

## 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통 성능 해석 연구

박선희<sup>†</sup> · 한지웅

한국원자력연구원 SFR계통설계부  
34057 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
(2018년 6월 15일 접수, 2018년 8월 28일 수정본 접수, 2018년 8월 31일 채택)

### Investigation on Performance Analysis of Sodium-Water Reaction Pressure Relief System of Prototype Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactor

Sun Hee Park<sup>†</sup> and Ji-Woong Han

SFR System Design Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34057, Korea  
(Received 15 June 2018; Received in revised form 28 August 2018; accepted 31 August 2018)

#### 요 약

본 연구는 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통의 성능 해석을 목적으로 한다. 증기발생기의 전열관 파단에 의한 대규모 물 누출 사고 발생 시, 증기발생기 전열관 내측의 물을 급수덤프탱크로 배출하고 전열관 외측의 소듐 및 반응생성물을 소듐덤프탱크로 배출 할 때 유체의 거동을 해석하여 계통 설계요건의 적절성을 평가하였다. 증기발생기 셸 측의 액체와 중간열전달계통 내 소듐이 모두 배출되는데 소요되는 시간은 약 50초이고, 증기발생기 전열관 측의 급수가 모두 배출되는데 소요되는 시간은 약 2.5초로 계산되었다. 증기발생기와 중간열전달계통 내 유체가 덤프탱크로 배출되는 동안 전열관 측의 압력은 셸 측의 압력보다 높게 유지되어 셸 측의 소듐이 전열관 측으로 역류하는 현상은 없는 것으로 해석되었다. 본 연구의 결과는 SFR 원형로 소듐-물반응압력완화계통의 성능 평가에 대한 기초 자료로 활용할 예정이다.

**Abstract** – We carried out performance analysis of Sodium-Water Reaction Pressure Relief System of Prototype Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactor. We analyzed transient-dynamic behavior of fluids inside the steam generator to vent into a sodium dump tank or a water dump tank when tubes in the steam generator were broken to cause a large-water-leak accident. Accordingly, we preliminarily evaluated design requirements of our system. Our results showed that sodium in the shell side of the steam generator and in Intermediate Heat Transport System was completely vented within 50 s and feed water in the tube side of the steam generator was completely vented within 2.5 s. It was analyzed that pressure of the tube side of the steam generator was higher than pressure of the shell side of the steam generator, which showed that sodium in the shell side did not flow into the tube side. Our results are expected to be used as basis information to performance analysis of Sodium-Water Reaction Pressure Relief System of Prototype Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactor.

**Key words:** Sodium-cooled Fast Reactor, Sodium-Water Reaction, Pressure Relief System, Performance Analysis

#### 1. 서 론

소듐냉각고속로 원형로(Prototype Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactor, PGSFR, SFR 원형로)는 경수로에서 발생하는 고준위 사용후핵연료 물질을 연소시켜 독성 및 부피를 저감하고 최종 사용후핵연료 처분장 소요면적의 축소 및 관리기간의 단축 등의 장점이

있는 원자로이다[1-5]. 하지만 소듐-물 반응(sodium-water reaction, SWR)과 소듐화재 등에 대한 우려로 인해 공공 수용성이 부족한 측면이 있다. 소듐-물 반응이란 증기발생기(steam generator, SG) 내 전열관이 손상되거나 파단되었을 때 전열관 내의 물이나 증기가 소듐 측으로 누출되어 수산화소듐, 산화소듐, 수소 등이 생성되는 반응을 일컫는다. 반응생성물 중 급격하게 발생하는 수소에 의한 압력파로부터 일차열전달계통(Primary Heat Transport System, PHTS)의 냉각재 경계 건전성을 유지하고 추가적인 소듐-물 반응을 차단하는 것이 필요하다. 따라서 압력 완화 및 증기발생기 내 유체 배출 역할을 수행하는 소듐-물반응압력완화계통(Sodium-Water Reaction Pressure Relief System, SWRPRS)의 설계요건에 대한 성능해석이 중요하다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sunheepark@kaeri.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

증기발생기 전열관 파단에 물 또는 증기 누출로 발생하는 소듐-물 반응에 대한 연구는 기존에 보고된 바 있으나, 대부분의 연구가 사고 초기 약 1초 이내에 중간열전달계통(Intermediate Heat Transport System, IHTS), 중간열교환기(Intermediate Heat Exchanger, IHX) 등으로의 압력과 전달을 해석한 것이다[6-10]. 증기발생기 내 소듐, 반응생성물, 물 등의 배출에 관한 연구가 일부 수행된 바 있으나 주로 셀 측의 유체를 배출하는 연구였고[11,12], 셀 측과 전열관 측 내의 모든 유체 배출에 대한 해석 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 상용 열수력 해석 소프트웨어인 FloMASTER을 이용하여 SFR 원형로의 증기발생기에서 대규모 물 누출 사고 발생 시, 유체 배출에 대한 해석 및 설계인자에 대한 타당성 검토를 목적으로 한다.

## 2. 소듐-물반응압력완화계통

소듐-물반응압력완화계통의 구성은 Fig. 1과 같고, SFR 원형로의 안전관련 설계기준사건 중 하나인 ‘증기발생기 전열관 5개 양단파단에 의한 대형누설 사고’에 대비하여 계통을 설계한다. 계통의 운전

절차는 다음과 같다[5].

- 증기발생기 전열관 파단에 의해 전열관 내 물이 전열과 셀 측의 소듐으로 누출
- 소듐-물 반응에 의해 수소가 급격하게 발생하여 증기발생기 셀 측 및 중간열전달계통 배관의 압력이 상승
- 증기발생기의 고온관 노즐과 저온관 노즐의 인접한 곳에 각각 설치된 고온관 파열관(C1)과 저온관 파열관(C2)의 파열 설정압력을 초과하여 파열관이 자동 개방
- 개방된 고온관 및 저온관 파열관과 소듐 배출배관(L1, L2)을 통해 증기발생기 셀 측의 소듐과 반응생성물은 소듐덤프탱크(C3)로 배출
- 소듐덤프탱크로 배출된 반응생성물 중 수소는 소듐덤프탱크의 충전가스인 아르곤과 혼합
- 소듐덤프탱크 내 압력이 배압파열관(C4)의 파열 설정압력에 도달하면 배압파열관이 개방되면서 수소·아르곤 혼합가스는 기액분리기(C5), 수소점화기(C6), 기액분리기 연결배관(L3), 가스 방출배관(L4)을 거쳐 외기로 방출
- 저온관 파열관이 미개방 될 경우, 저온관에 설치된 배관(L5)의 격리밸브(V1)를 개방해 계통 내 소듐 및 반응생성물을 배출

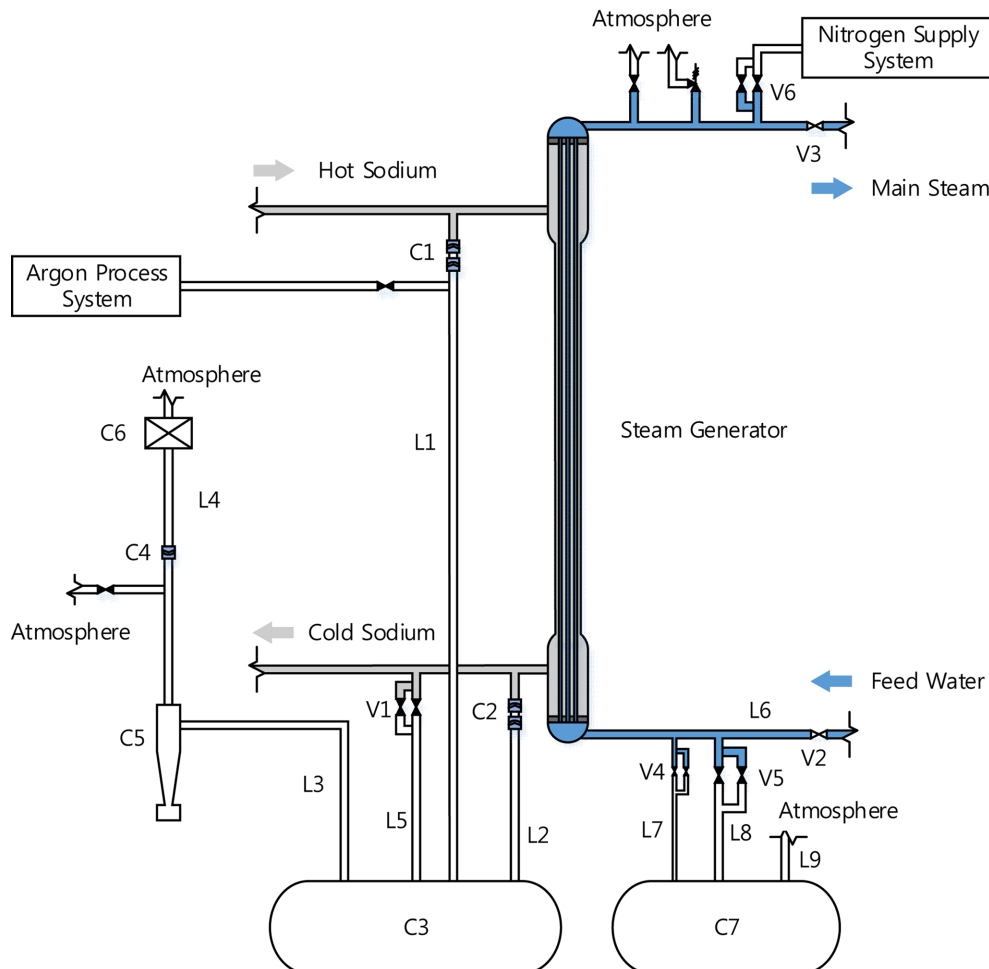


Fig. 1. Schematic diagram of SWRPRS [5]. Component (C): Hot Leg Rupture Disk (C1), Cold Leg Rupture Disk (C2), Sodium Dump Tank (C3), Back Pressure Rupture Disk (C4), Gas-Liquid Separator (C5), Hydrogen Igniter (C6), and Water Dump Tank (C7). Line (L): Hot Leg Sodium Dump Line (L1), Cold Leg Sodium Dump Line (L2), Gas-Liquid Separator Connection Line (L3), Back Pressure Rupture Disk Gas Vent Line (L4), Cold Leg Sodium Dump Line (L5), Feedwater Supply Line (L6), Small Diameter SG Water Dump Line (L7), Large Diameter SG Water Dump Line (L8), and WDT Gas Vent Line (L9). Valve (V): Cold Leg Sodium Dump Line Isolation Valve (V1), Feed Water Isolation Line Valve (V2), Main Steam Line Isolation Valve (V3), Small Diameter SG Water Dump Line Isolation Valve (V4), Large Diameter SG Water Dump Line Isolation Valve (V5), and Nitrogen Supply Line Isolation Valve (V6).

- 고온관 파열판 또는 저온관 파열판의 개방신호에 의해 급수공 급펌프는 정지하고 펌프가 정지하면 급수 공급배관 격리밸브(V2)와 주증기 공급배관 격리밸브(V3)가 자동으로 차단

- 증기발생기 급수 공급배관(L6)에 설치된 물 배출배관 격리밸브(V4, V5)가 개방되어 전열관 측의 물은 물 배출배관(L7, L8)을 통해 급수덤프탱크(C7)로 배출

- 급수덤프탱크로 배출된 고온의 급수는 급수덤프탱크에서 기화되어 기체 방출배관(L9)을 통해 외기로 방출

- 쉘 측의 소듐 및 반응생성물이 전열관 측으로 이동하는 것을 방지하기 위해, 전열관 측 압력은 쉘 측 압력보다 항상 높게 유지해야 하므로, 전열관 측의 압력이 일정 압력 이하로 하강하면 대구경 물 배출배관 격리밸브(V5)를 차단하고 주증기 공급배관에 설치된 질소 공급배관 격리밸브(V6)를 개방해서 전열관 측으로 질소를 주입하고 소구경 물 배출배관 격리밸브(V4)의 개폐를 제어하면서 쉘 측과 전열관 측의 압력 차이를 유지하면서 계통 내 모든 유체가 원활하게 소듐덤프탱크와 급수덤프탱크로 배출되도록 운전

### 3. 소듐-물반응압력완화계통 성능해석 방법

#### 3-1. 소듐-물반응압력완화계통 모델링

증기발생기 전열관 5개 양단파단에 의한 대형누설 사고 발생 시 소듐-물반응압력완화계통의 성능을 해석하기 위해, 상용 열유체 거동 1차원 해석프로그램인 FloMASTER (Ver. 8.1.1)를 이용해 소듐-물 반응, 소듐 및 반응생성물 배출, 급수 배출 등과 관련이 있는 SFR 원형로의 계통인 SWRPRS, IHTS 등을 모델링하였다. Fig. 2는 SFR 원형로 흐름도에서 증기발생기 1기에 대한 부분만 나타낸다(본 논문의 해석영역 외 부분은 그림에서 생략함). 본 논문에서 언

급하는 직경은 모두 내경(inner diameter, ID)이다.

#### 3-1-1. 소듐 측 모델링

증기발생기의 대규모 전열관 누설 발생 시, 소듐과 소듐-물 반응 생성물의 배출과 관련이 있는 SFR 원형로 부분은 증기발생기 쉘 측, 파열판(rupture disk, RD), 소듐덤프탱크(sodium dump tank, SDT), 기액분리기(separator), 중간열전달계통 팽창탱크(expansion tank, ET), 전자펌프(electromagnetic pump, EMP), 중간열교환기 전열관 측, 배관, 증기발생기 전열관 파단부 등이다. 따라서 증기발생기 전열관 누설 사고 시 발생하는 현상을 모사하고 영향을 파악하기 위해서는 소듐-물반응압력완화계통 뿐만 아니라 중간열전달계통과 냉각재 경계인 중간열교환기를 모델링해야 한다. Fig. 3은 SFR 원형로 1 train의 소듐 측을 FloMASTER로 모델링한 것이다(기기 명칭 및 절점(node, N) 표시함).

#### 3-1-1-1. 증기발생기 쉘 측

증기발생기 쉘 측은 최상부, 상부외측원통부, 내부원통+하부의 측원통부의 세 영역의 단위부피(control volume, CV) 나누어 모델링한다(Fig. 4). Fig. 4에서 빨간색 점선으로 표시한 최상부 영역(CV1)은 전열관 상부 증기헤더(steam header) 아래 열차폐판과 최상단 전열관지지판 사이의 소듐이 차지하는 공간이다. Fig. 4에서 파란색 점선으로 표시한 상부외측원통부(CV2)는 외측원통부 안쪽과 내측원통부 바깥쪽 부분으로 증기발생기 고온관 노즐 하단부터 위쪽 유동분배관을 경계로 하는 공간으로 아래쪽 유동분배관을 포함하는 공간이다. Fig. 4에서 노란색 점선으로 표시한 내부원통+하부외측원통부(CV3)는 최상단 전열관지지판부터 증기발생기 저온관 노즐까지 소듐이 차지하는 공간으로 전열관지지판을 모두 포함

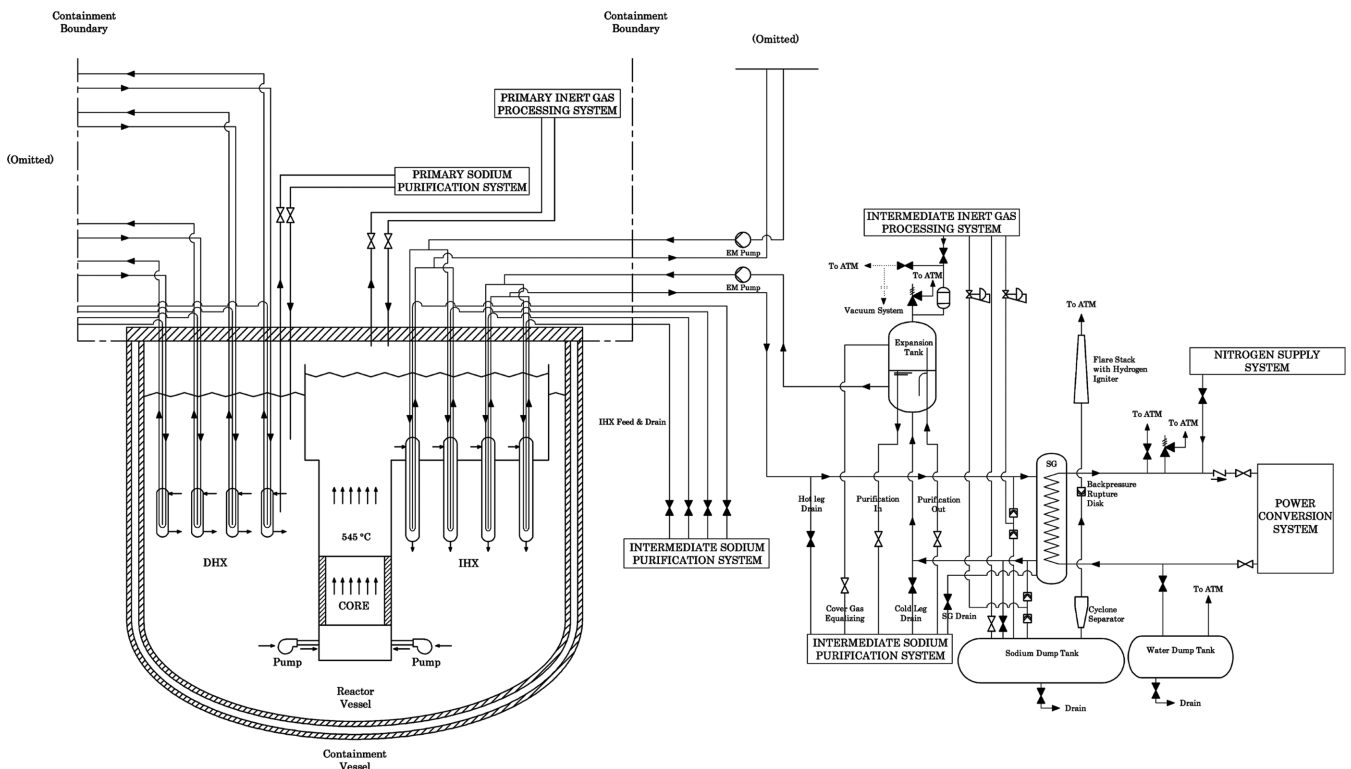


Fig. 2. Schematic diagram of PGSFR.

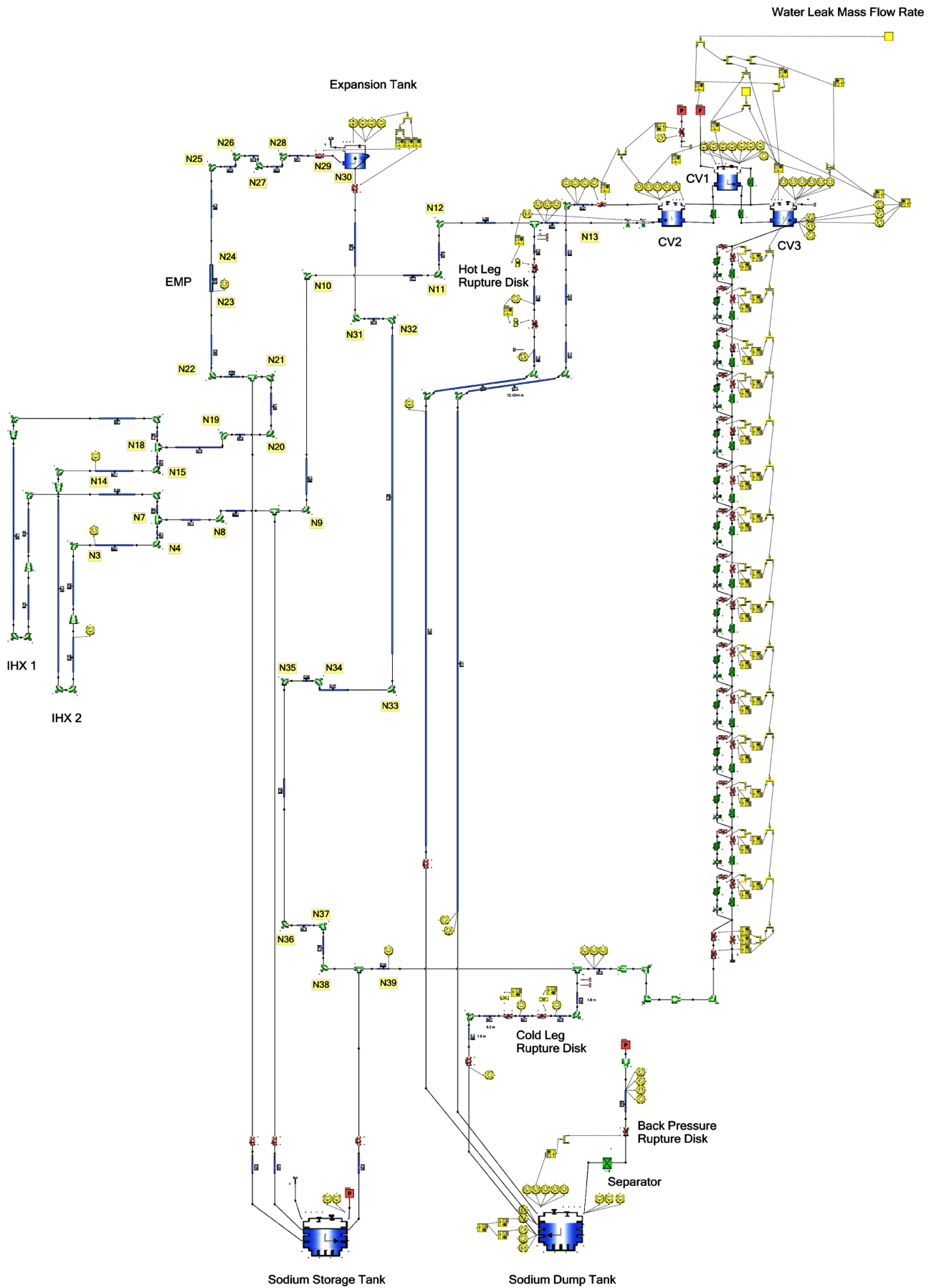


Fig. 3. FloMASTER modeling for sodium region of SWRPRS and IHTS.

한다. 최상단 전열관지지판은 CV1과 CV3의 경계면에 위치한다. 대규모 물 누출 사고 발생 시 증기 발생기 쉘 측 유체의 거동에 대한 FloMASTER 모델링 방법(CV1, CV2, CV3 연결방법 및 시나리오)은 다음과 같다.

- (1) CV1에 수소 유입(누출 물에 의해 소듐-물 반응이 발생하여 수소 생성), CV1 내 소듐은 CV2과 CV3로 이동함
- (2) CV1 내 소듐이 모두 배출되면 CV1 내 수소는 CV2와 CV3로 이동함(CV2 기체공간과 CV3 기체는 상호 이동이 가능하고 액체는 이동이 불가능함)
- (3) CV2 내 소듐이 모두 배출되면 CV2와 CV3 내 수소는 배관으로 이동함

#### 가. 최상부 영역(CV1)

최상부 영역(Fig. 4의 붉은색 점선 네모)인 CV1은 FloMASTER의 'Fuel Tank (4Arm)' 부품을 사용하여 모델링한다. CV1의 높이는 0.78 m, 기준면으로부터 CV1 바닥까지의 높이는 22.9185 m, 단면적은  $1.96 \text{ m}^2$ , 초기압력은 1.0 bar, 초기소듐높이는 0.77 m, 초기소듐온도는  $528^\circ\text{C}$ , 'Polytropic Index'는 등온조건인 경우 1.0으로 설정하고 가역조건인 경우 1.41로 설정한다. 전열관이 누설된 부위는 소듐, 물, 반응생성물이 극심하게 혼합이 일어나므로, 완전 혼합현상(perfect mixing)이 일어난다고 가정하여 쉘 측의 모든 유체의 온도는 동일하다고 설정한다.

소듐-물 반응 생성열에 의한 CV1의 상승온도를 구하는데 필요한 'Thermal Capacity'의 질량 입력값은 전열관 무게로 설정하고 소듐액위에 따른 구조물과의 접촉 면적을 입력한다('Thermal Capacity'는 구조물의 질량을 의미한다. 유체의 상승온도를 보수적으로 계산하기 위해 증기발생기 외벽으로의 열전달은 매우 작다고 가정함).

- 소듐 이동 경로 모델링: 소듐의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 CV1에서 CV2와 CV3로 연결되는 부분의 면적 및 CV1 바닥에서 부터의 높이를 'Liquid Branch Data'에 입력한다. CV1에서 CV2와 CV3로 연결되는 부분은 Branch No. 3과 Branch No. 4으로 각각 설정한다. Branch No. 3과 Branch No. 4 각각의 면적은  $0.92 \text{ m}^2$ ,  $0.74 \text{ m}^2$ 이다. CV2와 CV3 모두 CV1의 바닥에서 연결되므로 Branch No. 3과 Branch No. 4 높이는 모두 0 m로 설정한다.

- 가스 이동 경로 모델링: 가스의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 CV1에서 CV2와 CV3로 연결되는 부분의 면적을 'Gas Branch Data'에 입력한다. 전열관 누설에 의한 소듐-물 반응 생성물인 수소를 모델링하기 위해 Branch No. 1에 수소의 입력을 연결한다. 수소는 Branch No. 1으로 들어와 Branch No. 2를 통해 CV2와 CV3로 연결된다. Branch No. 2의 단면적은 CV1의 단면적과 동일하게  $1.76 \text{ m}^2$ 이지만 최대 입력가능값이  $1 \text{ m}^2$ 이므로  $1 \text{ m}^2$ 로 설정한다. 가스의 압축성을 고려하기 위해 'Gas Model - Compressible'은 'Yes'로 설정한다.

#### 나. 상부외측원통부 영역(CV2)

상부외측원통부 영역(Fig. 4의 파란색 점선 네모)인 CV2는 'Fuel Tank (4Arm)' 부품을 사용해 모델링하고, 약 50% 공극률(porosity)의 유동분배판은 'Sharp-edged Orifice (standard orifice plate)' 부품을 CV2에 연결하여 모델링한다. CV2의 높이는 3.165 m, 기준면으로부터 CV2 바닥까지의 높이는 19.7535 m, 등가단면적은  $0.92 \text{ m}^2$ ,

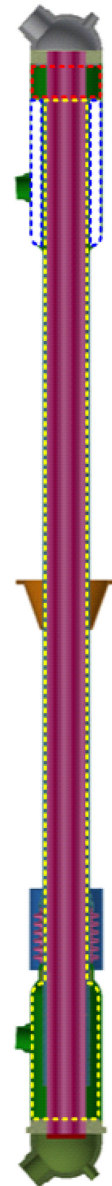


Fig. 4. Control volume of the SG (red dash box: CV1, blue dash box: CV2, yellow dash box: CV3).

초기압력은 1.0 bar, 초기소듐높이는 3.164 m, 초기소듐온도는  $425^\circ\text{C}$ , 'Polytropic Index'는 등온조건인 경우 1.0으로 설정하고 가역조건인 경우 1.41로 설정한다.

- 소듐 이동 경로 모델링: 소듐의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 CV2에서 CV1과 중간열전달계통 고온관으로 연결되는 부분의 면적 및 CV2 바닥에서 부터의 높이를 'Liquid Branch Data'에 입력한다. CV2에서 CV1과 고온관으로 연결되는 부분은 Branch No. 3과 Branch No. 4으로 설정한다. 각각의 면적은  $0.92 \text{ m}^2$ ,  $0.22 \text{ m}^2$ 이다. CV1은 CV2의 가장 윗면에서 연결되므로 CV1의 높이는 CV2의 높이와 동일한 3.165 m이고, 고온관 노즐의 높이는 CV2 바닥면에서부터 1 m로 설정한다.

- 가스 이동 경로 모델링: 가스의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 CV2에서 CV1과 중간열전달계통 고온관으로 연결되는 부분의 면적을 'Gas Branch Data'에 입력한다. CV2와 CV1이 연결되는 부분을 Branch No. 1, CV2와 유동분배판으로 연결되는 부분은

Branch No. 2로 설정한다. Branch No. 1의 단면적은 CV2의 단면적과 동일하게  $0.92 \text{ m}^2$ 이고 Branch No. 2의 단면적은 중간열전달계통 고온관의 단면적과 동일한  $0.22 \text{ m}^2$ 이다. 가스의 압축성을 고려하기 위해 'Gas Model - Compressible'은 'Yes'로 설정한다.

유동분배관 2개는 실제로는 증기발생기 상부외측원통부 내에 설치되지만, FloMASTER에서 'Fuel Tank' 부품 안에 설치되는 것으로 모델링할 수 없으므로 CV2와 고온관 사이에 존재하는 것으로 모델링한다. 유동분배관은 유체의 유동 관점에서 압력손실로 작용하므로, 유동분배관을 CV2와 저온관 사이에 위치시킴으로써 CV2 내 유체가 배출되는데 압력손실 역할을 할 수 있도록 한다. 'Sharp-edged Orifice'의 입력값인 'Pipe Diameter'는 고온관 직경과 동일하게  $0.527 \text{ m}$ 로 설정하고, 'Orifice Diameter'는 유동분배관의 공극률을 고려해 설정한다.

#### 다. 내부원통+하부외측원통부 영역(CV3) 및 전열관지지원

내부원통과 하부외측원통부를 합한 영역(Fig. 4의 노란색 점선 네모)인 CV3는 'Fuel Tank (4Arm)' 부품을 사용해 모델링하고, 전열관지지판은 'Sharp-edged Orifice'를 CV3에 연결하여 모델링한다. CV3의 높이는  $24.6 \text{ m}$ , 기준면으로부터 CV3 바닥까지의 높이는  $-1.6815 \text{ m}$ ,  $0 \sim 2.96 \text{ m}$ 까지 높이의 등가면적은  $1.96 \text{ m}^2$ ,  $2.96 \sim 24.6 \text{ m}$ 까지 높이의 등가면적은  $0.74 \text{ m}^2$ 로 설정한다. 초기압력은  $1.0 \text{ bar}$ , 초기소듐높이는  $24.599 \text{ m}$ , 초기소듐온도는  $425^\circ\text{C}$ , 'Polytropic Index'는 등온조건인 경우  $1.0$ 으로 설정하고 가역조건인 경우  $1.41$ 로 설정한다. CV3의 상승온도를 구하는데 필요한 'Thermal Capacity'의 질량은 하부외측원통부의 전체 질량과 전열관과 내부원통부의  $10 \text{ m}$ 에 해당하는 질량인  $21654 \text{ kg}$ 으로 가정한다.

- 소듐 이동 경로 모델링: 소듐의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 CV3에서 CV1과 중간열전달계통 저온관으로 연결되는 부분의 면적 및 CV3 바닥에서부터의 높이를 'Liquid Branch Data'에 입력한다. CV3에서 CV1과 전열관지지판으로 연결되는 부분은 Branch No. 3와 Branch No. 4으로 각각 설정한다. Branch No. 3와 Branch No. 4 면적은  $0.74 \text{ m}^2$ 로 동일하다. CV1은 CV3의 가장 윗면에서 연결되므로 CV1의 높이는 CV3의 높이와 동일한  $24.6 \text{ m}$ 이고, 저온관 노즐의 높이는 CV3 바닥면에서부터  $1.6815 \text{ m}$ 로 설정한다.

- 가스 이동 경로 모델링: 가스의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 CV3에서 CV1과 중간열전달계통 저온관으로 연결되는 부분의 면적을 'Gas Branch Data'에 입력한다. CV3와 CV1이 연결되는 부분을 Branch No. 1, CV3와 전열관지지판으로 연결되는 부분은 Branch No. 2로 설정한다. Branch No. 1의 단면적은 CV3 위쪽(내부원통)의 단면적과 동일하게  $0.74 \text{ m}^2$ 이다. Branch No. 2는 실제로는 중간열전달계통 저온관과 연결되지만 소듐-물 반응 발생 위치를 증기발생기 상부로 가정하였기 때문에 생성물인 수소가 고온관으로 모두 빠져나가는 것을 가정하여 단면적을  $0 \text{ m}^2$ 으로 설정한다. 가스의 압축성을 고려하기 위해 'Gas Model - Compressible'은 'Yes'로 설정한다.

전열관지지판은 실제로는 증기발생기 내부원통부 내에 설치되지만, FloMASTER에서 'Fuel Tank' 부품 안에 설치되는 것으로 모델링할 수 없으므로 CV3와 저온관 사이에 존재하는 것으로 모델링한다. 전열관 지지판은 유체의 유동 관점에서 압력손실로 작용하므로, 전열관 지지판을 CV3와 저온관 사이에 위치시킴으로써 CV3 내 유체가 배출되는데 압력손실 역할을 할 수 있도록 한다. 'Sharp-edged

Orifice'의 입력값인 'Pipe Diameter'는 CV3의 내부원통부의 단면적인  $0.74 \text{ m}^2$ 의 등가직경인  $0.97 \text{ m}$ 로 설정하고, 'Orifice Diameter'는 전열관지지판 유동공의 면적을 단일 유동공으로 가정했을 때의 직경으로 설정한다. 소듐의 액위가 하강함에 따라 통과하는 전열관지지판의 수량이 감소하는 것을 모델링하기 위해, CV3의 소듐액위가 전열관지지판 각각의 높이보다 작아질 때마다 소듐의 흐름경로를 변경하여 'Sharp-edged Orifice' 부품을 지나지 않도록 설정한다.

#### 3-1-1-2. 파열판

증기발생기의 고온관 노즐과 저온관 노즐 외부 분기관 하단에 설치하는 파열판은 'Valve', 'Recorder' 부품을 사용하여 모델링 한다. 우선 'Valve'를 닫힌 상태로 유지하는 것을 조건으로 설정하고 파열판 바로 직전의 'Pipe'의 유체압력이 파열판 파열설정압력에 도달하면 열리도록 설정하여 파열판의 개방 기능을 모사한다. 주파열판의 설정압력은  $1.0 \text{ MPa}$ , 배압파열판의 설정압력은  $0.15 \text{ MPa}$ 이다. 파열지연시간은 'Recorder' 부품의 'Delay Time'에 입력하여 모사한다.

#### 3-1-1-3. 소듐덱프탱크

소듐덱프탱크는 'Fuel Tank(12Arm)' 부품을 사용하여 모델링한다. 소듐덱프탱크의 총 부피는 약  $170 \text{ m}^3$ 이다. 따라서 'Fuel Tank'는 높이를  $4.2 \text{ m}$ , 단면적은  $40 \text{ m}^2$ 으로 설정한다. 기준면으로부터 소듐덱프탱크 바닥까지의 높이는  $-6 \text{ m}$ , 초기압력은  $1.5 \text{ bar}$ , 초기소듐높이는  $0 \text{ m}$ , 초기온도는  $150^\circ\text{C}$ , 'Polytropic Index'는 등온조건인 경우  $1.0$ 으로 설정하고 가역조건인 경우  $1.41$ 로 설정한다. 'Thermal Capacity'의 질량 입력값은 소듐덱프탱크 구조물 무게인  $6782 \text{ kg}$ 으로 설정한다.

- 소듐 이동 경로 모델링: 소듐의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 중간열전달계통 고온관과 저온관이 소듐덱프탱크와 연결되는 곳(소듐덱프탱크 노즐)의 면적 및 소듐덱프탱크 바닥에서부터의 높이를 'Liquid Branch Data'에 입력한다. 중간열전달계통 고온관과 저온관에서 소듐덱프탱크로 연결되는 부분은 Branch No. 12와 Branch No. 11으로 설정한다. 각 노즐의 면적은  $0.22 \text{ m}^2$ ,  $0.22 \text{ m}^2$ 이다. 소듐덱프탱크 노즐은 소듐덱프탱크 최상단에서 중간열전달계통 고온관과 저온관으로 연결되므로 소듐덱프탱크 바닥에서부터 높이는 모두  $4.2 \text{ m}$ 이다.

- 가스 이동 경로 모델링: 소듐의 이동경로를 모델링하는데 필요한 정보인 중간열전달계통 고온관과 소듐덱프탱크로 연결되는 부분과 기액분리기에서 소듐덱프탱크로 연결되는 부분의 면적을 'Gas Branch Data'에 입력한다. 각각 Branch No. 2와 Branch No. 1으로 설정한다. 각각의 면적은  $0.22 \text{ m}^2$ ,  $0.13 \text{ m}^2$ 이다. 가스의 압축성을 고려하기 위해 'Gas Model - Compressible'은 'Yes'로 설정한다.

#### 3-1-1-4. 기액분리기

기액분리기는 'Discrete Loss' 부품을 사용하여 모델링한다. 기액분리기는 소듐덱프탱크방출가스의 압력손실 인자로 작용하므로 'Forward Pressure Loss vs. Velocity'에 Shepherd and Lapple 압력손실 상관식을 입력한다[13].

#### 3-1-1-5. 중간열전달계통 팽창탱크

중간열전달계통 팽창탱크는 'Reservoir(3Arm)' 부품을 사용하여

모델링한다. 'Branch 1 Pipe Diameter', 'Branch 2 Pipe Diameter', 'Branch 3 Pipe Diameter'는 모두 중간열전달계통 배관 직경인 0.527 m로 설정한다. 펌창탱크 바닥에서부터 커버그스 배관의 높이인 'Branch 1 Height above Base'는 5 m, 중간열전달계통 저온관의 소뚝이 유입되는 배관의 높이인 'Branch 2 Height above Base'의 높이는 0 m, 전자펌프 쪽으로 연결되는 배관의 높이인 'Branch 3 Height above Base'의 높이는 2.5 m로 설정한다. 펌창탱크의 세로 길이(높이)인 'Height of Top Above Base'는 5 m이고 기준면에서부터 펌창탱크 바닥까지의 높이는 23.2085 m이다. 커버그스압력인 'Surface Pressure'는 1.5 bar, 초기소뚝높이인 'Initial Liquid Level'은 4 m, 초기소뚝온도인 'Initial Inside Temperature'는 322 °C이다.

#### 3-1-1-6. 전자펌프

전자펌프는 유체 유동 측면에서 보면 환형 배관과 유사하고 압력 손실에만 영향을 끼치므로 'Annular Pipe' 부품을 사용하여 모델링한다. 'Annular Pipe' 부품의 입력값인 'Outer Diameter'는 0.527 m, 'Inner Diameter'는 0.322 m, 'Eccentricity'는 0 m, 'Length'는 1.854 m, 'Absolute Roughness'는 0.0045 mm이다.

#### 3-1-1-7. 중간열교환기 전열관 축

중간열전달계통 루프 1개에 2기씩 설치하며 중간열전달계통 저온관과 고온관 사이에 있는 중간열교환기는 'Cylindrical Elastic Pipe', 'Circular Bend', 'Gradual Transition' 부품을 사용하여 모델링한다. 구체적으로는 중간열전달계통 저온관과 연결되는 부분(내경 0.527 m, 굽은 반경비 1.589 m), 유로 축소부(상단 입구부 0.527 m, 하단 출구부 0.381 m, 길이 0.504 m), 저온소뚝 하강부(내경 0.381 m, 길이 11.796 m), 전열관 하부 급수챔버(feedwater chamber, 내경 0.381 m, 0.603 m), 전열관 1512개(등가내경 0.603 m, 길이 4.85 m), 상부수집부(하단 입구부 1.261 m, 상단 출구부 0.642 m, 길이 0.724), 중간열전달계통 고온관 연결되는 부분(내경 0.527 m, 굽은 반경비 1.589 m)으로 나누어 모델링한다.

#### 3-1-1-8. 배관 배치

소뚝 축 배관에 대한 모델링은 증기발생기에서 소뚝덤프탱크로 배출되는 배관에 대한 설계값과 중간열전달계통 배관의 설계값을 입력한다(정확한 설계수치는 생략함). 배관 배치는 Fig. 3을 참고한다. 배관 직경은 0.527 m이다.

#### 3-1-1-9. 증기발생기 전열관 파단부

증기발생기의 파단된 전열관 부위를 통해 전열관 내의 물이 셸 측으로 누출되어 소뚝-물 반응이 일어나고 수소, 수산화소뚝 등의 반응생성물이 발생한다. 따라서 증기발생기 전열관 파단부의 소뚝 측으로 누출되는 물 양을 입력값으로 고려하여 소뚝-물 반응에 의한 수소 발생량을 계산한다. 물 누출량은 전열관 내외의 압력 차이 등을 고려하여 FloMASTER에서 계산되고, 수소 발생량은 소뚝-물 반응에서 물에 대한 수소의 양론비(stoichiometric ratio)로 계산된다. 소뚝 물 반응에 대한 상세한 내용은 '3-2. 소뚝-물 반응 모델링'에 기술하였다.

#### 3-1-2. 물 측 모델링

증기발생기 전열관의 대규모 누설 사고 발생 시, 급수 및 증기 배

출과 관련이 있는 부분은 증기발생기 전열관 측, 급수덤프탱크, 배관 등이다. Fig. 5는 SFR 원형로 1 train의 물 측을 FloMASTER로 모델링한 것이다. FloMASTER 부품 중 증기발생기 전열관 파손 사고 시 증기발생기 물 측에서 발생하는 현상인 물 누출, 감압에 따른 급수 증발, 급수·증기·질소 배출을 모델링할 수 있는 부품이 없다. 따라서 본 연구에서는 물 측 모델링을 위해, 증기발생기 전열관 측과 급수덤프탱크에 대해 dll 파일을 제작하여 FloMASTER에 삽입해 계산을 수행하였다.

#### 3-1-2-1. 증기발생기 전열관 측과 급수덤프탱크

증기발생기 전열관 측을 여러 개의 단위 영역(control volume, CV)으로 나누어, 증기(steam, STM), 급수(feed water, FW), 질소가 셸 측으로 누출되고 급수덤프탱크로 배출되고 전열관 내의 압력 하강에 의해 급수가 증발하는 것 등의 과도거동을 해석하였다.

정상운전 중, 증기발생기 하부로 공급되는 급수는 급수챔버(Feed Water Chamber, FWC)를 거쳐 전열관을 통과하는 동안 셸 측의 소뚝 측에서 전달되는 열에 의해 기화되어 상부의 증기헤더(Steam Header, STMH)를 거쳐 나간다. 본 연구에서 증기발생기 내의 급수 및 증기의 배출 현상을 모델링한 방법은 다음과 같다.

- 정상운전 증기발생기 전열관 내에서 증기의 quality가 0.5인 곳을 계면으로 설정하여 하부는 급수가 가득 차 있고, 상부는 증기로 가득 차 있다고 가정한다. 이렇게 가정할 경우, 실제 증기발생기 전열관 내 급수의 총질량은 0.80 ton에서 0.84 ton으로 증가하고(오차 5%), 급수의 총부피는 1.16 m<sup>3</sup>에서 1.15 m<sup>3</sup>으로 감소한다(오차 1%).

- 증기의 총질량과 총에너지량을 계산하여, 총질량과 총에너지량이 유지되도록 증기의 평균압력, 증기의 평균온도를 계산한다.

- 급수 표면에서 급수와 증기는 동적 평형에 도달해 있다고 가정한다.

#### 가. 단위 영역 설정

단위 영역의 위치와 명칭은 다음과 같다.

- STMH: 증기발생기 증기헤더(steam header)의 기체(증기 및 질소) 영역
- CV1: 증기발생기 내 파단된 전열관의 위쪽 부분 기체 영역
- CV2: 증기발생기 내 파단된 전열관의 아래쪽 부분 증기 영역
- CV3: 증기발생기 내 파단되지 않은 전열관 전체의 기체 영역
- CV4: 증기발생기 내 파단된 전열관의 아래쪽 부분 증 급수 영역
- CV5: 증기발생기 내 파단되지 않은 전열관 전체의 급수 영역
- FWCgas: 증기발생기 급수챔버(feedwater chamber)의 기체 영역
- FWClq: 증기발생기 급수챔버의 급수 영역
- WDTgas: 급수덤프탱크의 기체 영역
- WDTliq: 급수덤프탱크의 급수 영역

CV1은 STMH와 인접해 있고 부피가 상대적으로 작으므로 CV1과 STMH를 합하여 하나의 단위부피로 설정한다(STMH≈STMH+CV1). 증기와 질소는 단위 영역 안에서 균일하게 섞인다고 가정한다. 급수는 비압축성 유체로 증기와 질소는 압축성 유체로 가정한다. 아래 식들에서 변수에 대한 설명은 'Nomenclature'를 참고한다.

#### 나. 질량 보존식

$$\frac{dm_{i,STMH}}{dt} = -\dot{m}_{i,STMH \rightarrow shell} - \dot{m}_{i,STMH \rightarrow atm} + \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow STMH} \quad (i: STM, N_2)$$

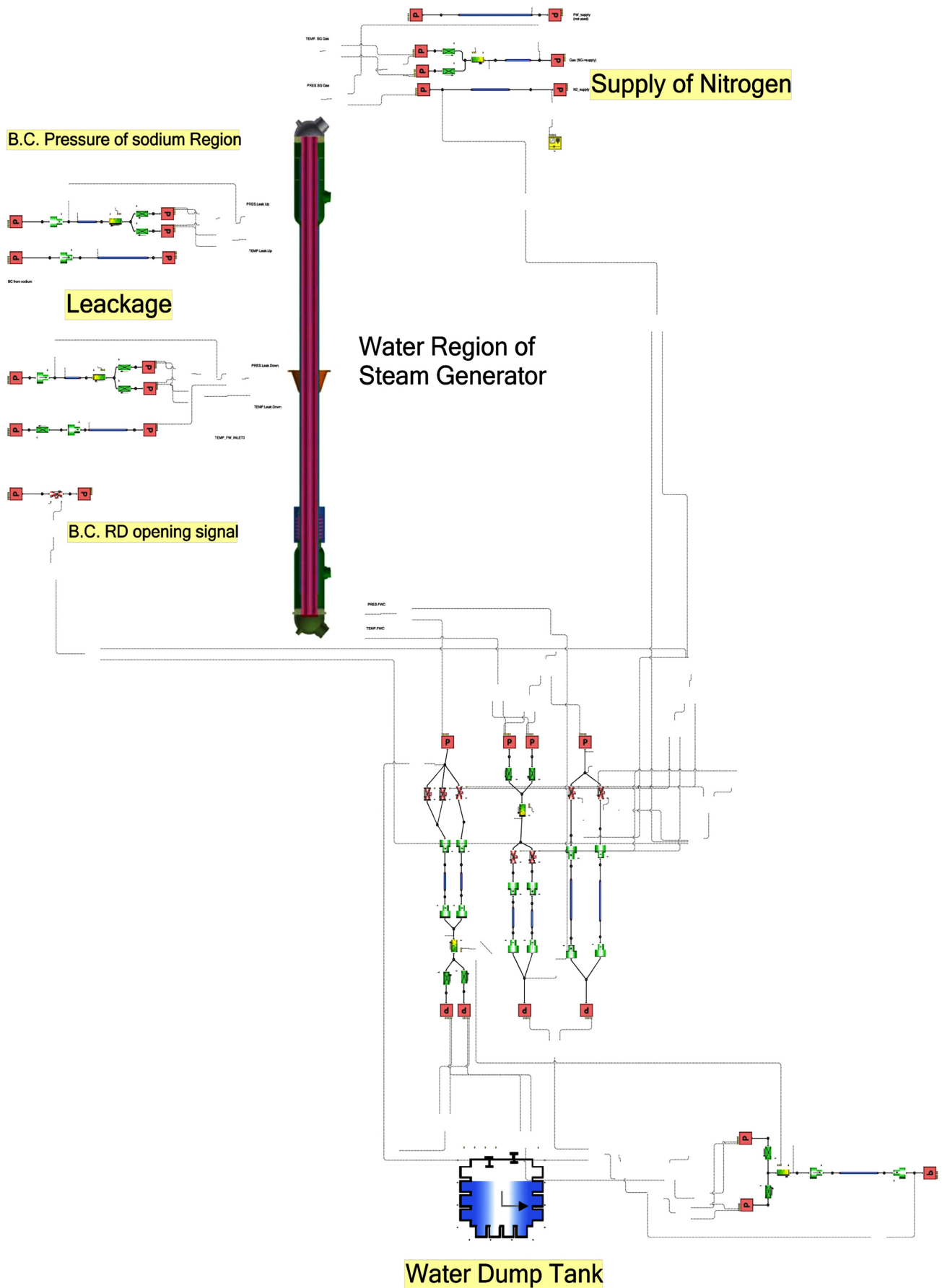


Fig. 5. FloMASTER modeling for water region of SWRPRS and IHTS.

$$\frac{dm_{i,CV2}}{dt} = -\dot{m}_{i,CV2 \rightarrow shell} - \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} + \dot{m}_{evapor,CV4 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV2}$$

$$\frac{dm_{i,CV3}}{dt} = -\dot{m}_{i,CV3 \rightarrow shell} - \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} + \dot{m}_{evapor,CV5 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV3}$$

$$\frac{dm_{FW,CV4}}{dt} = -\dot{m}_{FW,FWC_{gas} \rightarrow CV4} - \dot{m}_{evapor,CV4 \rightarrow CV2}$$

$$\frac{dm_{FW,CV5}}{dt} = -\dot{m}_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{gas}} - \dot{m}_{evapor,CV5 \rightarrow CV3}$$

$$\frac{dm_{i,FWC_{gas}}}{dt} = -\dot{m}_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} - \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} + \dot{m}_{i,FWC_{gas} \rightarrow WDT_{gas}}$$

$$\frac{dm_{FW,FWC_{gas}}}{dt} = -\dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} - \dot{m}_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}} + \dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}} - \dot{m}_{evapor,FWC_{liq} \rightarrow FWC_{gas}}$$

$$\frac{dm_{i,WDT_{gas}}}{dt} = -\dot{m}_{i,FWC_{gas} \rightarrow WDT_{gas}} - \dot{m}_{i,WDT_{gas} \rightarrow atm} + \dot{m}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}}$$

$$\frac{dm_{FW,WDT_{liq}}}{dt} = -\dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}} - \dot{m}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}}$$

다. 에너지 보존식

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\sum \dot{m}_{i,STMH} C_{v,i} T_{i,STMH}) &= -\sum \dot{m}_{i,STMH \rightarrow shell} C_{p,i} dT_{i,STMH \rightarrow shell} \\ &- \sum \dot{m}_{i,STMH \rightarrow atm} C_{p,i} dT_{i,STMH \rightarrow atm} \\ &+ \sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow STMH} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow STMH} \quad (i: STM, N_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\sum \dot{m}_{i,CV2} C_{v,i} T_{i,CV2}) &= -\sum \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow shell} C_{p,i} dT_{i,CV2 \rightarrow shell} \\ &- \sum \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} \\ &+ \dot{m}_{evapor,CV5 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV3} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\sum \dot{m}_{i,CV3} C_{v,i} T_{i,CV3}) &= -\sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow STMH} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow STMH} \\ &- \sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} \\ &+ \dot{m}_{evapor,CV5 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV3} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_{FW,CV4} C_{v,FW} T_{FW,CV4}) &= \dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} C_{p,FW} dT_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} \\ &- \dot{m}_{evapor,CV4 \rightarrow CV2} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_{FW,CV5} C_{v,FW} T_{FW,CV5}) &= -\dot{m}_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}} C_{p,FW} dT_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}} \\ &- \dot{m}_{evapor,CV5 \rightarrow CV3} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\sum \dot{m}_{i,FWC_{gas}} C_{v,i} T_{i,FWC_{gas}}) &= \sum \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} \\ &+ \sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} \\ &- \sum \dot{m}_{i,FWC_{gas} \rightarrow WDT_{gas}} C_{p,i} dT_{i,FWC_{gas} \rightarrow WDT_{gas}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_{FW,FWC_{liq}} C_{v,FW} T_{FW,FWC_{liq}}) &= -\dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} C_{p,FW} dT_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} \\ &+ \dot{m}_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}} C_{p,FW} dT_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}} \\ &- \dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}} C_{p,FW} dT_{FW,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}} \\ &- \dot{m}_{evapor,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\sum \dot{m}_{i,WDT} C_{v,i} T_{i,WDT}) &= \sum \dot{m}_{i,FWC \rightarrow WDT} C_{p,i} dT_{i,FWC \rightarrow WDT} \\ &- \sum \dot{m}_{i,WDT \rightarrow atm} C_{p,i} dT_{i,WDT \rightarrow atm} + \dot{m}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_{FW,WDT} C_{v,FW} T_{i,WDT}) &= \dot{m}_{FW,FWC \rightarrow WDT} C_{p,FW} dT_{FW,FWC} \\ &- \dot{m}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}} \Delta H_{vap} \end{aligned}$$

라. 증발율

CV5 또는 FWC에서 CV3로 증발하는 물의 양은 CV5 또는 FWC 급수 표면의 포화증기압과 CV3 내 가스(증기+수소)의 압력 차이만큼 발생한다. 또한, CV4 또는 FWC에서 CV2로 증발하는 물의 양은 CV4 또는 FWC 급수 표면의 포화증기압과 CV2 내 가스의 압력 차이만큼 증발한다. 증발 후 가스의 압력과 급수표면의 포화증기압의 동적 평형에 도달하는데 소요되는 시간을 고려하기 위해 증발율( $\lambda$ )을 도입한다. 증발율은 0보다 크고 1보다 작은 값을 갖는다. 증발율이 0이면 증발이 전혀 없는 것이고, 1이면 증발이 순간적 일어나 급수의 포화증기압과 증기의 압력이 평형을 이루는데 소요되는 시간이 없는 것을 의미한다. 증발율은 실험으로 결정하는 값이므로, 본 연구에서는 증발율 값에 따른 계산 결과 차이를 고찰한다.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{evapor,CV4 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV2} &= \frac{\lambda(P_{FW,CV4}^{sat} - P_{STM+N_2,CV2})V_{STM+N_2,CV2}Z_{STM+N_2,CV2}}{RT_{STM+N_2,CV2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_{evapor,CV5 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV3} &= \frac{\lambda(P_{FW,CV5}^{sat} - P_{STM+N_2,CV3})V_{STM+N_2,CV3}Z_{STM+N_2,CV3}}{RT_{STM+N_2,CV3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_{evapor,FWC_{liq} \rightarrow FWC_{gas}} &= \frac{\lambda(P_{FW,FWC_{liq}}^{sat} - P_{STM+N_2,FWC_{gas}})V_{STM+N_2,FWC_{gas}}Z_{STM+N_2,FWC_{gas}}}{RT_{STM+N_2,FWC_{gas}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}} &= \frac{\lambda(P_{FW,WDT_{liq}}^{sat} - P_{STM+N_2,WDT_{gas}})V_{STM+N_2,WDT_{gas}}Z_{STM+N_2,WDT_{gas}}}{RT_{STM+N_2,WDT_{gas}}} \end{aligned}$$

### 3-1-2-2. 배관 배치

물 측 배관에 대한 모델링은 급수공급 배관에 대한 설계값을 입력한다.

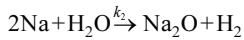
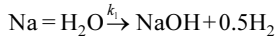
### 3-1-2-3. 증기발생기 전열관 파단부

증기발생기의 파단된 전열관 부위를 통해 전열관 내의 물이 헬 측으로 누출되어 소듐-물 반응이 일어나고 수소, 수산화소듐 등의 반응생성물이 발생한다. 이 때 물 누출량은 헬 측과 전열관 측의 압력 차이에 영향을 받으므로, 모델링할 때 헬 측의 압력을 전열관 측의 경계조건으로 설정한다. 물 누출량은 FloMASTER에서 자동 계산된다.

### 3-2. 소듐-물 반응 모델링

본 연구에서는 소듐-물 반응 시 발생하는 여러 반응 경로 중에서

가장 주된 반응을 선택하였다. 소듐-물 반응의 대표적인 전체반응(overall reaction)은 다음과 같다[7-15].



Takata 등이 transient state theory와 capture theory를 이용해 구한 반응 위 반응의 반응속도상수는 다음과 같다[8-10].

$$k_1 = 4.43 \times 10^4 \times T^{0.88} e^{-\frac{2.03 \times 10^5}{RT}}$$

$$k_2 = 4.09 \times 10 \times T^{1.33} e^{-\frac{3.24 \times 10^5}{RT}}$$

$k_1$ 과  $k_2$ 의 300~700 °C에서 값을 계산해보면  $k_1$ 은  $k_2$ 보다 약  $10^{10}$  크다. 따라서 본 논문에서는 소듐과 물의 반응은  $k_1$ 이 지배적인 것으로 가정한다. 반응  $k_1$ 의 반응열( $\Delta H^\circ$ )은 물이 액상일 경우 -35.2 kcal/mol이고, 기상일 경우 -45.0 kcal/mol이다[15].

앞에서 기술한 소듐-물 반응을 FloMASTER에 모델링하는 방법은 다음과 같다. FloMASTER는 1차원 열유동 해석 프로그램으로서 화학반응에 대한 현상을 직접적으로 모델링할 수 없다. 따라서 전열관 파손에 의한 쉘 측으로의 급수·증기 유출 시, 유출되는 급수·증기의 질량유량에 수소/물의 물질량비인 0.11과 반응  $k_1$ 의 수소/물의 반응양론비인 0.5를 곱하여 쉘 측에서의 생성되는 수소의 질량유량을 계산한다. SWAAM-II 코드에서는 쉘 측으로의 급수·증기 유입 시 생성된 수소기포 내에서 물의 물질이동 속도를 고려하여 소듐-물 반응을 모사하지만, 본 논문에서는 쉘 측으로 유입된 급수·증기는 즉각 반응(instantaneous reaction)하여 전량 수소와 NaOH로 전환된다고 보수적으로 가정한다. 반응열에 의한 소듐, 소듐-물 반응생성물, 증기발생기 구조물의 온도상승을 모델링하기 위해, 물 누출 물량에 반응  $k_1$ 의 반응열을 곱하여 증기발생기를 모델링한 FloMASTER 'Fuel Tank' 부품의 'Thermal Duty'로 입력한다.

### 3-3. FloMASTER 계산 조건

FloMASTER의 해석결과는 계산조건 설정 내용에 따라 차이가 발생하므로, 계산조건 설정 입력값을 명시해야 한다. 계산조건은 FloMASTER 화면 우측 'Network View'의 하부경로 중 'Simulation Data'에서 설정한다.

#### 가. Simulation Type

Simulation Type은 '9. Compressible Transient'로 설정한다.

#### 나. Multi Fluid Simulation

Multi Fluid Simulation은 '1. Yes'로 설정한다.

#### 다. Time Step

유체 배출 기간 계산의 Time Step은 0.005초로 설정한다.

#### 라. Ambient Conditions

Ambient Conditions의 설정은 다음과 같다.

- Ambient Temperature: 322 °C
- Ambient Pressure: 1.0 bar
- Acceleration due to Gravity: 9.80665 m/s<sup>2</sup>

#### 마. Convergence & Tolerance Criteria

Convergence & Tolerance Criteria의 설정은 다음과 같다.

- Pressure Tolerance: 0.05%
- Min. Pressure Tolerance:  $1 \times 10^{-6}$  bar
- Flow Tolerance: 0.05%
- Min. Flow Tolerance: 0.0005 kg/s
- Weighting Factor: 0.5
- Controller Tolerance: 0.05%
- Controller Weighting Factor: 0.5
- Temperature Tolerance: 0.1%
- Min. Temperature Tolerance: 0.1 K
- Enthalpy Tolerance: 0.05%
- Min. Enthalpy Tolerance: 0.01 kJ/kg
- Min. Heat Flow Tolerance: 0.01 kW
- Maximum No. of Iteration: 300
- Starting Flow Estimate: 10 kg/s
- Starting Solid Branch Heat Flow: 5 kW

## 4. 소듐-물반응압력완화계통 성능해석 결과

### 4-1. 증기발생기 내 유체 배출 소요시간

소듐-물 반응의 중단을 위해 쉘 측의 소듐, 반응생성물(수소, 수산화소듐 등)과 전열관 측의 급수·증기의 신속한 배출이 중요하다. 전열관 파단에 의한 대규모 물누출 사고 발생 시 운전 내용은 다음과 같다.

- 사고 발생 초기 파열관 개방신호에 의해 급수공급펌프는 즉시 정지하기 시작하여 완전히 정지하는데 소요시간은 5초로 가정함
- 급수 공급배관 격리밸브와 주증기 공급배관 격리밸브는 급수공급펌프 정지 후 차단됨. 밸브 차단 소요시간은 5초로 가정함
- 증기발생기 전열관 측의 압력을 쉘 측의 압력보다 높게 유지해서 쉘 측의 소듐 및 반응생성물의 전열관 측으로 이동하는 것을 방지하기 위해, 증기발생기 내 유체가 모두 배출될 때까지 질소로 0.0508 m (2 in) 배관을 통해 20 bar로 주입됨
- 증기발생기 대구경 및 소구경 물 배출배관 격리밸브는 급수공급펌프 정지 5초 후 작동하기 시작하고 개방/차단 소요시간은 대구경 밸브는 5초/2초, 소구경 밸브는 3초/1초로 가정함
- 증기발생기 증기 방출배관 격리밸브는 개방하지 않음
- 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력은 10 bar로 가정하고, 증발율은 1로 가정함(증발율에 대한 민감도 평가는 '3. 설계인자 민감도 평가'에서 수행함)
- 파열관 파열지연시간은 0.005초이고, 파열관과 중간열전달계통 분기부와의 거리는 0.5 m로 설정함

증기발생기 내 액체 배출 시 유체의 거동에 대한 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 증기발생기 쉘 측의 액체와 중간열전달계통 내 소듐이 모두 배출되는데 소요되는 시간은 약 50초이고(Fig. 6(a)), 증기발생기 전열관 측의 급수가 모두 배출되는데 소요되는 시간은 2.5초이다(Fig. 6(e)). 증기발생기와 중간열전달계통 내 유체가 배출되는 동안 전열관 측의 압력(Fig. 6(f))은 쉘 측의 압력(Fig. 6(b))보다 높게 유지되었다.

### 4-2. 설계인자 민감도 평가

급수 증발율에 따라 유체 배출시간이 달라지므로 이에 대한 민감

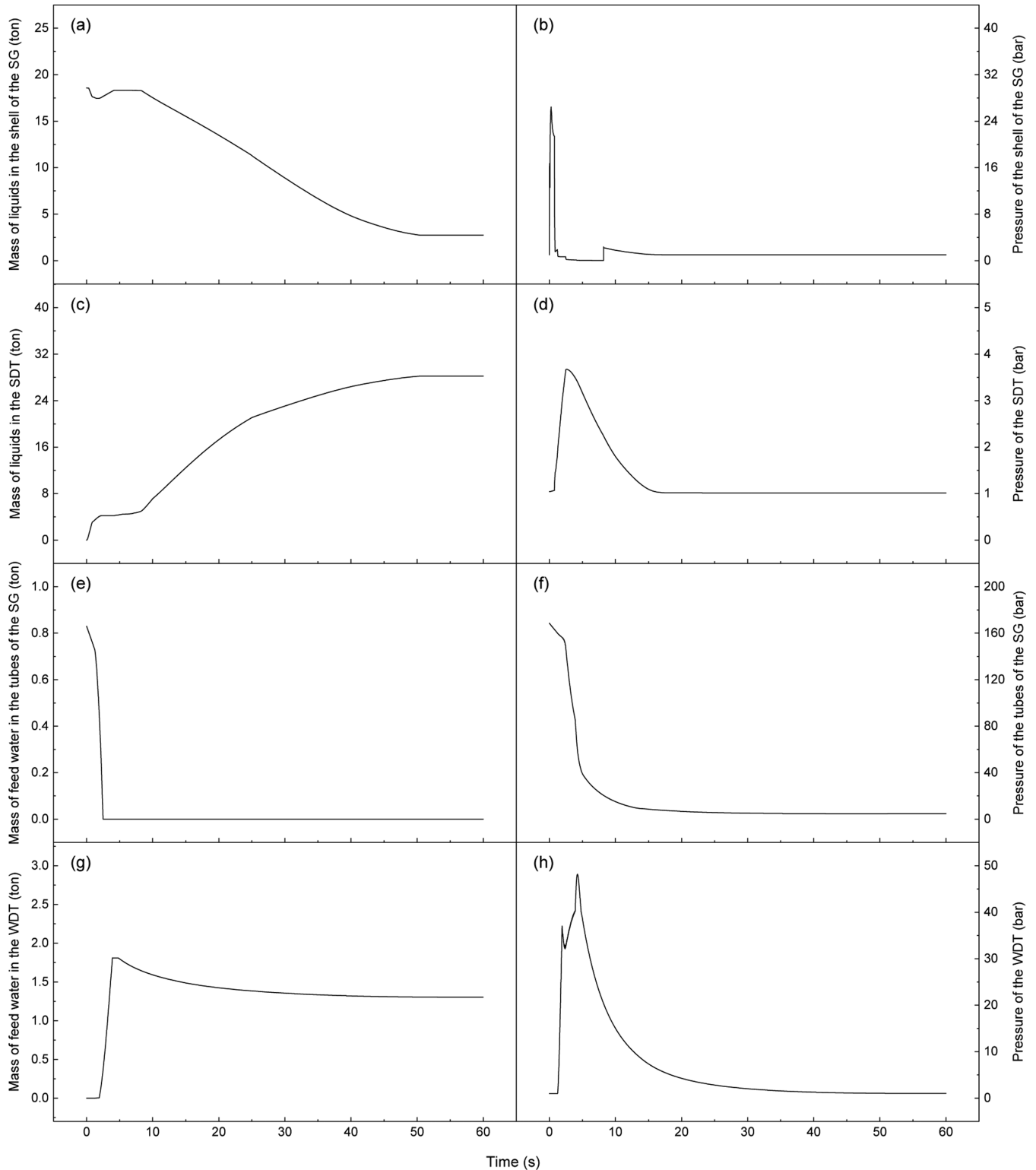


Fig. 6. Simulation results: (a) volume of liquid inside the SG shell region, (b) pressure of gas inside the SG shell region, (c) volume of liquid inside the SDT, (d) volume of liquid inside the WDT, (e) volume of liquid inside the SG tube region, (f) pressure of gas inside the SG tube region, (g) volume of liquid inside the WDT, (h) pressure of gas inside the WDT.

도 평가가 필요하다. ‘3-1-2. 물 측 모델링’에서 언급했듯이, CV5 또는 FWC에서 CV3로 증발하는 물의 양은 CV5 또는 FWC 급수 표면의 포화증기압과 CV3 내 가스(증기+산소)의 압력 차이만큼 발생한다. 또한, CV4 또는 FWC에서 CV2로 증발하는 물의 양은

CV4 또는 FWC 급수 표면의 포화증기압과 CV2 내 가스의 압력 차이만큼 증발한다. 증발 후 가스의 압력과 급수표면의 포화증기압의 동적 평형에 도달하는데 소요되는 시간을 고려하기 위해 증발율( $\lambda$ )을 도입하였다. 증발율은 0보다 크고 1보다 작은 값을 갖는다. 증

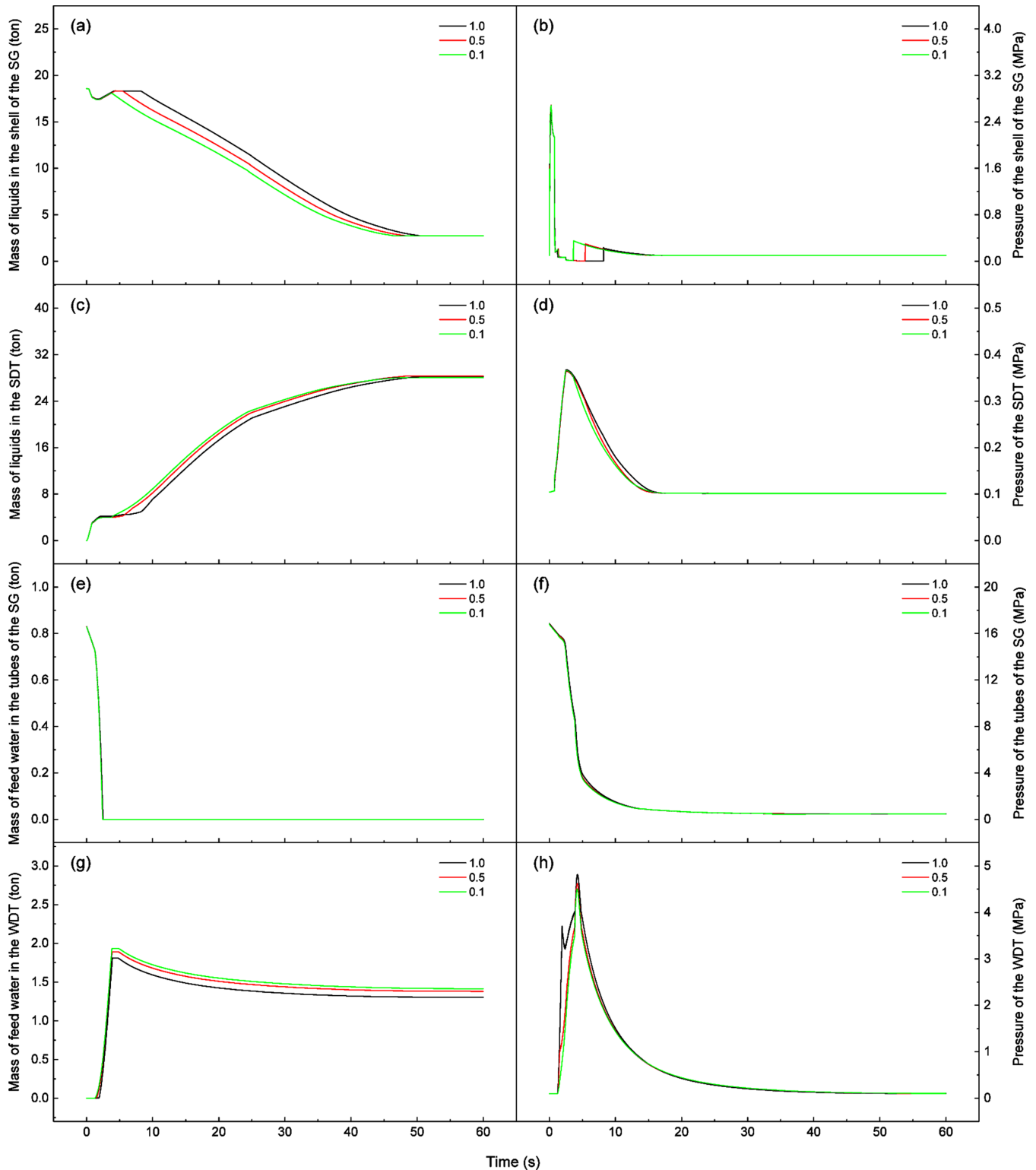


Fig. 7. Sensitivity test results of vaporization rate of water: (a) volume of liquid inside the SG shell region, (b) pressure of gas inside the SG shell region, (c) volume of liquid inside the SDT, (d) volume of liquid inside the WDT, (e) volume of liquid inside the SG tube region, (f) pressure of gas inside the SG tube region, (g) volume of liquid inside the WDT, (h) pressure of gas inside the WDT.

발열이 0이면 증발이 전혀 없는 것이고, 1이면 증발이 순간적으로 일어나 급수의 포화증기압과 증기의 압력이 평형을 이루는데 소요되는 시간이 거의 없는 것을 의미한다. 증발율은 실험으로 결정하는 값이므로, 본 연구에서는 계통의 설계요건 평가 및 성능해석을 위

해 증발율 값의 영향을 파악하였다.

전열관 측 압력의 감소 속도는 증발율에 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다(Fig. 7). 증기발생기 전열관 측 압력은 셸 측의 압력보다 높게 유지된다(Fig. 8). 이는 증발에 의한 물의 기화량의 영

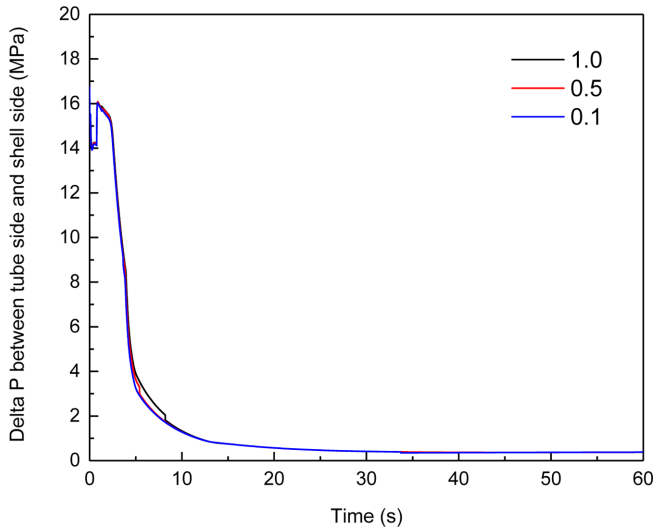


Fig. 8. Difference of SG-tube-region pressure and SG-shell-region pressure with various vaporization rate of water (see Fig. 7).

향보다 누출 및 배출의 의한 영향이 훨씬 크기 때문인 것으로 확인된다. 따라서 본 연구에서 도출한 설계인자를 적용했을 때 실제 증발율에 무관하게 전열관 측의 압력은 셸 측 압력보다 높게 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

SFR 원형로 소듐-물반응압력완화계통을 FloMASTER를 이용하여 모델링하였고, 증기발생기 전열관 파손에 의한 대규모 물 누출 사고 발생 시 유체 배출에 대한 해석을 수행하였다.

증기발생기 셸 측의 액체와 중간열전달계통 내 소듐이 모두 배출되는데 소요되는 시간은 약 50초이고, 증기발생기 전열관 측의 급수가 모두 배출되는데 소요되는 시간은 약 2.5초로 계산되었다. 증기발생기와 중간열전달계통 내 유체가 덤프탱크로 배출되는 동안 전열관 측의 압력은 셸 측의 압력보다 높게 유지되어 셸 측의 소듐이 전열관 측으로 역류하는 현상은 없는 것으로 해석되었다. 따라서 SFR 원형로 소듐-물반응압력완화계통에 대해 설정된 설계조건들은 적절한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 SFR 원형로 소듐-물반응압력완화계통의 성능 평가에 대한 기초자료로 활용할 예정이다.

## 감 사

본 연구는 과학기술정보통신부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## Nomenclature

$C_\alpha$	: mole concentration of the material i in the control volume $\alpha$
$C_{p_i}$	: specific heat capacity of the material i in constant pressure
$C_{v_i}$	: specific heat capacity of the material i in constant

	volume
$C_{p_{liq}}$	: specific heat capacity of liquid mixture in constant pressure
$C_{v_{gas}}$	: specific heat capacity of gas mixture in constant volume
$g$	: gradational acceleration
$\Delta H_{vap}$	: enthalpy of vaporization
$m_{gas,\alpha}$	: mass of gas mixture in the control volume $\alpha$
$m_{i,\alpha}$	: mass of the material i in the control volume $\alpha$
$m_{liq,\alpha}$	: mass of liquid mixture in the control volume $\alpha$
$\dot{m}_{vaporization,\alpha \rightarrow \beta}$	: mass vaporization rate of the water moving from $\alpha$ to $\beta$
$\dot{m}_{H_2O,leak}$	: mass flow rate of water from tubes into the shell side of the SDT
$\dot{m}_{i,SWR}$	: mass production rate of the material i by sodium-water reaction
$\dot{m}_{i+j,\alpha \rightarrow \beta}$	: mass flow rate of the mixture of the materials i and j moving from $\alpha$ to $\beta$
$n_{i,\alpha}$	: mole of the material i in the control volume $\alpha$
$\dot{n}_{vaporization,\alpha \rightarrow \beta}$	: mole vaporization rate of the water moving from $\alpha$ to $\beta$
$\dot{n}_{i+j,\alpha \rightarrow \beta}$	: mole flow rate of the mixture of the materials i and j moving from $\alpha$ to $\beta$
$P_{gas,\alpha}$	: pressure of the gas in the control volume $\alpha$
$P_{i+j,\alpha}$	: pressure of the mixture of the materials i and j in the control volume $\alpha$
$P_{i,\alpha}^{sat}$	: saturated vapor pressure of the material i in the control volume $\alpha$
$R$	: gas constant
$T_{gas,\alpha}$	: temperature of gas mixture in the control volume $\alpha$
$T_{i,\alpha}$	: temperature of the material i in the control volume $\alpha$
$T_{liq,\alpha}$	: temperature of liquid mixture in the control volume $\alpha$
$Z_{i,\alpha}$	: compressibility factor of the material i in the control volume $\alpha$
$\lambda$	: vaporization rate of water

## References

- Tim, A. and Sue, I., "Generation-IV Nuclear Power: A Review of the State of the Science," *Energy Policy*, **36**(11), 4323-4330 (2008).
- Ahn, S. J., Ha, K.-S., Chang, W.-P., Kang, S. H., Lee, K. L., Choi, C.-W., Lee, S. W., Yoo, J., Jeong, J.-H. and Jeong, T., "Evaluation of a Sodium-Water Reaction Event Caused by Steam Generator Tubes Break in the Prototype Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor," *Nucl. Eng. Technol.*, **48**(4), 952-964(2016).
- Park, S. H., Min, J. H., Lee, T.-H. and Wi, M.-H., "Investigation of Plugging and Wastage of Narrow Sodium Channels by Sodium and Carbon Dioxide Interaction," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(6), 863-870(2016).
- Park, S. H., Ye, H.-Y. and Lee, T.-H., "Investigation on Design Requirements of Feed Water Drain and Hydrogen Vent Systems

- for the Prototype Generation IV Sodium Cooled Fast Reactor,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(2), 170-179(2017).
5. Park, S. H. and Han, J.-W., “Investigation on Design Requirements of Vent Lines for Sodium-Water Reaction Pressure Relief System of Prototype Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactor,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(3), 388-403(2018).
  6. Shin, Y. W., Wiedermann, A. H., Eichler, T. V., Youngdahl, C. K. and Ockert, C. E., “An Analytical Model for Dynamics of a Sodium/Water Reaction Bubble in an LMFBR Steam Generator and the Coupled Response of the Intermediate Heat Transport System,” *Nucl. Eng. Des.*, **106**(2), 221-230(1998).
  7. Ye, H.-Y., Choi, S.-R., Han, J.-W. and Lee, T.-H., “Pressure Transient Analysis for Sodium-Water Reaction Event Using SPIKE Code,” 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, October, Gyeongju(2016).
  8. Takata, T., Yamaguchi, A., Fukuzawa, K. and Matsubara, K., “Numerical Methodology of Sodium-water Reaction with Multiphase Flow Analysis,” *Nucl. Sci. Eng.*, **150**(2), 221-236(2005).
  9. Takata, T., Yamaguchi, A., Ohshima, H. and Watanabe A., “Computational Sensitivity Study on Sodium-Water Reaction Phenomenon,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **43**(5), 514-525(2006).
  10. Takata, T., Yamaguchi, A., Uchibori, A., and Ohshima, H., “Computational Methodology of Sodium-Water Reaction Phenomenon in Steam Generator of Sodium-Cooled Fast Reactor,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**(6), 613-623(2009).
  11. Shin, Y. W., Chung, H. H., Wiedermann, A. H. and Tanabe, H., “SWAAM-LT: The Long-Term, Sodium/Water Reaction Analysis method Computer Code,” 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August, Stuttgart (1993).
  12. Eoh, J.-H., Jeong, J.-Y., Kim, S.-O. and Hahn, D., “Development and Experimental Verification of the Numerical Simulation Method for the Quasi-steady SWR Phenomena in an LMR Steam Generator,” *Nucl. Technol.*, **152**(3), 286-301(2005).
  13. Shepherd, C. B. and Lapple, C. E., “Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors,” *Ind. Eng. Chem.*, **32**(9), 1246-1248(1940).
  14. Hori, M., “Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors,” *Atomic Energy Review*, **18**(3), 707-778(1980).
  15. Baldev, Raj P. Chellapandi, and P. R. Vasudeva Rao, *Sodium Fast Reactors with Closed Fuel Cycle*, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, FL(2015).