

## KALIMER 중간계통의 SWR 초반기 압력과 거동 분석

### Evaluation of the SWR's Early Pressure Variations in the KALIMER IHTS

김연식, 심윤섭, 김의광, 어재혁

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

액체금속로의 소듐-물반응사고에 따른 압력거동에 대한 분석을 수행하기 위하여 원자력연구소 KALIMER 개발팀에서 개발된 SPIKE 코드에 대한 해석모형 및 알고리즘을 제시하고, KALIMER IHTS의 소듐-물반응사고로 인한 계통내 압력 거동현상을 분석하였다. 소듐-물반응사고의 초반기는 압력 전달과 질량 전달 영역으로 구성됨을 확인하였다. 압력 전달 영역에서의 압력 거동은 계통의 설계 특성과 상관없으나 질량 전달 영역에서는 cover gas 체적과 파열판 파열 압력에 크게 의존함을 확인하였다. KALIMER IHTS의 초반기 소듐-물반응사고 해석 결과는 적절한 cover gas 체적과 파열판 설정 압력으로 압력 진동이 모두 설계 압력내에 있는 것이 가능함을 확인하였다.

#### Abstract

The analytical model and algorithm of the SPIKE code, which has been developed to investigate the sodium-water reaction phenomena in the liquid metal reactor by KAERI's KALIMER team, was presented and the sodium water reaction of KALIMER IHTS was evaluated. Early stage of a sodium-water reaction consists of wave transfer and mass transfer regimes. The pressure variations were independent of specific design features in the wave transfer regime. In the mass transfer regime, the pressure variations were strongly dependent on cover gas volume and rupture disk set pressure. The early stage of SWR analysis showed that the KALIMER IHTS with appropriate cover gas volume and rupture disk set pressure had enough margin to its design pressure.

## 1. 서 론

한국형 액체금속로인 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)[1]는 소듐을 1차 및 중간계통의 냉각재로 사용하고 증기발생계통은 경수로 발전소와 비슷한 물/증기 사이클이다. 액체금속로에 있어서 1차 및 중간계통(IHTS, intermediate heat transport system)의 냉각재인 고

은의 소듐은 물이나 공기 등과는 매우 강렬한 반응을 하여 폭발성이 있는 수소나 유독한 가스 등을 발생시키기 때문에 이를 방지하기 위한 여러 가지 설계특성이 고려된다. 증기발생기 튜브누설이 발생하게 되면 물/증기가 증기발생기 셸측의 소듐과 강렬한 반응을 일으키어 계통에 큰 압력파를 일으키며 또한 계속되는 누출로 인하여 소듐-물반응(SWR, sodium-water reaction)이 지속적으로 일어나 계통의 압력도 점차 증가시킨다. 그리고 소듐-물 반응으로 생긴 부식성이 강한 반응 생성물이 배관을 통하여 압력경계를 이루는 기기나 부품에 유입되어 기기나 부품 본연 기능에 문제를 일으킬 수가 있다. 소듐-물반응 압력방출계통(SWRPRS, SWR pressure relief system)은 이와 같은 소듐-물반응 사고의 영향을 최소화하고 궁극적으로 소듐-물반응사고를 종결시키는 기능을 가진 계통으로서 이에 대한 적절한 설계 개념이 설정될 필요가 있다.

소듐-물반응사고는 초반기에 급격한 압력과 발생과 전달(wave transfer)이 생기며 중후반기에는 점차적으로 계통내에 유입량의 증가로 인한 압력 증가 현상(mass transfer)이 일어난다. 한국원자력연구소에서는 원자력 증장기 연구를 통하여 SWR의 초반기 압력과 해석을 위한 해석 도구인 SPIKE 코드[2]를 개발한 바 있으며 이를 사용하여 KALIMER의 SWRPRS 설계에 활용하고 있다. 본 논문에서는 기 개발된 SPIKE 코드의 주요 특징을 소개하고 KALIMER 중간계통에서의 SWR 초반기 압력 해석 및 관련 설계인자 영향 분석 결과를 통해 향후 설계에서 고려되어야 할 추천 사항을 제시하였다.

## 2. SPIKE 코드

SPIKE 코드는 KALIMER 중간열전달계통(IHTS)의 소듐-물 반응사고 초반기 압력과 전달을 분석하는 도구로서 중간계통내의 압력과 전달 모사를 위해 일차원, 점성유동(압력강하), 그리고 과도 (unsteady) 유동을 나타내는 연속 및 에너지 방정식 등의 지배방정식 사용하며, 지배방정식을 푸는데 있어서 압력과 해석에 적용성이 많은 방법으로서 특성방정식을 유도하여 특성곡선에 따라 적분을 수행하는 특성기법(MOC, method of characterization)을 사용한다[3,4]. 그림 1은 거리와 시간에 대한 특성 곡선의 개념을 나타낸 것으로서 현재 시간에서의 차별화된 값들은 해당 특성 곡선을 따라 적분을 수행하여 다음 시간에서의 값을 계산하게 된다[5]. SPIKE 코드는 크게 소듐-물 반응시 중간계통내의 압력과 전달 모형과 이러한 압력파의 발생원인인 소듐-물 반응영역(reaction zone)에 대한 모형의 두 가지 수학적 모형을 가지고 있으며, 압력과 전달의 계산을 위해 KALIMER 중간열전달계통(IHTS)을 적절한 부분체(branch)들로 나누고 각각의 부분체들을 연결체(junction)로 연결하여 모형을 할 수 있도록 하였으며 각 부분체는 다시 작은 node들로 차분하여 계산한다. 각 부분체들간 연결체의 형상 변화 예를 들면, sudden contraction/expansion과 같은 경계를 정의하거나 긴 배관의 경우 몇 개의 부분체를 단순 연결하는 기능(dummy connection)을 제공한다. 연결체의 종류는 IHTS내의 배관계통과 주요 기기나 부품을 모델링할 수 있도록 크게 piping fittings과 equipment로 구분하였으며 구분은 다음과 같다.

- Pipe fittings
  - dummy connection
  - elbow
  - closed end
  - sudden expansion and contraction
  - tee
- Equipment

- far end
- rupture disk
- surge tank
- expansion tank

또한, 소듐-물 반응 영역에 대하여는 bubble 개념이 적용되었으며 bubble의 직경이 증가하여 반응공간의 직경 즉, 증기발생기 쉘측 내경보다 커지면 그림 2와 같이 pan cake와 같이 실린더 모양으로 직경은 변하지 않고 축방향으로 팽창하는 개념이 적용되었다. 이를 위해서 bubble의 에너지 평형식, bubble의 상태방정식, 그리고 bubble 주변 유체의 운동방정식을 적용하였으며 이를 차별화하여 푸는 형식이다. SPIKE 코드의 각 반응 영역에 대한 주요 관계식은 다음과 같다.

- 기포 내부 상태방정식:

$$P = R_H T \frac{\alpha_H m' + \frac{1}{9}(m - m')}{\frac{4}{3} \pi a^3 - m' \sum \frac{\alpha_{sj}}{\rho_{sj}}} \quad (1)$$

- 기포 외부 branch 거동 방정식:

$$a \frac{du_r}{dt} = \frac{R}{R-a} \left[ \frac{P - P_R}{\rho} + \frac{u_r^2}{2} \left( 1 - \left( \frac{a}{R} \right)^4 \right) \right] - 2u_r \frac{da}{dt} \quad (2)$$

KALIMER IHTS의 계통에 대한 압력과 해석 모형에 있어서 사용한 주요 가정은 배관에 대하여 Hook의 법칙이 따르는 탄성체이며, 계통내 소듐은 단일상(single phase)으로만 존재하고, 소듐 유동은 Newtonian fluid이며, cavitation은 무시하였다.

SPIKE 코드는 시간 및 거리에 대한 유한 차분(MOC)를 사용한 fully explicit에 의하여 문제를 푼다. 전체 계산 영역에서 수치적 안정성을 위하여 다음 조건을 만족하도록  $\Delta t$ 와  $\Delta x$ 를 조정한다.

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} < \frac{1}{|u|_{\max} + a} \quad (3)$$

개발된 SPIKE 코드에 대한 검증 계산은 기 수행된 연구[2]에 정리되어 있으며, 일본 PNC의 축소 모형 실험결과[6]와 비교하여 비교적 타당한 결과를 예측하고 있음을 알 수 있다[5].

### 3. KALIMER 중간열전달계통(IHTS) 압력과 분석

KALIMER는 1차계통이 풀형, 중간계통은 서로 독립적인 2개의 루프로 된 발전소로서 그림 3에는 1차계통과 1개의 중간루프만을 개념적으로 나타내었다. KALIMER IHTS는 서로 독립된 2-루프이므로 소듐-물 반응을 해석하는 데는 1개 루프만 고려해도 된다. 각 루프는 중간열교환기 2대와 전자펌프 1대, 증기발생기 1대, 소듐배출 탱크, 그리고 연결배관 등으로 이루어져 있다. SPIKE 코드의 입력데이터를 위하여 IHTS 계통을 모두 branch 40개와 junction 39개로 나누고 기기로서 expansion tank, rupture disk를 각각 1대씩 정의하고 rupture disk에 연결된 소듐배출탱크는 동일 압력으로 유지되는 surge tank로 묘사하였다. 그림 4에는 IHTS의 SPIKE 입력데이터

branch-junction 개념을 나타내었다.

KALIMER IHTS의 SWR가 발생하는 것은 계통이 정상적으로 운전되고 있는 상태이므로 계통 정상운전 조건이 SWR 해석의 초기조건이 된다. 정상운전시 IHTS 내에는 소듐이 순환되고 있으며 또한 계통내 IHX 하단과 증기발생기 상단의 수직높이 차이가 20m를 넘기 때문에 유속, 마찰계수, 그리고 중력에 의한 압력과 초기 교란이 심각하게 나타난다. 이를 극복하기 위하여 정상상태 계산을 수행하여 압력과 해석의 초기조건으로 사용하여야 하는데 SPIKE에 restart 계산이 가능하도록 논리를 보완하였으며, 아울러 pipe fittings중에서 elbow에 대한 압력강하 영향이 branch 계산에서 반영되도록 SPIKE 코드를 수정하였다.

### 3.1 Steady state 계산

압력과 분석을 수행하기 위하여는 적절한 초기 조건이 필요한데 앞에서 지적한 바와 같이 소듐 유속, 마찰계수, 그리고 중력에 의한 압력과 초기 교란이 심각하게 나타나므로 이를 과도 해석으로 steady state 조건을 얻을 필요가 있다.

그림 5는 SPIKE 입력데이터를 사용하되 SWR 묘사인 튜브 누출은 제외한 과도해석 결과를 나타내고 있다. 20초에서 각 부위의 압력 진동이 매우 줄어든 정상상태를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이때 얻은 초기 압력 분포는 유속, 마찰 및 형상계수, 그리고 중력의 영향이 모두 고려된 결과로서 중력에 의한 압력 차이가 가장 크게 나타나는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다. 즉, IHTS중에서 낮은 곳에 위치한 IHX tube에서의 압력이 상대적으로 높은 곳에 위치한 IHTS T-branch에서의 압력보다 0.5bar 정도 크게 나타나고 있다.

### 3.2 압력과 전달 현상

SWR을 분석하기 위해서는 물/증기 누출량을 계산해야 되는데 KALIMER의 설계기준 물/증기 누출량은 튜브 3개의 양단파단(DEGB, double ended guillotine break)으로 가정하는데 계통 운전 조건인 15.5MPa, 483.2°C 상태하에서 choking flow를 가정하면 물/증기 누출량은 21.57 kg/s이 된다. 이 값을 SWR의 물/증기 누출량으로 사용하되 사고가 진행되는 동안 같은 양이 계속하여 누출된다는 보수적인 입장을 취하였다. 소듐-물반응사고에 의한 계통 압력의 변화는 IHTS내에서 SWR에 의한 압력 전파 특성과 SWR 완화를 위하여 설치된 부품인 rupture disk(RD)의 설정 압력 등에 의하여 달라질 수 있다. 먼저 SWR 발생시 IHTS내에서의 압력 전파의 경향을 보기 위하여 먼저 rupture disk의 압력 설정은 배제하고 증기발생기내 아르곤 개스 공간인 cover gas 체적을 변화에 대하여 계산을 수행하였다.

그림 7은 세 가지 cover gas(CG) 체적에 대한 RD가 설치된 배관에서의 SWR 압력 변화를 나타내고 있다. 세 가지 cover gas 체적에 대한 결과에서 알 수 있는 것은 초기 급격한 압력파가 전파되는 영역(0~0.27초)에서는 cover gas 체적에 무관하게 동일한 압력 진동(초기 첨두치: 15.5bar)을 보이다가 그 이후부터는 cover gas 체적에 반비례하여 압력이 상승하고 있음을 알 수 있다. 즉, SWR 발생후 0.27초까지는 순수하게 압력 전파(wave transfer)가 일어나고 그 이후로는 물/증기 누출로 인한 질량 유입 효과(mass transfer)가 나타나면서 압력이 전파되고 있음을 의미한다. 이와 같은 경향은 그림 8에서와 같이 IHX tube에서도 확인됨을 알 수 있다. RD 배관과 IHX tube에서는 압력이 변화가 약간 다르게 나타나고 있는데 이는 SWR reaction bubble로부터

의 거리와 관계가 있는 것으로 이해된다. 즉, reaction bubble 가까이 있는 RD 배관은 매우 빠른 wave transfer 영향을 받는 반면 멀리 있는 IHX tube에서는 단순화된 wave transfer의 경향을 보이고 있다. 그러나, mass transfer 영역에서는 오히려 IHX tube에서 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Cover gas 체적 영향을 분석에서는 SWR을 완화시키는 RD를 배제하여 계산하였으나 그 결과를 바탕으로 RD의 설정 압력에 대한 방법에 대한 고찰이 가능하게 한다. 즉, RD 설정 압력이 초기 침투치인 15.5bar 보다 작은 경우와 큰 경우로 나뉘어서 생각할 수 있다. 만약 RD 설정치가 초기 침투치 보다 작다면 RD는 초기 wave transfer 영역에서 파열이 일어날 것이고, 설정치가 초기 침투치 보다 크다면 자연스럽게 RD는 mass transfer 영역에서 파열이 일어나게 된다. 이것은 RD 성능에 있어서 요구되는 특성이 달라지는데 wave transfer의 경우에는 압력 진동이 매우 짧은 시간에서 움직이기 때문에 RD가 민감하게 작동될 것이 요구되는 반면 mass transfer의 경우는 압력 진동이 상당한 시간에 이루어지므로 RD는 상대적으로 민감성의 필요가 떨어진다고 볼 수 있다.

RD 설정 압력이 초기 침투치 보다 작은 경우에 압력이 설정치에 도달하면 파열된다고 할 때 어떤 경우에도 초기 침투치가 발생하는 첫 번째 wave에서 파열되므로 계통에 미치는 영향은 거의 동일한 것으로 평가되었다. 그림 9는 cover gas 체적이  $12.5\text{m}^3$ 인 경우에 있어서 RD 설정 압력이 모두 초기 침투치 압력 이내에 있는 3가지 경우와 초기 침투치를 약간 넘긴 1가지 경우에 대한 IHX tube에서의 압력 진동을 나타낸 것이다. RD 설정치가 초기 침투치인 15.5bar 보다 작은 3가지 경우에는 IHX tube에서의 압력 거동이 모두 동일하게 나타나고 있으나 RD 설정치가 초기 침투치를 넘은 경우는 압력 거동이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. RD 설정치가 초기 침투치 보다 작은 경우는 첫 번째 압력 wave의 침투치 도달 시간이 약 0.01초이므로 모두 0.01초내에 RD가 파열되어 RD 설정치 변화에 의한 파열 시점의 효과는 거의 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나 RD 설정치가 초기 침투치 보다 큰 경우(RD=16bar)는 상당한 시간후인 1.97초에 RD가 파열이 되는 까닭에 mass transfer의 효과로 인하여 계통내의 압력 진동이 매우 커지게 된다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 반응영역 크기 변화

SWR 발생시 반응영역에서는 순간적인 압력 진동을 일으키면서 크기가 계속하여 증가한다. 초기 작은 구모양이 점점 커져서 증기발생기 쉘의 내측에 닿을 정도가 크면 원통 모양의 반응영역으로 변화한다.

반응영역의 크기 변화를 보기 위하여 앞에서 언급하였던 RD 설정압력을 초기 침투치보다 작은 값과 큰 값 두 경우에 대하여 평가하였다. 그림 10은 cover gas 체적이  $12.5\text{m}^3$ 에서의 RD 설정치가 초기 침투치보다 조금 작은 15bar인 경우의 결과이며, 그림 11은 RD 설정치가 초기 침투치보다 조금 큰 16bar인 경우의 결과이다. 어느 경우에서나 RD 파열에 상관없이 구 형태의 반응영역이 존재하는 동안(0~0.12초)에는 동일한 크기로 변하다가 원통 모양으로 바뀐 다음부터는 RD 파열 여부에 따라 경향이 달라짐을 알 수 있다. (여기서, 원통 모양의 길이는 반응 영역의 중심에서 축방향으로 한쪽 경계면까지의 길이로 정의한 것이다.) 두 데이터 비교 결과 wave transfer가 일어나는 시점(0.27초)까지는 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였는데 이는 그림 10과 그림 11에서도 확인된다. 그림 10에서 RD가 반응 시작과 더불어 파열되는 까닭에 mass transfer가 일어나는 부분부터는 원통형 반응영역의 크기가 매우 크게 변함을 알 수 있다. 그림 11은 RD 파열전까지

는 길이가 계속 증가하면서 계통의 압력 진동의 역으로 크기가 변화하다가 RD 파열이후에는 매우 크게 변하는 것을 보여주고 있다.

원통 모양이 2m 이상(전체 길이는 4m)이 되는 경우는 SPIKE 코드를 사용하는 것에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 실제로 초반기는 wave transfer와 mass transfer가 연결되어 일어나는데 mass transfer가 중점적으로 일어나는 중.후반기에 대하여는 특성 방정식을 적용하는 것이 물리적 현상과는 차이가 있다. 따라서 SPIKE는 초반기 압력 해석을 위하여 사용하되 중.후반기 해석 도구의 초기 및 경계 조건을 제공하는 기능을 수행하는 것이 타당할 것으로 판단된다. KALIMER 개발 프로그램에서도 이와 관련한 연구가 수행중에 있다.

### 3.4 SWR 초반기 해석

KALIMER IHTS에 대한 SWR 초반기 해석은 현재 RD의 설정치인 15bar를 사용하여 세 가지 경우의 cover gas 체적(9.0, 12.5, 15.0m<sup>3</sup>)에 대하여 분석하였다.

그림 12에서 그림 14까지는 각 경우에 대한 IHTS 주요 지점에서의 압력 진동을 보여주고 있다. KALIMER의 RD 설정치가 초기 첨두치보다 작아서 RD는 wave transfer 영역에서 파열된다. 또한 wave transfer 영역에서의 압력 진동은 세 경우 모두 유사함을 알 수 있다. 그러나, mass transfer 영역에서는 cover gas 체적의 영향이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Cover gas가 가장 작은 경우를 제외하고는 모두 IHTS의 설계압력인 15bar를 넘지 않고 있다. 여기서 제시된 결과는 향후 개발될 SWR 중.후반기 해석 코드의 초기 및 경계조건으로 활용할 수 있으며 SWR 전체 해석을 통하여 적절한 설계 자료를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

액체금속로 KALIMER IHTS의 소듐-물반응사고 해석을 위하여 기 개발된 SPIKE 코드에 대한 주요 모형 및 해석 algorithm을 간략히 소개하고 압력과 전달현상에 대한 분석 결과를 제시하였으며, 소듐-물 반응사고 초반기 해석을 위해 필요한 elbow 등에 대한 모형 추가와 사용자 편의를 위한 작업을 수행하였다. KALIMER 중간열전달계통(IHTS)의 소듐-물 반응사고에 대한 초반기 해석을 위해 steady state 계산을 수행하여 과도계산을 위한 초기 조건을 얻었으며, 이를 이용하여 관련 설계 인자의 영향을 분석하였다. SWR 초반기는 wave transfer와 mass transfer 영역으로 나눌 수 있으며 wave transfer의 압력 거동은 계통 설계 특성에는 상관없는 물리적 현상을 보이고 있으나 mass transfer 영역에서는 계통 특성 특히, cover gas 체적과 RD 설정 압력의 영향이 크다는 것을 확인하였다.

KALIMER 중간열전달계통의 소듐-물 반응사고 초반기 해석 결과, 적절한 cover gas 체적을 가질 경우 압력 진동이 설계압력 내에서 변화할 수 있음을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

## Nomenclature

$a$ : 음속 또는 reaction bubble 반경  
 $m$ : bubble내 누적 질량  
 $m'$ : 누출량중 소듐과 반응한 물량  
 $P$ : 압력  
 $P_R$ : R지점에서의 압력  
 $r$ : 반경 방향축  
 $R$ : 증기발생기 반경  
 $R_H$ : 수소 개스 상수  
 $t$ : 시간  
 $T$ : 온도  
 $u$ : 유체속도  
 $u_r$ : 소듐 속도  
 $x$ : x-좌표(축)

## Greek Symbols

$\alpha$ : 수평기준 경사각 또는 누출물 단위 질량당 소듐과 반응하여 생긴 반응생성 물량  
 $\rho$ : 밀도

## Subscripts

$H$ : 수소( $H_2$ )  
 $s_i$ :  $s_1 \equiv Na_2O$ ;  $s_2 \equiv NaOH$

## 참고문헌

1. Hahn D.H. et al., "KALIMER Preliminary Conceptual Design Report", KAERI/TR-1636/2000 (2000)
2. Park J.H. et al., "Development of the SPIKE Code for Analysis of the Sodium-Water Reaction", KAERI/TR-1123/98 (1998)
3. Wylie E.B. et al., "Fluid Transients in Systems", Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1993).
4. Chaudhry M.H., Applied Hydraulic Transients 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold Co., New York (1987)
5. 김연식 외, " KALIMER IHTS에서의 압력과 거동 특성", 한국원자력학회 '98 추계학술발표회, (1998)
6. Hishida H. et al., Proceeding of Fast Breeder Reactor Safety Meeting, CONF-740401-P2 (1974)

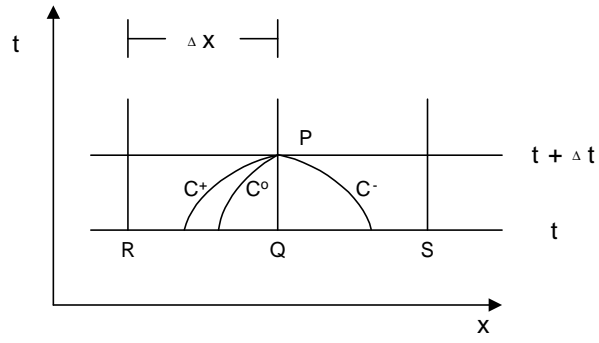


그림 1. Characteristic lines in x-t planes

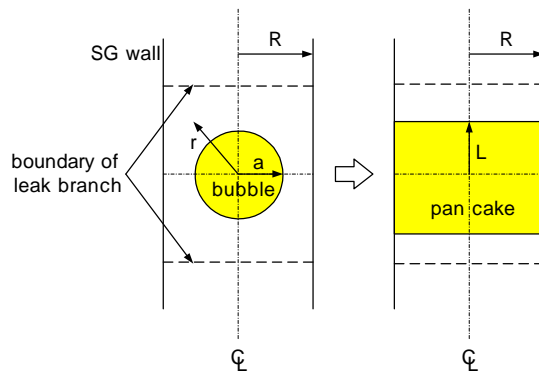


그림 2. Modeling of reaction zone

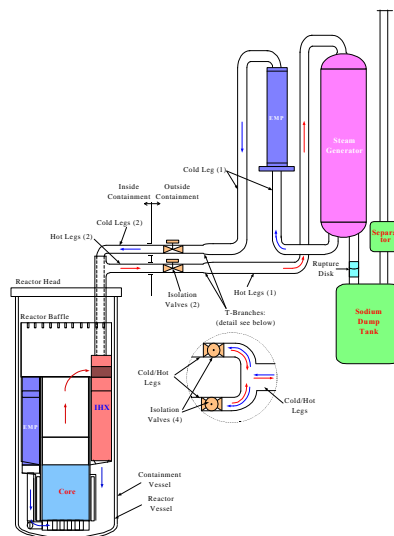


그림 3. Configuration of the KALIMER IHTS



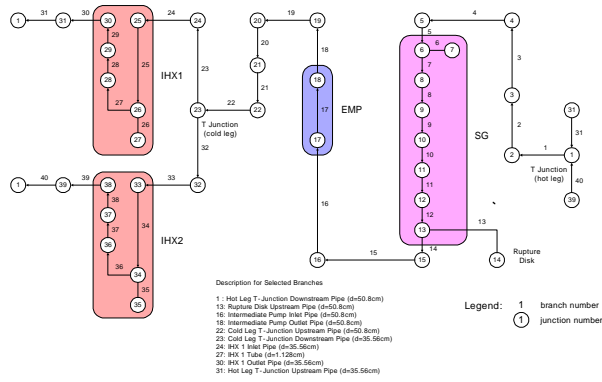


그림 4. Modeling of the KALIMER IHTS for SPIKE code

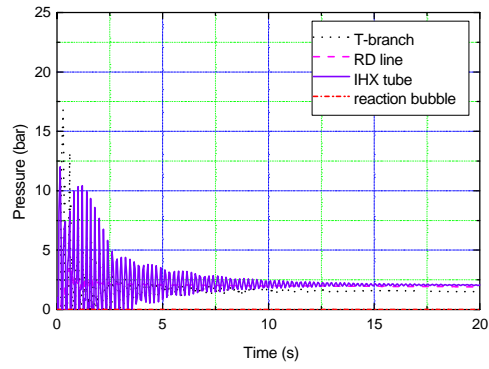


그림 5. Steady state calculation for SWR initial condition

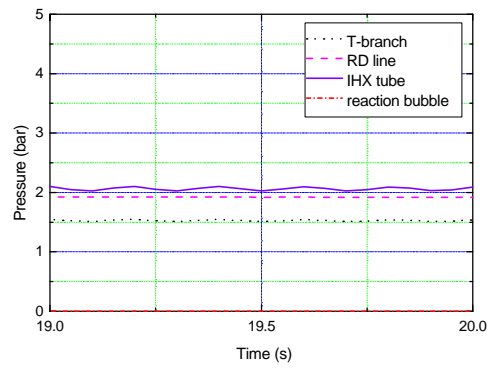


그림 6. Pressures for steady state condition

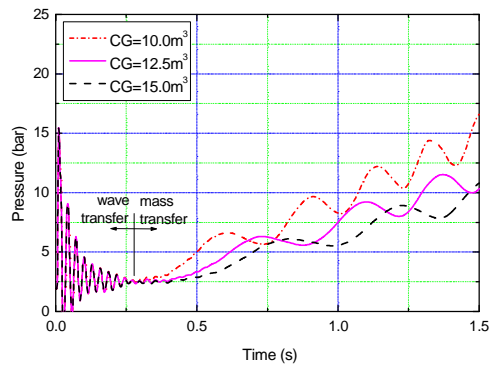


그림 7. Pressure variations at RD line for 3 CG volumes

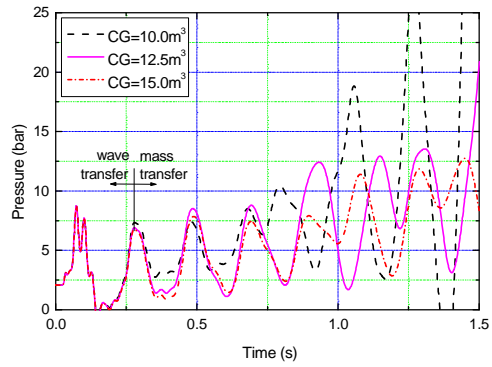


그림 8. Pressure variations at IHX tube for 3 CG volumes

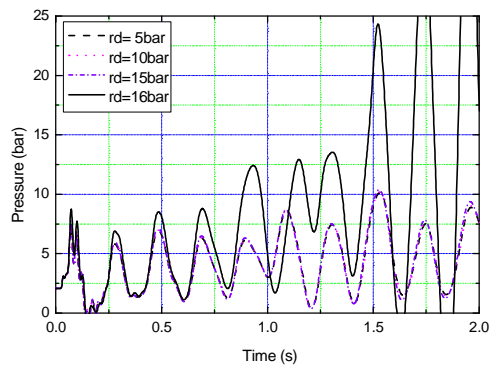


그림 9. Pressure variations at IHX tube for 4 RD set pressures

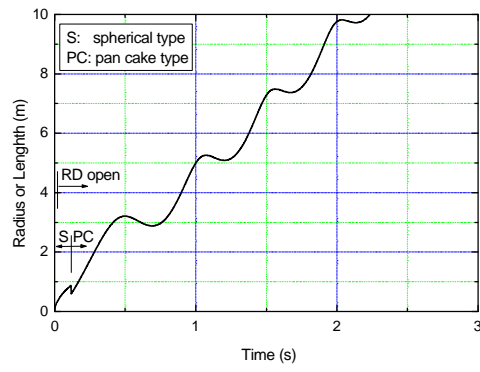


그림 10. Size variation of the reaction zone ( $CG=12.5m^3, RD=15bar$ )

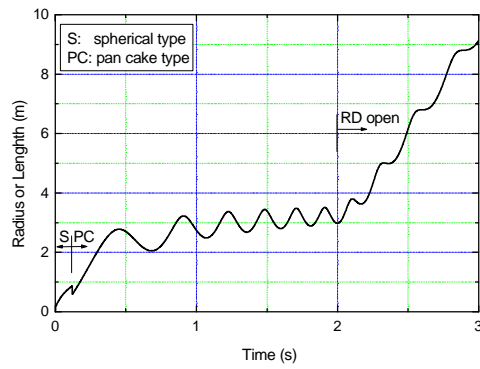


그림 11. Size variation of the reaction zone ( $CG=12.5m^3, RD=16bar$ )

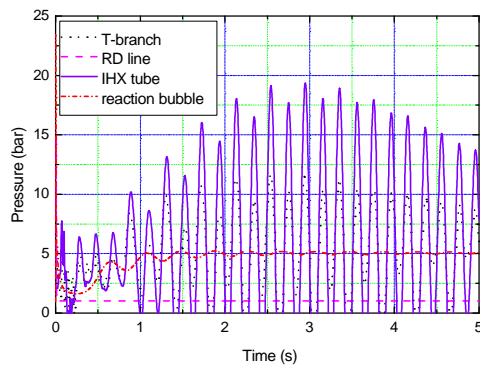


그림 12. SWR early pressure variations ( $CG=9.0m^3, RD=15bar$ )

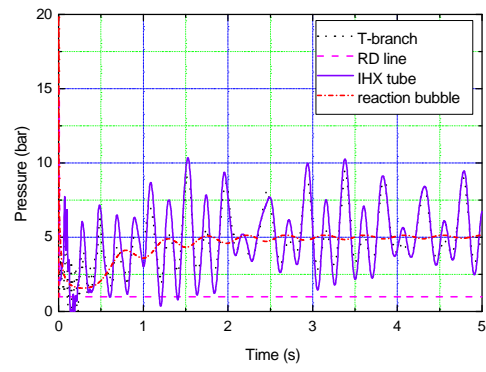


그림 13. SWR early pressure variations (CG=12.5m<sup>3</sup>,RD=15bar)

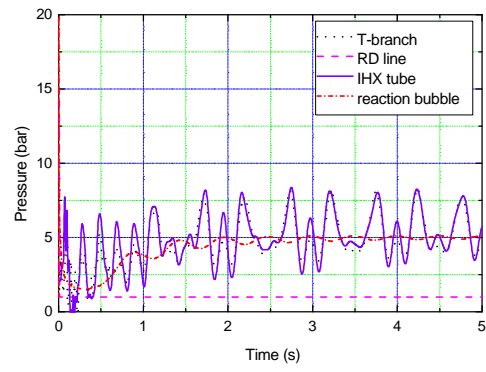


그림 14. SWR early pressure variations (CG=15.0m<sup>3</sup>,RD=15bar)