력 경향을 나타냄을 볼 수 있다. 이는 기존의 해석모형이 탱크 내부의 소듐 온도계산을 적절히 수행하지 않고 증기발생기 shell측의 온도분포를 그대로 사용함에 따라 반응 후기로 갈수록 반응 source 항이 감소하면서 이에 비례하여 계통의 소듐온도 증가폭 역시 감소하고, 이에 따라 SDT 내부의 압력 증가폭 역시 이에 비례하여 수렴하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 9는 이와 같이 개선된 SDT 내부 압력변화에 의해 증기발생기 상부 cover gas 영역의 압력으로 대표되는 과도기 계통 압력변화 경향을 기존의 SDT 해석모형에 의한 계산결과와 직접 비교하여 도시한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 SELPSTA 코드의 SDT 해석모형은 이론적 추측과 동일하게 계통 파열판(rupture disk) 파열시점 이전 및 파열 직후에서는 기존의 모형과 비교할 때 계통의 압력거동에 큰 차이를 나타내지 않음을 볼 수 있으며, 계통의 압력이 방출되기 시작하는 시점부터 급격한 차이를 보이기 시작한다. 즉, 개선된 SDT 해석모형에 의해 계산된 탱크 내부의 압력분포는 고온소듐 유입에 의한 영향을 탱크 내부 압력계산에 반영함에 따라 기존의 해석모형에 비해 SDT 내부의 압력이 높게 증가하면서 계통 전체의 압력 방출이 둔화되어 전열관측 격리(tube-side isolation)에 의해 물/증기 누출이 완전히 차단되는 약 90초경[2][6]에는 기존 해석모형에 비해 약 25% 이상 높은 압력을 유지하면서 지속적인 탱크 내부압력 증가에 의해 추가적인 계통 압력방출이 지연되고 있음을 볼 수 있다. 이 경우, 계통이 정상운전 압력인 0.1MPa에 비해 높은 압력인 약 3기압 이상으로 지속적으로 유지됨에 따라 기계적인 구조 건전성에 악영향을 미칠 수 있으므로, SELPSTA 코드의 사용자 입력을 활용하여 SDT chimney와 연결된 저압 파열판(low-pressure rupture disk) 파열 선택 option을 적용하고 분석을 수행하였다.

그림 10과 그림 11은 그림 9의 분석과 동일한 조건에 대하여 SDT 저압 파열판(low-pressure rupture disk)을 설치한 경우(파열설정 압력 : 0.25MPa [5])에 대한 탱크 내부 및 계통 압력변화 경향을 기존의 해석모형과 비교한 그림이다. 그림 10과 같이 SDT 내부의 압력은 기존 해석모형에 비해 급격히 증가하면서 약 200초 경과 시점부터는 SDT 저압 파열판(low-pressure rupture disk) 파열설정 압력인 0.25MPa를 넘어서게 되며, SELPSTA 코드의 저압 파열선택 옵션을 사용한 경우, 저압 파열판(low-pressure rupture disk) 파열과 동시에 식 (14)에 의해 대기압으로 급격한 압력감소가 이루어짐을 볼 수 있다. 또한, 이에 상응하여 그림 11의 계통 압력변화 역시 SDT의 저압 파열판(low-pressure rupture disk) 파열과 동시에 급격한 압력방출이 이루어지면서, SWR 발생 후 약 600초 경과시점부터는 중간열전달계통(IHTS)의 정상운전 압력까지 압력 감소가 이루어짐을 볼 수 있다. 이와 같은 SDT의 저압 파열판(low-pressure rupture disk) 설치 및 파열현상은 계통이 주위 환경으로 완전히 개방되는 것을 의미하므로, 계통 운전 및 유지보수 등의 다양한 설계상의 고려가 필연적으로 뒷받침되어야 하므로, SDT를 포함하는 중간열전달계통

(IHTS)의 보다 구체적인 설계가 이루어진 후 상세분석이 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

그림 12는 계통 설계인자인 SDT 기체공간 체적 변화와 과도기 탱크 압력변화 경향 간의 상관관계를 도시한 그림으로, 기 수행연구[7]를 통해 기존의 SDT 해석모형을 적용하여 수행된 바 있는 결과를 개선된 해석모형을 이용하여 계산된 결과로 보완한 그림이다. 기존의 해석모형은 탱크 내부의 기체공간 체적 변화가 전적으로 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 고온 소듐 체적증가에 기인하는 기체공간 체적 감소에 의해서만 계산되므로 반응 직후 약 20초 이상의 시간이 경과하도록 설계인자 변화에 의한 영향이 반영되지 않았으나, 개선된 해석모형에서는 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 고온 소듐체적 누적량과 탱크 내부 소듐의 온도변화 영향을 동시에 고려하므로, 계통 파열판(rupture disk) 파열시점 이후 고온 소듐의 유입량 증가에 의해 SDT 내부 기체공간 체적 변화 영향이 뚜렷이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 정량적으로는 자유기체공간 체적이 기준설계 값의 75%로 감소함에 따라 SDT의 최고 압력은 설계 기준 값에 비해서 약 40% 이상 증가하였으나, SDT의 자유기체공간 체적이 25%와 50% 증가하는 경우에는 각각 약 15%와 24% 내외의 감소를 보이는 데 그쳤다. 이는 SDT의 자유 기체공간 체적이 작을수록 증기발생기 shell측으로부터 유입되는 고온 소듐의 영향에 의해 이상기체로 가정한 기체공간 내부의 비활성 기체(Argon 기체)가 고온 환경 및 기체공간 감소에 의해 상대적으로 급격한 압력과도를 겪기 때문으로 판단된다. 또한, 증기발생기 shell측 소듐 액위 감소에 의한 반응요인 격리로 인해 증기발생기로부터의 고온 소듐 유입량이 감소함에 따라 SDT의 과도기 최고 압력은 점차 수렴하는 경향을 보이게 된다.

이와 같은 설계인자 변화에 의한 영향을 기존의 SDT 해석모형과 비교하여 표 1에 제시하였다. 표 1과 같이 개선된 SDT 해석모형의 정량적 수치들이 기존 해석모형의 수치와 비교하여 더 높은 값을 갖는 것은 개선된 해석모형에 의해 설계인자 변화의 영향이 부각됨을 의미하는 것으로서, SDT 내부의 압력과도가 탱크 내부의 소듐 온도변화를 반영함에 따라 뚜렷이 나타나고 있음을 단적으로 보여주는 예라 할 수 있다. 따라서, 본 분석을 통해 개선된 해석모형 및 보완된 설계인자 특성영향 평가 자료는 SDT를 포함하는 소듐-물 반응사고 압력방출계통 (SWRPRS) 설계 및 해석에 참고자료로 활용 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론

KALIMER 증기발생기의 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석을 위해 자체적으로 개발된 SELPSTA 코드의 SDT 해석모형 개선을 위해 KALIMER-150 SDT에 대한 구체적인 설계자료를 활용하여 기본 입력자료를 생산하고, 탱크 하부에 존재하는 저온 소듐 풀의 특성을 반영하였다. 또한, 개선된 해석모형을 적용하여 소듐-물 반응 중/후기 준정상상태의 장기 계통 압력과도 해석을 수행하고, 기존의 SELPSTA 코드 해석모형과의 비교/분석을 통해 개선된 해석모형의 적절성을 평가하였다. SDT는 계통 파열판(rupture disk)의 파열

직후 급격히 유입되는 고온의 소듐에 의해 내부 압력이 증가하므로, 해석모형은 고온 소듐의 유입 및 이로 인한 탱크 내부의 소듐온도 변화 현상을 반영하고, 이와 함께 탱크 내부의 소듐 체적 증가에 의해 상대적으로 감소하는 탱크 내부 기체공간 체적 영향을 복합적으로 고려하여 탱크 내부의 최종 압력을 계산할 수 있도록 개선하였으며, 기존의 해석모형과 비교하여 물리적으로 타당한 계통의 온도 및 압력과도 결과를 예측하고 있음을 확인하였다. SELPSTA 코드의 SDT 해석모형 개선 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 기존의 SDT 해석모형 : $P^t_{SDT} = f(T^t_{Na,SG}, V^t_{Na,ex})$
- 개선된 SDT 해석모형 : $P^t_{SDT} = f(T^t_{g,SDT}, V^t_{g,SDT})$, $T^t_{g,SDT} = f(\rho^t_{Na,SDT})$

또한, 소듐배출탱크 내부의 과압 방지를 위해 탱크 내부의 압력을 대기중으로 방출시킬 수 있는 저압 파열판(low-pressure rupture disk) 설치 option을 SELPSTA 코드의 사용자 입력으로 설정하여, 향후 구체적인 소듐-물 반응사고 압력완화계통 (SWRPRS) 설계시 활용할 수 있도록 코드 보완을 수행하였다. 본 연구를 통해 개선된 SDT 해석모형 및 압력방출계통 설계인자 특성영향 평가 결과는 개선된 SELPSTA 코드의 기능상 특성과 함께 향후 KALIMER-600에 대한 SDT를 포함하는 소듐-물 반응사고 압력방출계통 (SWRPRS) 설계시 유용하게 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 어재혁 외, “KALIMER 소듐-물 반응사고 중/후반기 해석코드 개발", 한국원자력연구소, KAERI/TR-2279/2002 (2002)

[2] D. H. Hahn, et al., “KALIMER Conceptual Design Report”, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/TR-2204/2002 (2002)

[3] GE. PRISM$_{TM}$ PSID-Preliminary Safety Information Document, GEFR-00793/UC-87 Ta, GE, USA, November (1986)

[4] 김연식, “IHTS 설계자료 계산서”, LMR/FS300-CN-01 Rev.0/99, 한국원자력연구소, KALIMER팀 내부문서, 1999

[5] 심윤섭 외, “불란서 전문가 자문 활용보고서”, 한국원자력연구소, KALIMER/FS 100-WR-01 Rev.0/02 (2002)

[6] 어재혁, “소듐-물 반응사고 중/후반기 전열관 물/증기 누출모형 설정 보고서", LMR/FS300-CN-01 Rev.0/02 (FS222100), KAERI, KALIMER팀 내부문서, 2002

[7] 어재혁, “소듐-물 반응사고 압력방출계통 설계인자 특성영향 평가 보고서", LMR/FS300-ER-03 Rev.0/03 (FS221000), KAERI, KALIMER팀 내부문서, 2003

표 1. 소듐배출탱크 (SDT) 과도기 최고압력 비교

구분 / 분석경우	기존 SDT 해석모형		개선된 SDT 해석모형	
	Max. P_{SDT} [MPa]	% diff. to nominal	Max. P_{SDT} [MPa]	% diff. to nominal
75% of Nominal	0.303	+ 31 %	0.514	+ 40 %
Nominal Value	0.229	N/A	0.369	N/A
75% of Nominal	0.201	- 13 %	0.313	- 15%
75% of Nominal	0.185	- 20 %	0.282	- 24 %

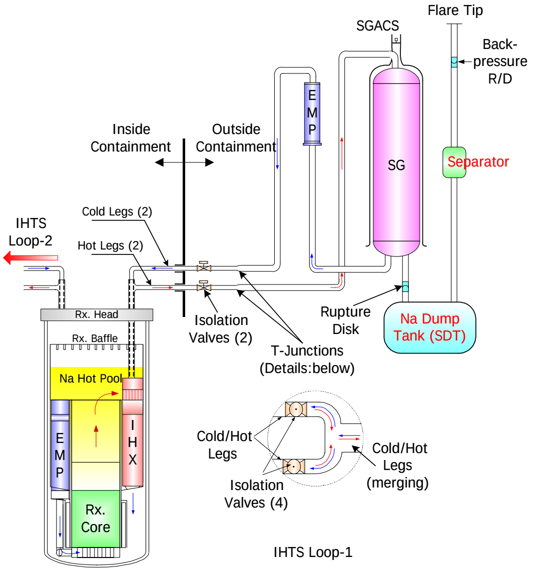


그림 1. Overview of the KALIMER-150

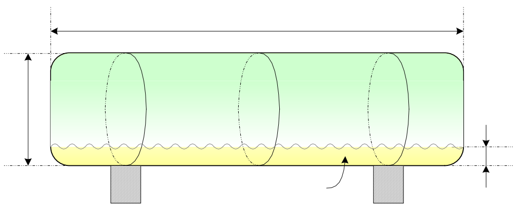


그림 2. SDT 형상 개략도

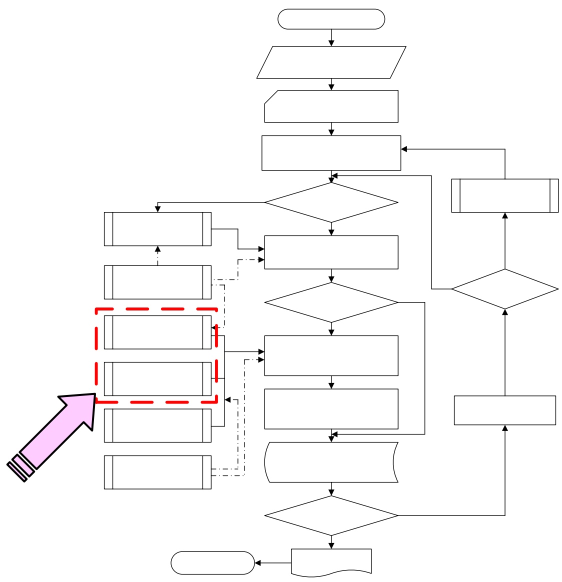
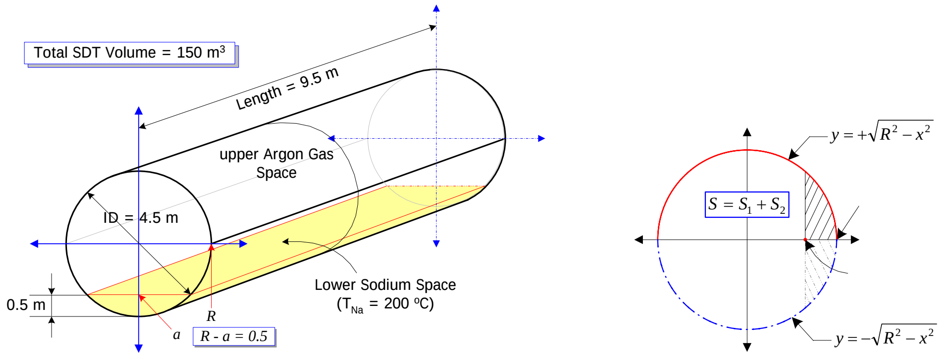


그림 3. SDT 해석모형 개선을 위한 SELPSTA 코드 계산 흐름도



(a) (b)

그림 4. 소듐배출탱크 (SDT) 기하형상 및 크기자료

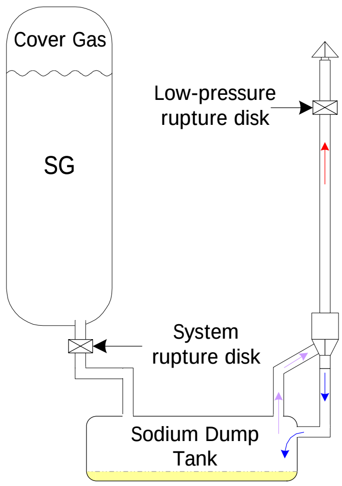


그림 5. 소듐배출탱크 (SDT) 압력 조절 계통도

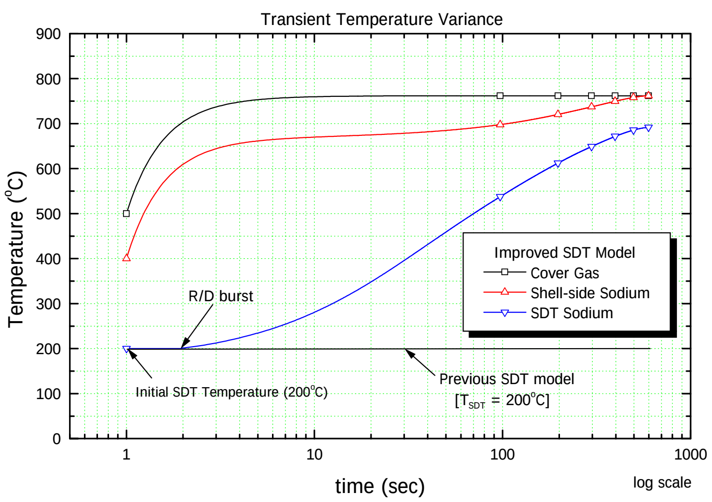


그림 6. SWR 중/후반기 계통 과도온도 변화

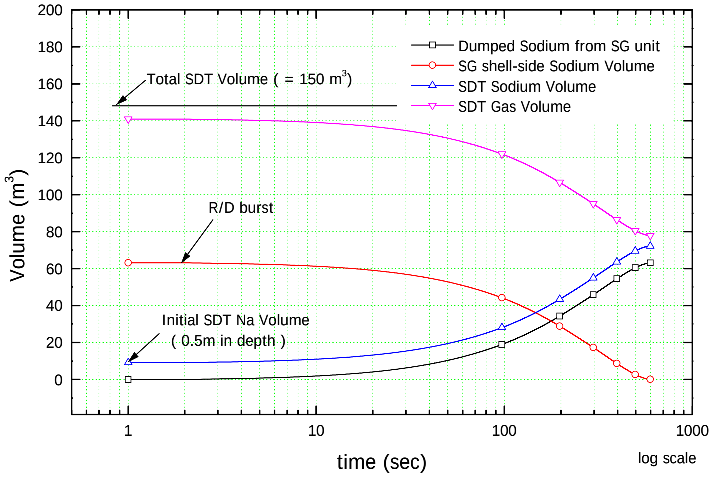


그림 7. 개선된 해석모형을 이용한 SDT 소듐 및 기체공간 체적 변화

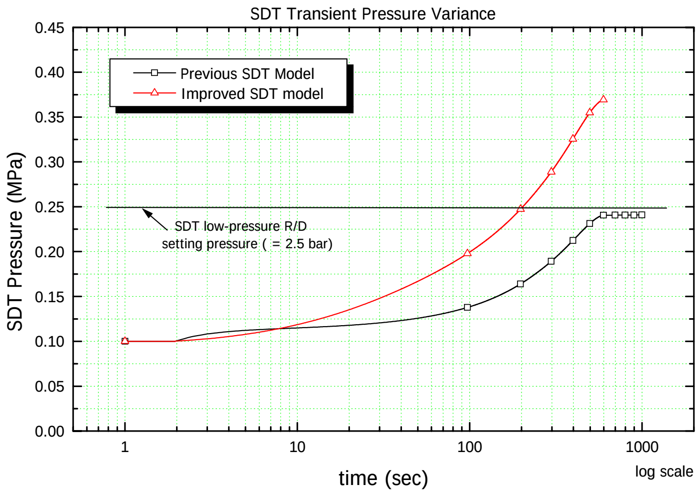


그림 8. SWR 중/후반기 SDT 과도압력 변화 비교

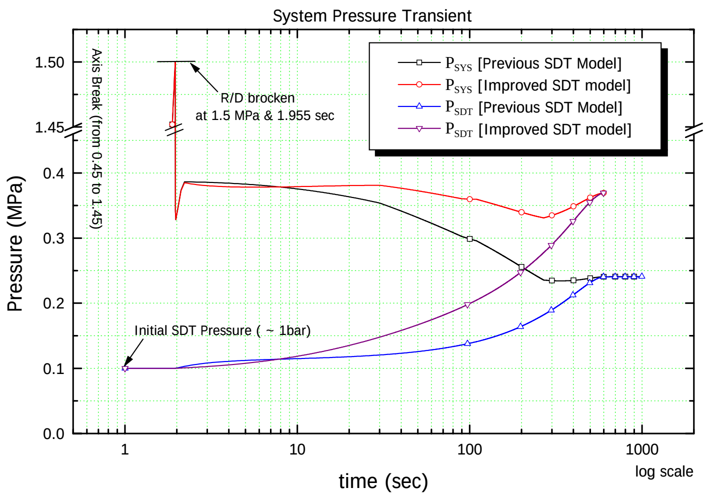


그림 9. SWR 중/후반기 계통 과도압력 변화 비교

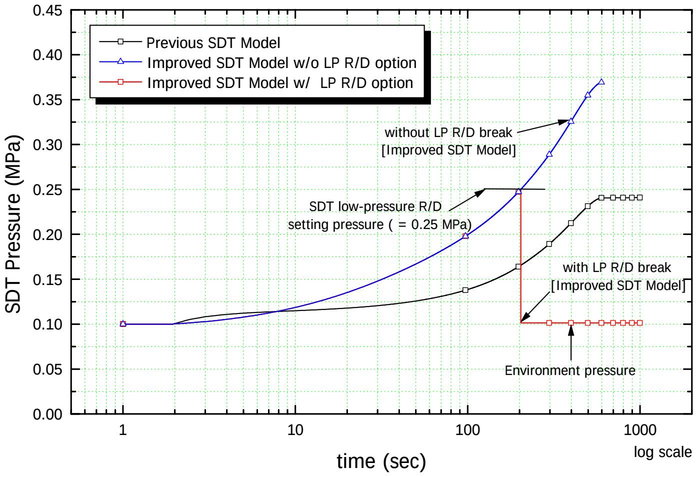


그림 10. SDT 저압 파열판 설치시의 탱크내부 압력변화 비교

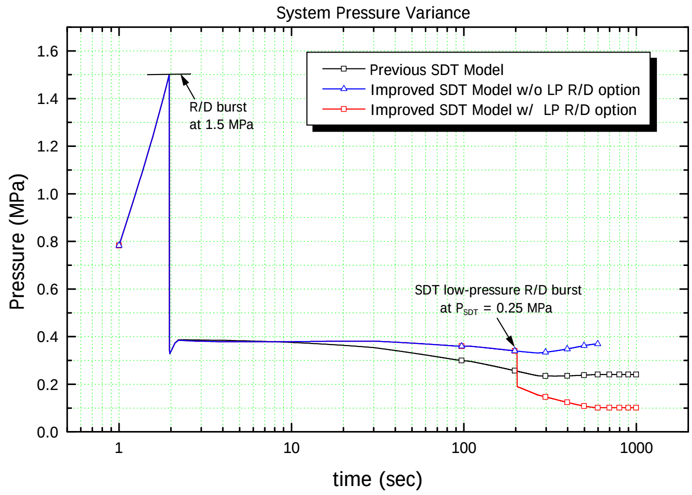


그림 11. SDT 저압 파열판 설치시의 계통 압력방출 경향 비교

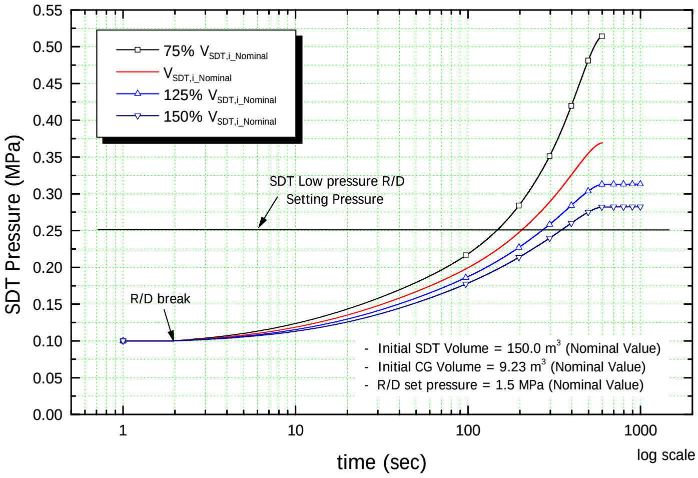


그림 12. SDT 기체공간 체적변화시의 SDT 과도 압력변화