

## 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통의 배출배관 설계요건 연구

박선희<sup>†</sup> · 한지웅

한국원자력연구원 SFR계통설계부  
34057 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
(2018년 1월 12일 접수, 2018년 4월 12일 수정본 접수, 2018년 4월 17일 채택)

## Investigation on Design Requirements of Vent Lines for 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 12 January 2018; Received in revised form 12 April 2018; accepted 17 April 2018)

### 요 약

본 연구는 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통의 소듐, 물, 가스 배출배관 설계에 필요한 요건 도출을 목적으로 한다. 증기발생기의 전열관 파단에 의한 대규모 물 누출 사고 발생 시, 증기발생기 전열관 측의 물과 전열관 외측의 소듐 및 반응생성물을 물배출조와 소듐배출조로 신속하게 배출하기 위해 증기발생기의 소듐 배출배관 파열관 면적, 소듐배출조의 가스 방출배관 직경, 물배출조의 기체 방출배관 직경, 증기발생기의 물 배출배관 직경 등을 설정하기 위한 계산을 수행하였다. 이를 바탕으로 대규모 물 누출 사고 발생 시 증기발생기 내 유체 배출 소요시간 및 압력거동 해석을 수행하였고, 증기발생기 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력 등의 설계인자를 도출하였다. 본 연구에서 도출된 설계인자들은 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통 설계에 기초자료로 활용할 예정이다.

**Abstract** – We investigated design requirements of vent lines for Sodium-Water Reaction Pressure Relief System of Prototype Generation-IV Sodium-Cooled Fast Reactor. We developed design requirements of areas of the rupture disks of the steam generator, a diameter of the gas vent line of the sodium dump tank, a diameter of the gas vent line of the water dump tank, a diameter of the water dump line of the steam generator. With the design requirements, we calculated the time to vent fluid inside the steam generator and analyzed the transient pressure behavior, also evaluated the close pressure value of the isolation valve of the water dump line. Our results are expected to be used as basis information to design 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

### 1. 서 론

소듐냉각고속로 원형로(Prototype Generation-IV Sodium-cooled Fast Reactor, PGSFR)는 소듐을 냉각재로 사용하는 제4세대 원자로로서, 기존 원자로에 비해 높은 에너지의 중성자로 핵분열을 일으켜 발생하는 열로 전기 생산을 목적으로 개발 중인 원자로이다 [1-4]. 사용후핵연료를 재순환하여 고준위방사성폐기물의 관리기간, 처분면적, 처분량을 대폭 줄일 수 있는 장점이 있지만 소듐-물 반응(sodium-water reaction, SWR)과 소듐화재 등에 대한 우려를 해결

해야 하는 부분이 있다. 증기발생기(steam generator, SG)의 다수의 전열관 파단 시 전열관 내의 물이 소듐 측으로 누출되면서 소듐-물 반응이 발생하고 수산화소듐, 산화소듐, 수소 등이 생성된다. 기체생성물인 수소에 의한 압력파로부터 일차열전달계통(Primary Heat Transport System, PHTS)의 냉각제 경계의 건전성을 유지하고 추가적인 소듐-물 반응을 차단하기 위해, 압력 완화 및 증기발생기 내 유체 배출 역할을 수행하는 소듐-물 반응 압력완화계통(Sodium-Water Reaction Pressure Release System, SWRPRS)이 필요하다. 증기발생기 내 전열관이 파단되어 대규모 물 누출이 발생하면 많은 양의 물이 짧은 시간에 증기발생기의 전열관 외측(shell side, 셸 측)으로 유입되면서 소듐-물 반응을 일으킨다. 반응생성물인 수소의 발생량이 순식간에 증가하여 증기발생기 셸 측 압력이 급격히 상승한다. 증기발생기 셸 측 압력이 증가함에 따라 증기발생기 셸 측 입·출구

<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.

배관의 분기관에 설치된 파열판의 전단과 후단의 압력차이가 파열 설정압력(bursting pressure)에 도달하면, 파열판이 개방되어 소듐과 반응생성물은 소듐배출조(sodium dump tank, SDT)로 배출되고 급수(액체상태 물)와 증기(기체상태 물)는 물배출조(water dump tank, WDT)로 배출되어 소듐과 물의 접촉을 차단시켜 지속적인 소듐-물 반응을 차단한다.

증기발생기 내에서 물 누출에 의한 소듐-물 반응 사고 해석 연구는 SWAAM-II, SPIKE, SERAPHIM 등의 전산코드를 이용하여 보고된 바 있으나, 이들은 모두 사고 초기 약 0.5초 이내에 중간열전달계통(Intermediate Heat Transport System, IHTS), 중간열교환기 등으로의 압력과 전달을 해석한 연구이다[5-9]. 증기발생기 내 유체 배출에 관한 연구가 수행된 바 있으나 주로 쉘 측의 유체를 배출하는 연구였고[10,11], 쉘 측과 전열관 측 내의 유체를 모두 배출하기 위한 설계인자 도출 및 해석 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 SFR 원형로의 증기발생기에서 대규모 물 누출 사고

발생 시, 증기발생기 쉘 측과 전열관 측의 유체를 소듐배출조와 물배출조로 신속하게 배출하기 위해 증기발생기의 소듐 배출배관과 열관 면적, 소듐배출조의 가스 방출배관 직경, 물배출조의 기체 방출배관 직경, 증기발생기의 물 배출배관 직경을 설정하고, 증기발생기 내 유체 배출 소요시간 및 압력거동 해석과 증기발생기 물 배출배관 격리밸브의 차단압력을 설정하는 것을 목적으로 한다. 본 논문에서 언급하는 직경은 모두 내경(inner diameter, ID)이다.

## 2. 소듐-물 반응 압력완화계통

소듐-물 반응 압력완화계통은 기기(component, C), 배관(line, L), 밸브(valve, V) 등으로 구성된다(Fig. 1). SFR 원형로의 안전관련 설계기준사건 중 하나인 증기발생기 전열관 5개 양단파단에 의한 대형누설 사고 시, 소듐-물 반응의 반응생성물로 수소가 발생한다[2]. 급격하게 발생하는 수소에 의해 증기발생기 쉘 측 및 중간열전달계

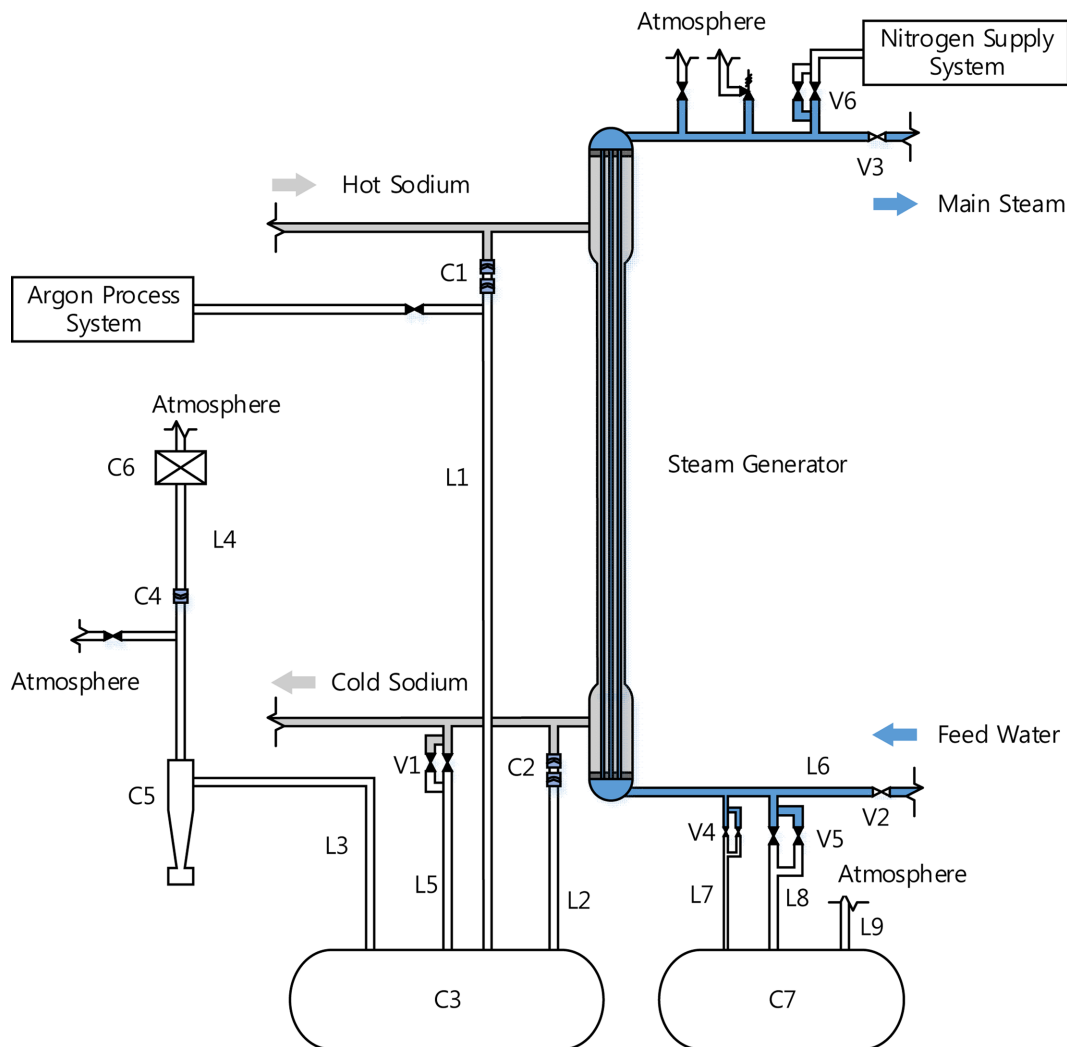


Fig. 1. Schematic diagram of SWRPRS. Component (C): Hot Leg Rupture Disk (C1), Cold Leg Rupture Disk (C2), Sodium Dump Tank (C3), Back Pressure Rupture Disk (C4), Gas-Liquid Separator (C5), Hydrogen Igniter (C6), and Water Dump Tank (C7). Line (L): Hot Leg Sodium Dump Line (L1), Cold Leg Sodium Dump 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).

통 배관의 압력이 상승하면 증기발생기의 고온관 노즐과 저온관 노즐의 인접한 곳에 설치된 고온관 파열판(C1)과 저온관 파열판(C2)의 파열 설정압력을 초과하여 파열판이 자동 개방됨으로써 일차열 전달계통으로 전달되는 압력파를 완화해 냉각제 경계를 보호한다. 개방된 고온관 파열판 및 저온관 파열판과 소듐 배출배관(L1, L2)을 통해 증기발생기 셸 측의 소듐과 반응생성물은 소듐배출조(C3)로 배출된다. 소듐배출조로 배출된 반응생성물 중 기상 반응생성물인 수소는 소듐배출조의 충전가스인 아르곤과 혼합된다. 소듐배출조 내 압력이 배압파열판(C4)의 파열 설정압력에 도달하면 배압파열판이 개방되면서 수소-아르곤 혼합가스는 기액분리기(C5), 수소점화기(C6), 기액분리기 연결배관(L3), 가스 방출배관(L4)을 거쳐 외기로 방출된다. 저온관 파열판이 미개방 될 경우, 저온관에 설치된 배관(L5)의 격리밸브(V1)를 개방해 계통 내 소듐 및 반응생성물을 배출한다.

고온관 파열판 또는 저온관 파열판의 개방신호에 의해 급수공급 펌프는 정지하고 펌프가 정지하면 급수 공급배관 격리밸브(V2)와 주증기 공급배관 격리밸브(V3)가 자동으로 차단된다. 증기발생기 급수 공급배관(L6)에 설치된 물 배출배관 격리밸브(V4, V5)가 개방되어 전열관 측의 물은 물 배출배관(L7, L8)을 통해 물배출조(C7)로 배출된다. 물배출조로 배출된 물은 물배출조 기체 방출배관(L9)을 통해 외기로 방출된다. 셸 측의 소듐 및 반응생성물이 전열관 측으로 이동하는 것을 방지하기 위해, 전열관 측 압력은 셸 측 압력보다 항상 높게 유지해야 한다. 이를 위해 전열관 측의 압력이 일정 압력 이하로 하강하면 대규경 물 배출배관 격리밸브(V4)를 차단하고 주증기 공급배관(L9)에 설치된 질소 공급배관 격리밸브(V6)를 개방해서 전열관 측으로 질소를 주입하고 소규경 물 배출배관 격리밸브(V5)의 개폐를 제어하여, 셸 측과 전열관 측의 압력 차이를 유지하면서 계통 내 모든 유체가 원활하게 소듐배출조와 물배출조로 배출되도록 운전한다. 주요 설계재원은 'Appendix 1'에 수록하였다.

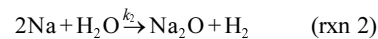
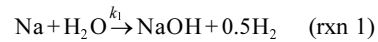
### 3. 소듐-물 반응 압력완화계통 유체 거동 해석

본 연구에서는 SFR 원형로의 100% 정상운전 조건에서 증기발생기 내 상단의 전열관 5개가 동시에 완전히 파단되어 대규모 물 누출이 일어나 소듐-물 반응이 발생했을 때 소듐 측과 물 측의 유체의 거동을 해석하였다.

대규모 물 누출 시 증기발생기의 전열관 측은 물 누출에 의해 압력이 하강한다. 셸 측에서는 소듐과 물이 반응하여 수소 및 수산화소듐 등이 생성되고 수소에 의해 급격히 압력이 상승하여 고온관 파열판과 저온관 파열판은 파열 설정압력인 1.0 MPa에 도달해 파열판이 개방되고 셸 측의 유체는 모두 소듐배출조로 배출된다(소듐배출조 내 가스는 방출배관에 설치된 배압파열판의 파열 설정압력인 0.3 MPa보다 커졌을 때 배압파열판이 개방됨으로써 외기로 방출됨). 고온관 파열판 및 저온관 파열판의 개방신호는 급수 공급펌프의 작동정지신호 역할을 한다. 급수 공급펌프가 정지하면 증기발생기 대규경 물 배출배관 격리밸브와 소규경 물 배출배관 격리밸브가 개방된다. 전열관 내 압력이 일정 압력에 도달하면 대규경 격리밸브와 소규경 격리밸브가 차단함으로써 전열관 측 압력을 셸 측 압력보다 높게 유지해 셸 측의 소듐 및 반응생성물이 전열관 측으로 이동하는 것을 방지한다.

#### 3-1. 소듐-물 반응에 의한 수소 발생 모델

증기발생기 전열관 파단에 의해 누출된 물이 셸 측의 소듐과 반응하여 수산화소듐, 수소 등이 발생한다. 급격하게 발생하는 대량의 수소에 의해 증기발생기, 중간열전달계통의 압력이 급상승한다. 압력상승의 원인인 수소량을 계산하는데 필요한 소듐-물 반응의 대표적인 전체반응식(overall reaction)은 다음과 같다[7~13].



소듐-물 반응은 빠른 반응속도로 인해 정확한 반응 메커니즘과 반응상수는 규명되지 않았다. 기존의 문헌에서는 보수적인 설계를 위해 위의 두 반응식을 적절히 조합하였으나 실제 소듐-물 반응을 묘사하는데 타당성이 부족하다[11,12]. 근래에 Takata 등이 transient state theory와 capture theory를 이용해 구한 위 두 반응의 반응속도상수는 다음과 같다[7~9].

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

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

SFR 원형로의 운전온도 및 사고 시 상승온도 범위인 300~800 °C에서  $k_1$ 는  $k_2$ 보다 약  $10^{10}$ 배 크다. 따라서 본 연구에서는 'rxn 1'만 고려한다. 누출된 물 전량은 소듐과 즉각적으로 반응한다고 보수적으로 가정한다.

#### 3-2. 물 측 유체 거동 해석

##### 3-2-1. 해석 방법

증기발생기 전열관 측과 물배출조를 여러 개의 단위 영역(control volume, CV)으로 나누어, 증기(steam, STM) 및 질소 또는 급수(feed water, FW)가 셸 측으로 누출되고 물배출조로 배출되고 압력하강에 의해 증발하는 것 등의 과도거동을 해석하였다. 단위 영역의 위치와 명칭은 다음과 같다.

- STMH: 증기발생기 전열관 상단 증기실(steam header, STMH)의 기체(증기 및 질소) 영역
- CV1: 증기발생기 내 파단된 전열관의 위쪽 부분 기체 영역
- CV2: 증기발생기 내 파단된 전열관의 아래쪽 부분 증기 기체 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
- FWC<sub>gas</sub>: 증기발생기 내 전열관 하단 급수실(feedwater chamber, FWC)의 기체 영역
- FWC<sub>liq</sub>: 증기발생기 급수실의 급수 영역
- WDT<sub>gas</sub>: 물배출조의 기체 영역
- WDT<sub>liq</sub>: 물배출조의 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.

## 3-2-2. 지배방정식 및 상관식

## ○ Mass Conversation

증기발생기 전열관 및 물배출조 각각의 단위영역에 대한 물질보존식은 아래와 같다.

$$\frac{dm_{i,STMH}}{dt} = -\dot{m}_{i,STMH \rightarrow shell} - \dot{m}_{i,STMH \rightarrow atm} + \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow STMH}$$

(i: STM, N<sub>2</sub>)

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

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

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

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

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

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

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

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

## ○ Energy Conversation in Control Volumes

증기발생기 전열관 및 물배출조 각각의 단위영역에 대한 에너지보존식은 아래와 같다.

$$\frac{d}{dt}(\sum m_{i,STMH} C_{v,i} T_{i,STMH}) = -\sum \dot{m}_{i,STMH \rightarrow shell} C_{p,i} dT_{i,STMH \rightarrow shell}$$

$$- \sum \dot{m}_{i,STMH \rightarrow atm} C_{p,i} dT_{i,STMH \rightarrow atm}$$

$$+ \sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow STMH} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow STMH} \quad (\text{i: STM, N}_2)$$

$$\frac{d}{dt}(\sum m_{i,CV2} C_{v,i} T_{i,CV2}) = -\sum \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow shell} C_{p,i} dT_{i,CV2 \rightarrow shell}$$

$$- \sum \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}}$$

$$+ \dot{m}_{evapor,CV4 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV2} \Delta H_{vap}$$

$$\frac{d}{dt}(\sum m_{i,CV3} C_{v,i} T_{i,CV3}) = -\sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow STMH} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow STMH}$$

$$- \sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}}$$

$$+ \dot{m}_{evapor,CV5 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV3} \Delta H_{vap}$$

$$\frac{d}{dt}(\sum m_{i,FWC_{gas}} C_{v,i} T_{i,FWC_{gas}}) = \sum \dot{m}_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV2 \rightarrow FWC_{gas}}$$

$$+ \sum \dot{m}_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}} C_{p,i} dT_{i,CV3 \rightarrow FWC_{gas}}$$

$$- \sum \dot{m}_{i,FWC_{gas} \rightarrow WDT_{gas}} C_{p,i} dT_{i,FWC_{gas} \rightarrow WDT_{gas}}$$

$$\frac{d}{dt}(\sum m_{i,WDT} C_{v,i} T_{i,WDT}) = \sum \dot{m}_{i,FWC \rightarrow WDT} C_{p,i} dT_{i,FWC \rightarrow WDT}$$

$$- \sum \dot{m}_{i,WDT \rightarrow atm} C_{p,i} dT_{i,WDT \rightarrow atm}$$

$$+ \dot{m}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}} \Delta H_{vap}$$

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

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

$$\frac{d}{dt}(m_{FW,FWC_{liq}} C_{v,FW} T_{FW,FWC_{liq}}) = -\dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} C_{p,FW} dT_{FW,FWC_{liq} \rightarrow CV4} + \dot{m}_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}} C_{p,FW} dT_{FW,CV5 \rightarrow FWC_{liq}}$$

$$- \dot{m}_{FW,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}} C_{p,FW} dT_{FW,FWC_{liq} \rightarrow WDT_{liq}}$$

$$- \dot{m}_{evapor,FWC_{liq} \rightarrow FWC_{gas}} \Delta H_{vap}$$

$$\frac{d}{dt}(m_{FW,WDT} C_{v,FW} T_{FW,WDT}) = \dot{m}_{FW,FWC \rightarrow WDT} C_{p,FW} dT_{FW,FWC}$$

$$- \dot{m}_{evapor,WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}} \Delta H_{vap}$$

## ○ Energy Conversation in Lines

배관에서의 급수 및 기체의 배출 선속도, 이동유량, 방출유량 등을 구한다. 선속도가 음속에 가까워지는 경우, 유체는 임계유동(critical flow)에 도달하므로 급수 및 기체의 선속도는 유체 온도에 서의 음속으로 결정한다.

$$\dot{n}_{i+j, \alpha \rightarrow \beta} = v_{i+j, \alpha \rightarrow \beta} A_{\beta_{mlet}}^{cross \text{ sectional}} \rho_{i+j, \beta_{mlet}}^{avg} \frac{1}{M_{i+j}^{avg}}$$

$$\dot{m}_{i+j, \alpha \rightarrow \beta} = v_{i+j, \alpha \rightarrow \beta} A_{\beta_{mlet}}^{cross \text{ sectional}} \rho_{i+j, \beta_{mlet}}^{avg}$$

증기발생기 전열관에서 전열관 외측으로 누출되거나 배관을 통해 물배출조 및 외기로 이동하는 증기와 가스에 대한 에너지보존식은 아래와 같다.

$$\frac{\rho_{STM+N_2,CV1and shell}^{avg} V_{STM+N_2,STMH \rightarrow shell}^2}{2} = P_{STM+N_2,STMH} - P_{gas,shell}$$

$$- \Delta P_{STM+N_2,STMH \rightarrow shell}^{totalloss}$$

$$\frac{\rho_{STM+N_2,CV2and shell}^{avg} V_{STM+N_2,CV2 \rightarrow shell}^2}{2} = P_{STM+N_2,CV2} - P_{gas,shell}$$

$$- \Delta P_{STM+N_2,CV2 \rightarrow shell}^{totalloss}$$

$$\frac{\rho_{STM+N_2,CV3and STMH}^{avg} V_{STM+N_2,CV3 \rightarrow STMH}^2}{2} = P_{STM+N_2,CV3} - P_{STM+N_2,STMH}$$

$$- \Delta P_{STM+N_2,CV3 \rightarrow STMH}^{totalloss}$$

$$\frac{\rho_{STM+N_2,CV2and FWC}^{avg} V_{STM+N_2,CV2 \rightarrow FWC}^2}{2} = P_{STM+N_2,CV2} - P_{STM+N_2,FWC}$$

$$- \Delta P_{STM+N_2,CV3 \rightarrow FWC}^{totalloss}$$

$$\frac{\rho_{STM+N_2,CV3and FWC}^{avg} V_{STM+N_2,CV3 \rightarrow FWC}^2}{2} = P_{STM+N_2,CV3} - P_{STM+N_2,FWC}$$

$$- \Delta P_{STM+N_2,CV3 \rightarrow FWC}^{totalloss}$$

$$\frac{\rho_{STM+N_2,WDTnozzle}^{avg} V_{STM+N_2,FWC \rightarrow WDT}^2}{2} = P_{STM+N_2,FWC} - P_{STM+N_2,WDT}$$

$$- \Delta P_{STM+N_2,FWC \rightarrow WDT}^{totalloss}$$

$$\frac{\rho_{STM+N_2, vent outlet} V_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^2}{2} = P_{STM+N_2, WDT} - P_{atm} - \Delta P_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^{total loss}$$

#### ○ Pressure Loss Correlation

급수 및 기체의 누출·방출 시 에너지 보존식에 포함된 압력손실 ( $\Delta P$ )을 구하는 상관식은 아래와 같다. 손실계수(K)를 구하는 상관식은 '3-4. 손실계수 상관식' 부분에 기술하였다.

$$\Delta P_{STM+N_2, STMH \rightarrow shell} = \Delta P_{STM+N_2, STMH \rightarrow shell}^{form loss} = K_{STM+N_2, STMH \rightarrow shell}^{sudden expansion} \frac{\rho_{STM+N_2, CV1 and shell}^{avg} V_{STM+N_2, STMH \rightarrow shell}^2}{2}$$

$$\Delta P_{STM+N_2, CV2 \rightarrow shell} = \Delta P_{STM+N_2, CV2 \rightarrow shell}^{form loss} = K_{STM+N_2, CV2 \rightarrow shell}^{sudden expansion} \frac{\rho_{STM+N_2, CV2 and shell}^{avg} V_{STM+N_2, CV2 \rightarrow shell}^2}{2}$$

$$\Delta P_{STM+N_2, CV3 \rightarrow STMH} = \Delta P_{STM+N_2, CV3 \rightarrow STMH}^{form loss} = K_{STM+N_2, CV3 \rightarrow STMH}^{sudden expansion} \frac{\rho_{STM+N_2, CV3 and STMH}^{avg} V_{STM+N_2, CV3 \rightarrow STMH}^2}{2}$$

$$\Delta P_{STM+N_2, CV2 \rightarrow FWC} = \Delta P_{STM+N_2, CV2 \rightarrow FWC}^{form loss} + \Delta P_{STM+N_2, CV2 \rightarrow FWC}^{friction loss} = (K_{STM+N_2, CV2 \rightarrow FWC}^{sudden expansion} + K_{STM+N_2, CV2 \rightarrow FWC}^{fric(tube)}) \frac{\rho_{STM+N_2, CV2 and FWC}^{avg} V_{STM+N_2, CV2 \rightarrow FWC}^2}{2}$$

$$\Delta P_{STM+N_2, CV3 \rightarrow FWC} = \Delta P_{STM+N_2, CV3 \rightarrow FWC}^{form loss} = K_{STM+N_2, CV3 \rightarrow FWC}^{form loss} \frac{\rho_{STM+N_2, CV3 and FWC}^{avg} V_{STM+N_2, CV3 \rightarrow FWC}^2}{2}$$

$$\Delta P_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT} = \Delta P_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT}^{form loss} + \Delta P_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT}^{friction loss} = (K_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT}^{sudden expansion/contraction} + K_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT}^{bend} + K_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT}^{fric(pipe)}) \frac{\rho_{STM+N_2, WDT nozzle} V_{STM+N_2, FWC \rightarrow WDT}^2}{2}$$

$$\Delta P_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm} = \Delta P_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^{form loss} + \Delta P_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^{friction loss} = (K_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^{sudden expansion/contraction} + K_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^{bend} + K_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^{fric(pipe)}) \frac{\rho_{STM+N_2, vent outlet} V_{STM+N_2, WDT \rightarrow atm}^2}{2}$$

#### ○ Vaporization

CV5 또는 FWC에서 CV3로 증발하거나 CV4 또는 FWC에서 CV2로 증발하는 물의 양은 CV5 급수 표면의 포화증기압과 CV3 내 증기의 압력 차이만큼 증발한다. 증발 후 증기의 압력과 급수 표면의 포화증기압의 동적 평형에 도달하는데 소요되는 시간을 고려하기 위해 증발율( $\lambda$ )을 도입한다. 증발율은 실험으로 결정하는 값이므로, 본 연구에서는 증발율 값에 따른 계산 결과 차이는 '4-6. 증발율 영향'에서 고찰하였다. 증기에 대한 상태방정식은 압축인자(Z)를 도입한 상태방정식을 사용하였다.

$$\dot{n}_{evapor, CV4 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV2}$$

$$= \frac{\lambda(P_{FW, CV4}^{sat} - P_{STM+N_2, CV2}) V_{STM+N_2, CV2} Z_{STM+N_2, CV2}}{RT_{STM+N_2, CV2}}$$

$$\dot{n}_{evapor, CV5 \text{ or } FWC_{liq} \rightarrow CV3}$$

$$= \frac{\lambda(P_{FW, CV5}^{sat} - P_{STM+N_2, CV3}) V_{STM+N_2, CV3} Z_{STM+N_2, CV3}}{RT_{STM+N_2, CV3}}$$

$$\dot{n}_{evapor, FWC_{liq} \rightarrow FWC_{gas}}$$

$$= \frac{\lambda(P_{FW, FWC_{liq}}^{sat} - P_{STM+N_2, FWC_{gas}}) V_{STM+N_2, FWC_{gas}} Z_{STM+N_2, FWC_{gas}}}{RT_{STM+N_2, FWC_{gas}}}$$

$$\dot{n}_{evapor, WDT_{liq} \rightarrow WDT_{gas}}$$

$$= \frac{\lambda(P_{FW, WDT_{liq}}^{sat} - P_{STM+N_2, WDT_{gas}}) V_{STM+N_2, WDT_{gas}} Z_{STM+N_2, WDT_{gas}}}{RT_{STM+N_2, WDT_{gas}}}$$

### 3-3. 소듐 측 유체 거동 해석

#### 3-3-1. 해석 방법

증기발생기 쉘 측과 소듐배출조로 영역을 나누어, 소듐 및 반응 생성물이 소듐배출조로 배출되고 기체 반응생성물인 수소에 의해 압력이 상승하는 것 등의 과도거동을 해석하였다. 단위 영역의 위치와 명칭은 다음과 같다.

- SG: 증기발생기 쉘 측 영역

- SDT: 소듐배출조 전체 영역

소듐배출조에서 외기로 방출되는 가스의 농도는 소듐배출조 내의 가스농도(몰분율)와 같다고 가정한다. 액상 유체는 비압축성 유체로 기상유체는 압축성 유체로 가정한다.

#### 3-3-2. 지배방정식 및 상관식

##### ○ Mass Conservation

$$\frac{dm_{i,SG}}{dt} = \dot{m}_{i,SWR} - \dot{m}_{i,SG \rightarrow SDT} \quad (i: Na, NaOH, H_2, Ar, N_2)$$

$$\frac{dm_{i,SDT}}{dt} = \dot{m}_{i,SG \rightarrow SDT} - \dot{m}_{i,SDT \rightarrow atm}$$

$$\dot{m}_{i,SWR} = v_{i,SWR} \dot{m}_{H_2O, leak}$$

##### ○ Energy Conservation in Control Volumes

소듐-물 반응의 반응열은 증기발생기 내 모든 유체를 가열하는데 사용되고 축일과 열손실 없다고 가정한다.

$$\frac{d}{dt} (\sum m_{i,SG} C_{v,i} T_{i,SG}) = \dot{m}_{H_2O, leak} \Delta H_{SWR} - \sum \dot{m}_{i,SG \rightarrow SDT} C_{p,i} dT_{i,SG \rightarrow SDT} \quad (i: Na, NaOH, H_2, Ar, N_2)$$

$$\frac{d}{dt} (\sum m_{i,SDT} C_{v,i} T_{i,SDT}) = \sum \dot{m}_{i,SG \rightarrow SDT} C_{p,i} dT_{i,SG \rightarrow SDT} - \sum \dot{m}_{i,SDT \rightarrow atm} C_{p,i} dT_{i,SDT \rightarrow atm}$$

##### ○ Energy Conservation in Lines

$$P_{gas,SG} + \frac{\rho_{liq,SG}^{avg} V_{liq,h_{liq,SG(CL)}}^2}{2} + \rho_{liq,SG}^{avg} g h_{liq,SG(CL)}$$

$$\begin{aligned}
 &= P_{gas,SDT} + \frac{\rho_{liq,SG}^{avg} V_{liq,SG(HL)}^2}{2} + \Delta P_{liq,SG(HL) \rightarrow SDT}^{total loss} \\
 &P_{gas,SG} = P_{gas,SDT} + \frac{\rho_{liq,SG}^{avg} V_{liq,SG(HL)}^2}{2} + \rho_{liq,SG} g h_{liq,SG(HL)} \\
 &= P_{gas,SDT} + \frac{\rho_{liq,SDT(HL)nozzle}^{avg} V_{liq,SDT(HL)nozzle}^2}{2} + \Delta P_{liq,SG(HL) \rightarrow SDT}^{total loss} \\
 &P_{gas,SG} = P_{gas,SDT} + \frac{\rho_{liq,SDT(HL)nozzle}^{avg} V_{liq,SDT(HL)nozzle}^2}{2} + \Delta P_{gas,SG(HL) \rightarrow SDT} \\
 &P_{gas,SDT} = P_{gas,atm} + \frac{\rho_{gas,vent outlet}^{avg} V_{gas,vent outlet}^2}{2} + \Delta P_{gas,SDT \rightarrow atm}
 \end{aligned}$$

### ○ Pressure Loss Correlation

액상유체 및 기상유체의 누출·방출 시 기계적 에너지 보존식에 포함된 압력손실( $\Delta P$ )을 구하는 상관식은 아래와 같다. 손실계수( $K$ )를 구하는 상관식은 ‘3-4. 손실계수 상관식’ 부분에 기술하였다.

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{i,SG(CL) \rightarrow SDT} &= \Delta P_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{friction loss} + \Delta P_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{form loss} \\
 &= (K_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{fric(pipe)} + K_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{TSP} + K_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{sudden changes} \\
 &\quad + K_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{bend} + K_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{direction change} + K_{i,SG(CL) \rightarrow SDT}^{rupture disk}) \frac{\rho_i V_i^2}{2} \\
 \Delta P_{i,SG(HL) \rightarrow SDT} &= \Delta P_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{friction loss} + \Delta P_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{form loss} \\
 &= (K_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{fric(pipe)} + K_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{distributor} + K_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{sudden changes} + K_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{bend} \\
 &\quad + K_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{direction change} + K_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{rupture disk}) \frac{\rho_i V_i^2}{2} \\
 \Delta P_{i,SDT \rightarrow atm} &= \Delta P_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{friction loss} + \Delta P_{i,SG(HL) \rightarrow SDT}^{form loss} \\
 &= (K_{i,SDT \rightarrow atm}^{fric(pipe)} + K_{i,SDT \rightarrow atm}^{separator} + K_{i,SDT \rightarrow atm}^{sudden changes} + K_{i,SDT \rightarrow atm}^{bend} \\
 &\quad + K_{i,SDT \rightarrow atm}^{rupture disk}) \frac{\rho_i V_i^2}{2}
 \end{aligned}$$

### ○ Equation of State

본 연구의 소듐 측에서 고려하는 기상유체(가스)는 수소, 아르곤, 질소이므로 이에 대한 상태방정식은 이상기체 상태방정식을 사용한다.

$$\begin{aligned}
 V_{gas,SG} P_{gas,SG} &= V_{gas,SG} \sum P_{i,SG} = RT_{gas,SG} \sum n_{i,SG} \\
 V_{gas,SDT} P_{gas,SDT} &= V_{gas,SDT} \sum P_{i,SDT} = RT_{gas,SDT} \sum n_{i,SDT}
 \end{aligned}$$

### 3-4. 손실계수 상관식

#### 3-4-1. 마찰손실계수( $K_{fric}$ )

$$K_{fric} = f \frac{D_h}{L}$$

(1) 증기발생기 내 전열관 사이의 소듐 유동

$$f = \begin{cases} \frac{64}{Re} & \text{for } Re < 2100 \text{ (Darcy friction factor)} \\ \frac{0.3164}{Re^{0.25}} & \text{for } 2100 \leq Re \leq 30000 \text{ (Blasisu friction factor)} \\ \frac{0.184}{Re^{0.2}} & \text{for } 30000 < Re \text{ (McAdams friction factor)} \end{cases}$$

(2) 배관 내부의 유체 유동

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \text{ (Nikuradse friction factor)}$$

#### 3-4-2. 형상손실계수( $K_{form}$ )

(1) 전열관지지판(tube support plate, TSP), 유동분배관(distributor) [14a]

$$\begin{aligned}
 K_{TSP \text{ or } K_{distributor}} &= \\
 &\left[ 0.5(1-\bar{f})^{0.75} + \tau(1-\bar{f})^{0.375} + (1-\bar{f})^2 + f_{hole} \frac{l_{hole}}{d_{hole}} \right] (\bar{f})^{-2} \\
 \tau &= 10^{-\phi} \left( 2.4 - \frac{l_{hole}}{d_{hole}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\phi = 0.25 + 0.535 \left( \frac{l_{hole}}{d_{hole}} \right)^8 \left[ 0.05 + \left( \frac{l_{hole}}{d_{hole}} \right)^7 \right]^{-1}$$

(2) 급수축(sudden contraction, SC)[14b]

$$K_{SC} = 0.5 \left( 1 - \frac{A_{after cont}}{A_{before cont}} \right)^{0.75} + K_{fric,trans}$$

(3) 급확장(sudden expansion, SE)[14c]

$$K_{SE} = \left( 1 - \frac{A_{before expn}}{A_{after expn}} \right)^2 + K_{fric,trans} \left( \frac{A_{before expn}}{A_{after expn}} \right)^2$$

(4) 굴곡부(bend)[14d]

$$K_{bend} = ABC$$

$$A = 1.623(1 - e^{-0.01\theta})$$

$$B = 0.21 \left( \frac{R_{bend}}{D_{pipe}} \right)^{-0.25} \left( \text{for } \frac{R_{bend}}{D_{pipe}} > 1.0 \right)$$

$$C = 1 \text{ (for circular - shape cross sectional area)}$$

(5) 유동단면적이 일정한 꺾임부(constant-area elbow)[14e]

$$K_{elbow,CA} = \left( 0.95 + \frac{33.5}{\theta} \right) \left[ 0.95 \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 + 2.05 \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^4 \right]$$

\*Above eqn is for smooth wall, sharp corner, constant area

(6) 수직분기부(tee)[14f]

$$K_{tee} = 1.2 K_{elbow,CA}^{\theta=90^\circ}$$

(7) 유동단면적이 변하는 꺾임부(varied-area elbow)[14g]

$$\begin{aligned}
 &= \frac{-2.3 \log \left( K_{elbow,CA}^{\theta=90^\circ} \right)}{\frac{A_{after contr}}{A_{before contr}}} \\
 K_{elbow,CA} &= ACe \\
 A &= 0.95 + \frac{33.5}{\theta}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= 1.443 - 0.635 \left( \frac{L_{height}}{L_{width}} \right) + 0.227 \left( \frac{L_{height}}{L_{width}} \right)^2 - 0.032 \left( \frac{L_{height}}{L_{width}} \right)^3 \\
 &\quad + 0.002 \left( \frac{L_{height}}{L_{width}} \right)^4 \text{ for rectangular cross sectional area}
 \end{aligned}$$

$$C = 1 \text{ for circular cross sectional area}$$

\*Above eqn is for smooth wall, sharp corner, varied area

## (8) 파열판(rupture disk, RD)[14h]

$$K_{RD} = \left[ 0.707 \left( 1 - \frac{A_{RD}}{A_{pipe}} \right)^{0.375} + 1 - \frac{A_{RD}}{A_{pipe}} \right] \left( \frac{A_{pipe}}{A_{RD}} \right)^2$$

## (9) 기액분리기(separator)[15,16]

$$K_{separator} = 16 \frac{HW}{D_e^2}$$

## 4. 계산 및 해석 결과

## 4.1. 증기발생기의 파열판 면적 산출

증기발생기의 셸 측의 상부 노즐은 중간열전달계통 고온관에 연결되고 하부 노즐은 중간열전달계통 저온관에 연결된다(Fig. 1). 상부 노즐과 고온관을 연결하는 분기관(tee) 하단부에는 고온관 파열

판이 설치된다. 하부 노즐과 저온관 또한 분기관으로 연결되고 분기관 하단부에는 저온관 파열판이 설치된다. 파열판은 대규모 소듐-물 반응 발생 시 파열 후 배출배관의 압력손실 요인으로 작용한다. 배출배관 단면적에 대해 파열판 면적비가 작아질수록 압력손실이 커지므로, 파열판의 최소허용면적(내경 기준)을 산출해야 한다. 계산에 사용된 보수적 가정은 다음과 같다.

- 전열관 파단 시 증기발생기 전열관 안의 모든 물은 셸 측으로 누출됨
- 셸 측의 압력이 낮을수록 물 누출량이 많아지므로 전열관 측의 물 누출량 계산에 필요한 경계조건인 셸 측의 압력은 1기압으로 설정함
- 전열관 측 물의 증발율이 클수록 전열관 압력이 높아져 물 누출량이 증가해 소듐-물 반응이 격렬해지므로 증발율은 1로 가정함

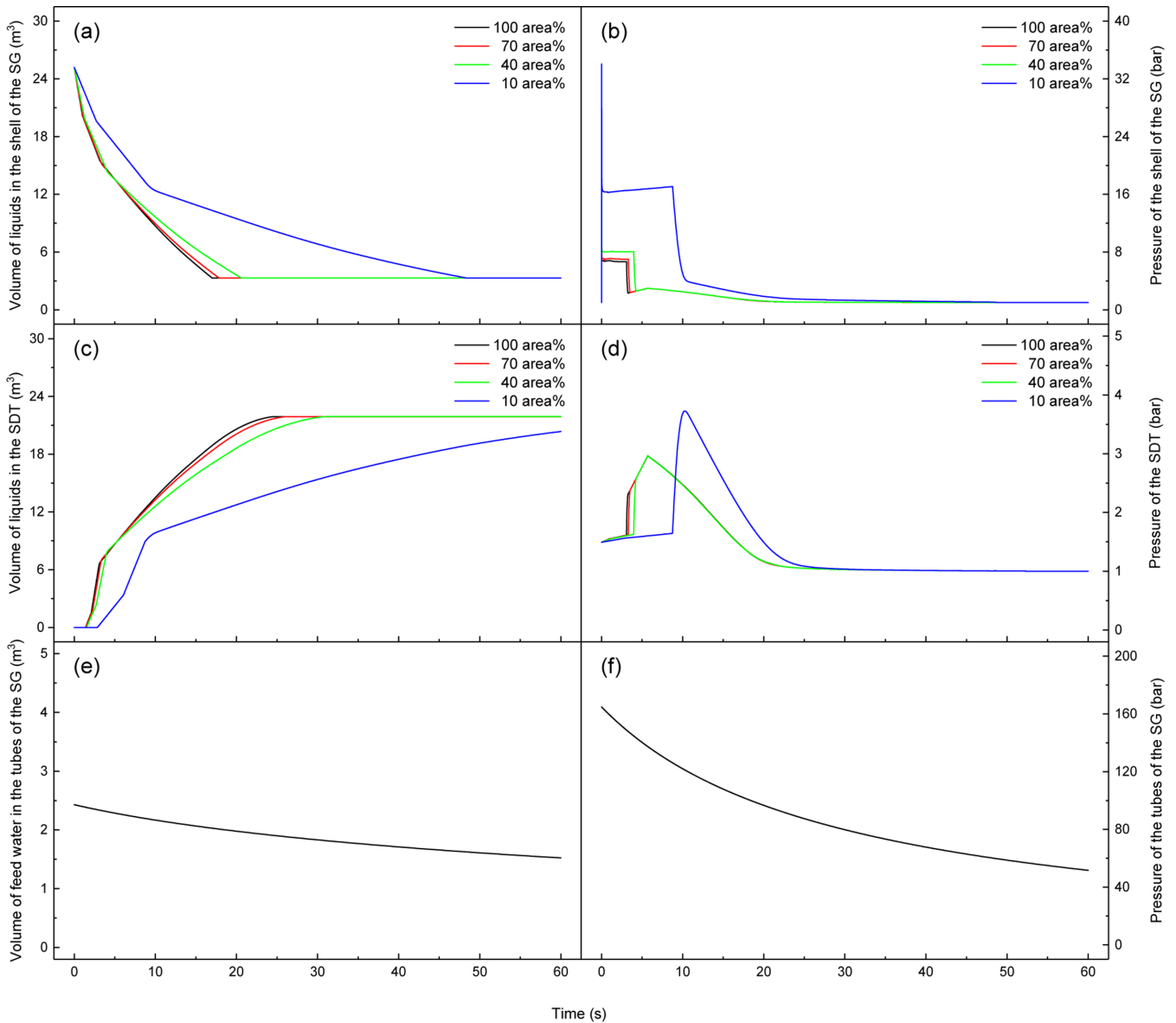


Fig. 2. Calculation of the ratio (rupture disk area/IHTS line cross-sectional area) effects on volume of liquids in the shell of the SG (a), pressure on the shell of the SG (b), volume of liquids in the SDT (c), pressure of the SDT (d), volume of feed water in the tubes of the SG (e), and pressure of the tubes of the SG (f).

중간열전달계통 배관 단면적에 대한 과열판 면적비에 따른 계산 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 면적비가 40%~100%일 때 증기발생기 쉘 측의 유체가 배출되는데 소요되는 시간은 약 20초이지만, 면적비가 10%로 감소하면 배출 소요시간이 약 50초 정도로 증가한다 (Fig. 2a). 면적비가 40%~100%일 때 쉘 측의 압력이 7 bar 이하에서 약 5초 유지된 후 소듐배출조와 통기되면서 압력이 하강하지만, 면적비가 10%이면 쉘 측의 압력이 12 bar 이상으로 약 10초 유지된다(Fig. 2b). 면적비가 40%~100%일 때는 소듐배출조의 압력이 배압과열판의 과열 설정압력인 3 bar에 도달하여 배압과열판이 개방되면 그 즉시 소듐배출조 압력이 하강하였으나, 면적비가 10%일 때는 증기발생기 내 축적되어 있는 과량의 기체가 소듐배출조에 유입되어 배압과열판이 개방되더라도 소듐배출조 압력이 즉시 하강하지 않고 4 bar까지 상승한 뒤 하강하였다(Fig. 2d). 따라서 고온관 과열판과 저온관 과열판의 면적은 설계오차를 포함하여 중간열전

달계통의 배관 단면적에 50% 이상이 되도록 설계한다.

#### 4-2. 소듐배출조의 가스 방출배관 직경 산출

소듐-물 반응 압력완화계통 설계에 있어 중요한 설계변수 중 하나는 각각의 기기를 연결하는 배관의 직경이다. 10~40 m 길이의 소듐-물 반응 압력완화계통의 배관 직경은 신속한 유체 배출을 위해 클수록 유리하지만, 배관 배치 시 간섭문제 및 가열 설비 등을 고려했을 때 직경이 작을수록 경제적으로 효율적이다. 증기발생기 소듐 배출배관의 직경은 중간열전달계통 배관에서 분기하므로 배관 및 부대설비 설치의 효율성을 위해 중간열전달계통 배관과 동일하게 결정하지만, 소듐배출조에서 외기로 연결되는 가스 방출배관의 직경은 가스를 원활하게 방출할 수 있는 범위에서 작을수록 경제적이다. 따라서 소듐배출조의 가스 방출배관의 직경을 결정하기 위한 계산을 수행하였고, 계산에 사용된 보수적 가정은 다음과

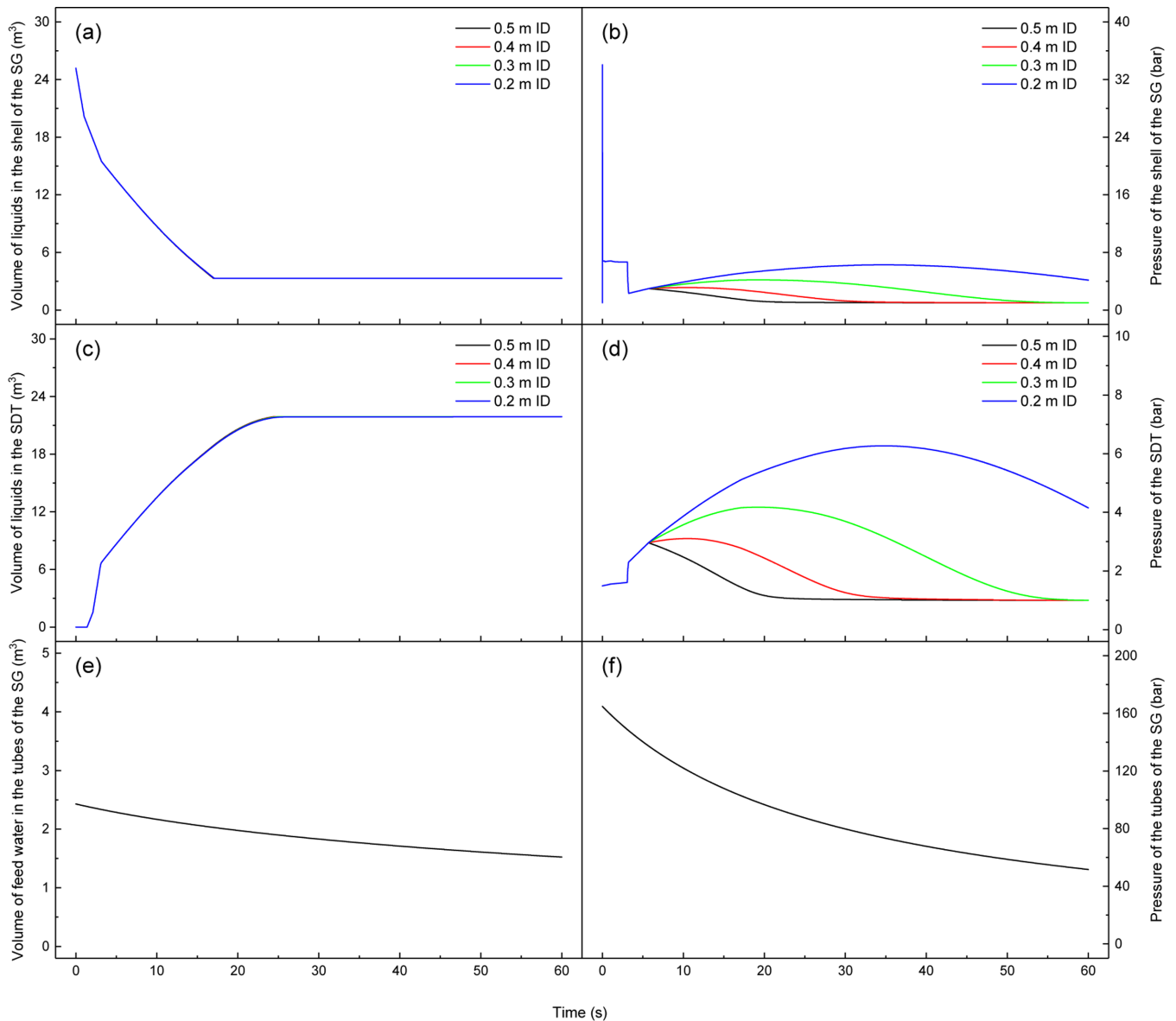


Fig. 3. Calculation of the inner diameter of the SDT gas vent line effects on volume of liquids in the shell of the SG (a), pressure on the shell of the SG (b), volume of liquids in the SDT (c), pressure of the SDT (d), volume of feed water in the tubes of the SG (e), and pressure of the tubes of the SG (f).



같다.

- 전열관 파단 시 증기발생기 전열관 안의 모든 물은 쉘 측으로 누출됨
- 증기발생기 쉘 측 내 액체 및 가스가 소듐배출조로 빠르게 배출 될수록 소듐배출조의 압력이 크게 상승하므로, 고온관 파열관과 저온관 파열관의 직경은 배관의 직경과 동일하다고 가정하여 유체 배출 시 압력손실을 최소화함
- 전열관 측 물의 증발율이 클수록 전열관 압력이 높아져 물 누출량이 증가해 소듐-물 반응이 격렬해져 증기발생기에서 소듐배출조로 배출되는 수소량이 증가해 소듐배출조의 압력이 크게 상승하므로 증발율은 1로 가정함

소듐배출조의 가스 방출배관 직경에 따른 계산 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 소듐배출조 가스 방출배관 직경은 증기발생기 쉘 측의 액체 배출 시간에는 거의 영향이 없었다(Fig. 3a). 고온관 파열관 소듐 배출배관을 통해 증기발생기 상부의 소듐이 배출된 뒤 증기발생기와 소듐배출조가 통기되면 양쪽의 압력이 거의 동일해지므로 증기발생기 쉘 측의 액체는 중력에 의해서만 소듐배출조로 배출되기 때문이다. 소듐배출조 가스 방출배관 직경이 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 m일 때, 소듐배출조의 배압파열관이 파열 설정압력인 3 bar에 도달하여 개방된 후 소듐배출조의 압력은 6.3, 4.2, 3.1, 3.0 bar로 상승한 뒤 대기압으로 하강한다(Fig. 3d). 따라서 소듐배출조 가스 방출배관은 보수적으로 0.4 m 이상으로 설계하고, 소듐배출조는 3.5 bar 이상에서 20초 이상 견딜 수 있도록 설계한다.

#### 4.3. 물배출조의 기체 방출배관 직경 산출

증기발생기 전열관 측의 물을 물배출조로 배출 시, 160 bar / 240 ~500 °C의 물이 대기압 상태의 물배출조로 유입되면서 증발되어 물배출조의 압력이 높아지고 증발된 증기는 물배출조의 기체 방출배관을 통해 외기로 방출된다. 기체 방출배관은 증기를 원활하게 방출할 수 있는 범위에서 작을수록 경제적이다. 따라서 물배출조의 기체 방출배관의 직경을 결정하기 위한 계산을 수행하였고, 계산에 사용된 보수적 가정은 다음과 같다.

- 증기발생기 전열관 안의 모든 물은 물배출조로 배출됨
- 증기발생기 내 물이 물배출조로 빠르게 배출 될수록 물배출조의 압력이 급격하게 상승하므로, 대구경 물 배출배관의 직경은 가능한 최대 직경인 급수 공급배관의 직경인 8 in과 동일하고 밸브 작동개폐는 매우 빠름(소구경 물 배출배관은 2 in로 설정)
- 증기발생기에서 물배출조로 배출되는 물이 정상온전 시 상온으로 유지되는 물배출조와 접촉하여 에너지가 소모되면 물배출조 내에서 증발되는 물의 양이 작아지므로, 물배출조를 가열하는데 소모되는 배출 급수의 에너지 손실은 없음
- 물의 증발율이 클수록 물배출조로 배출된 물의 증발량이 커져 물배출조의 압력이 크게 상승하므로 증발율은 1로 가정함

물배출조의 기체 방출배관 직경에 따른 계산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 물배출조 기체 방출배관 직경은 증기발생기 전열관 측의 물 배출 시간에는 거의 영향이 없었다(Fig. 4a). 증기발생기 내의 모든 급수는 물배출조의 기체 방출배관의 직경과 무관하게 물배출조로

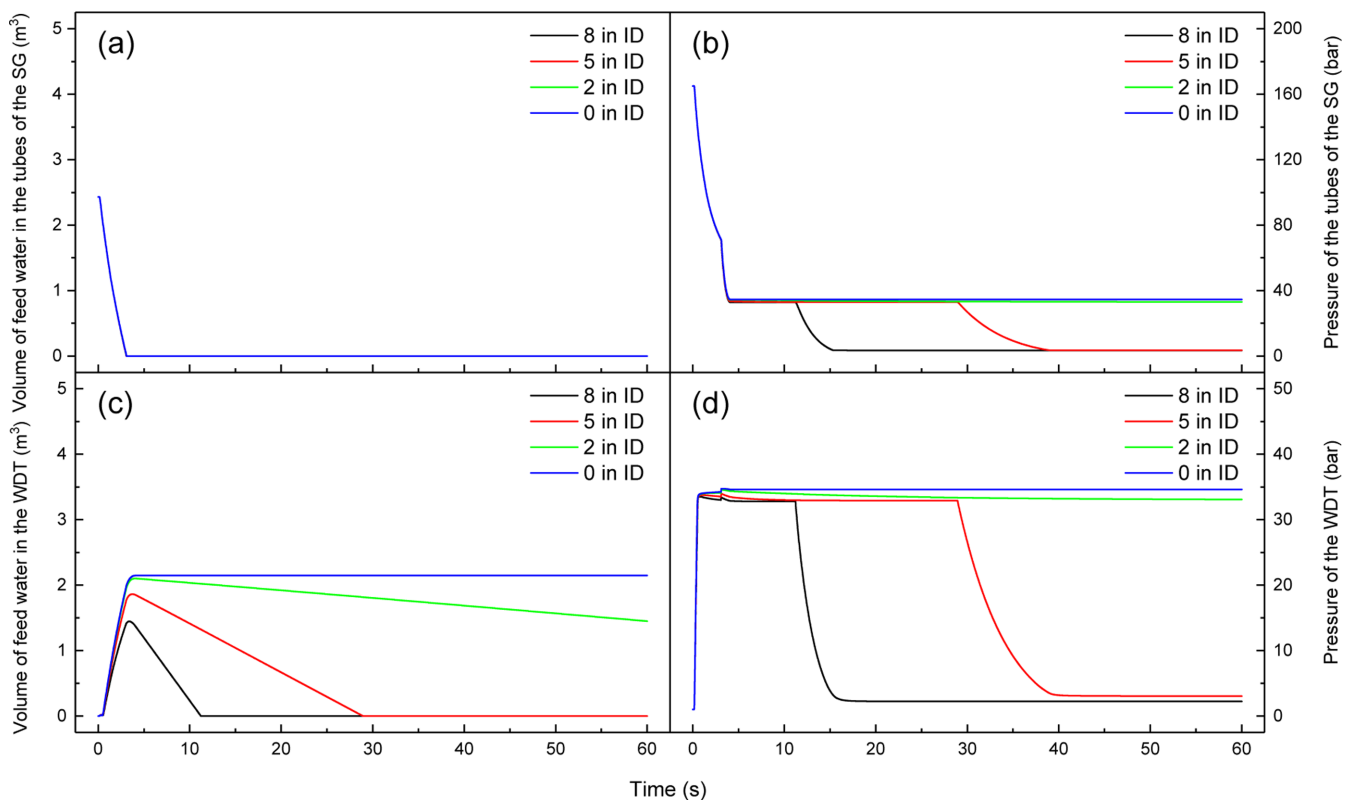


Fig. 4. Calculation of the inner diameter of the WDT gas vent line effects on volume of feed water in the tubes of the SG (a), pressure of the tubes of the SG (b), volume of feed water in the WDT (c), and pressure of the WDT (d).

배출되는데 약 3초가 소요되고, 이 시간 동안 물배출조의 압력은 물배출조의 기체 방출배관의 직경과 상관없이 35 bar까지 동일하게 상승하기 때문이다(Fig. 4d). 물배출조 기체 방출배관 직경이 0 in 일 때 물배출조의 압력은 35 bar에 도달하여 평형을 유지한다. 직경이 2, 5, 8 in일 때, 물배출조의 압력은 35 bar에 도달 후 60초, 30초, 13초 후 압력이 감소하기 시작하여 대기압에 도달한다. 따라서 물배출조 기체 방출배관은 보수적으로 5 in 이상으로 설계하고, 물배출조는 40 bar 이상에서 50초 이상 견딜 수 있도록 설계한다.

#### 4.4. 증기발생기의 대구경 물 배출배관 직경 산출

증기발생기 내의 물을 배출하기 위해, 증기발생기 하단에 연결된 급수 공급배관을 분기하여 대구경 물 배출배관과 소구경 물 배출배관을 설치한다(Fig. 1). 전열관 파단 사고 발생 시, 급수공급펌프 가동 정지 후 대구경 물 배출배관과 소구경 물 배출배관은 동시에 개방된다. 대구경 물 배출배관은 사고 초기에 증기발생기 내의 물을 신속하게 배출하는데 사용한다. 증기발생기 물 배출 시, 전열관 측 압력이 쉘 측 압력보다 낮아지게 되면 쉘 측의 소듐 및 반응생성물이 전열관 측으로 이동할 가능성이 있기 때문에 전열관 측 압력은 쉘 측의 압력보다 항상 높게 유지되어야 한다. 대구경 물 배출배관만 사용하면 밸브 개폐작동 소요시간(약 5초) 및 과량의 배출유량으로 인해 전열관 내 압력을 제어하기 어렵다. 따라서 전열관 압력을 수월하게 제어하기 위해 소구경 물 배출배관을 별도로 설치한다. 소구경 물 배출배관의 직경은 2 in로 설정한다. 대구경 물 배출배관은 급수 공급배관의 직경과 동일하게 8 in까지 설치 가능하지

만 작아질수록 경제적이다. 따라서 대구경 물 배출배관 직경을 결정하기 위한 계산을 수행하였고, 계산에 사용된 보수적 가정은 다음과 같다.

- 물배출조의 압력이 높을수록 증기발생기 내 물 배출 소요시간이 길어지므로, 물배출조에서 방출되는 기체는 없다고 가정함
- 증기발생기 내의 모든 물은 물배출조로 배출됨(전열관 파단에 의한 누출은 없다고 설정함)
- 물의 증발율이 클수록 물배출조로 배출된 물의 증발량이 커져 물배출조의 압력상승에 의해 증기발생기 전열관 측의 물의 배출시간을 지연시키므로 증발율은 1로 가정

대구경 물 배출배관 직경에 따른 계산 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 배관 직경이 4~8 in일 때 증기발생기 전열관 측의 물이 배출되는데 소요되는 시간은 약 15초 이하이지만, 직경이 2 in가 되면 배출 소요시간이 약 50초 정도로 증가한다(Fig. 5a). 따라서 대구경 물 배출배관의 직경은 설계오차를 포함하여 5 in 이상이 되도록 보수적으로 설계한다.

#### 4.5. 증기발생기의 대구경 물 배출배관 격리밸브 차단 설정압력 설정

증기발생기의 파열관 면적, 소듐배출조의 가스 방출배관 직경, 물배출조의 기체 방출배관 직경, 증기발생기의 대구경 물 배출배관 직경을 산정하기 위한 계산을 앞에서 수행하였다. 보수적인 가정에서 산정한 설계인자들을 모두 적용하여, 전열관 파단에 의한 대규모 물누출 사고 발생 시 증기발생기 쉘 측과 전열관 측의 유체가 배

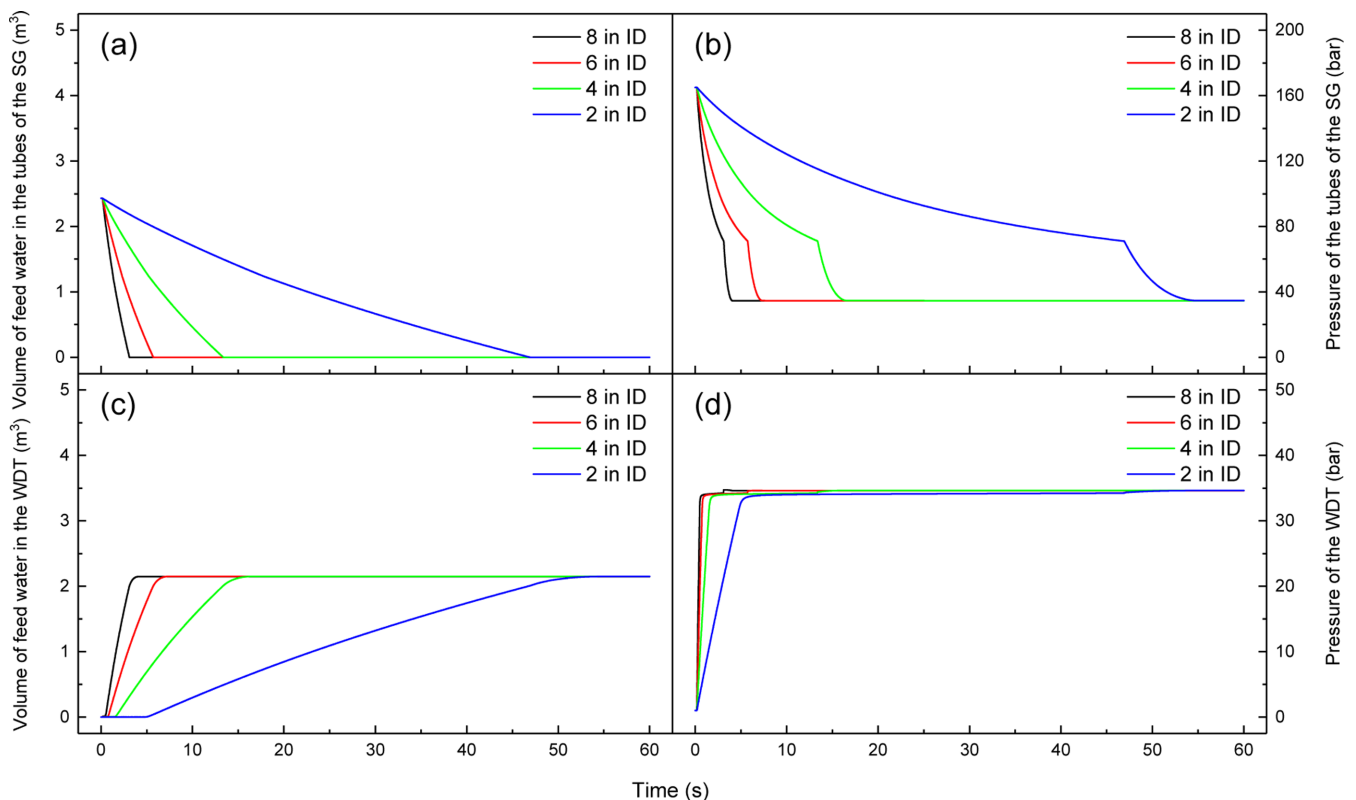


Fig. 5. Calculation of the inner diameter of the SG water dump line effects on volume of feed water in the tubes of the SG (a), pressure of the tubes of the SG (b), volume of feed water in the WDT (c), and pressure of the WDT (d).

출되는 시간 계산을 수행하였고, 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력에 따른 양상을 확인하였다(소구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력은 10 bar로 설정).

앞에서 산정한 설계인자들의 설정값은 다음과 같다.

- 증기발생기 파열판 면적 비율(중간열전달계통 배관 단면적 대비): 50%
- 소듐배출조 가스 방출배관 직경: 0.4 m
- 물배출조 기체 방출배관 직경: 6 in
- 증기발생기 물 배출배관 직경: 8 in

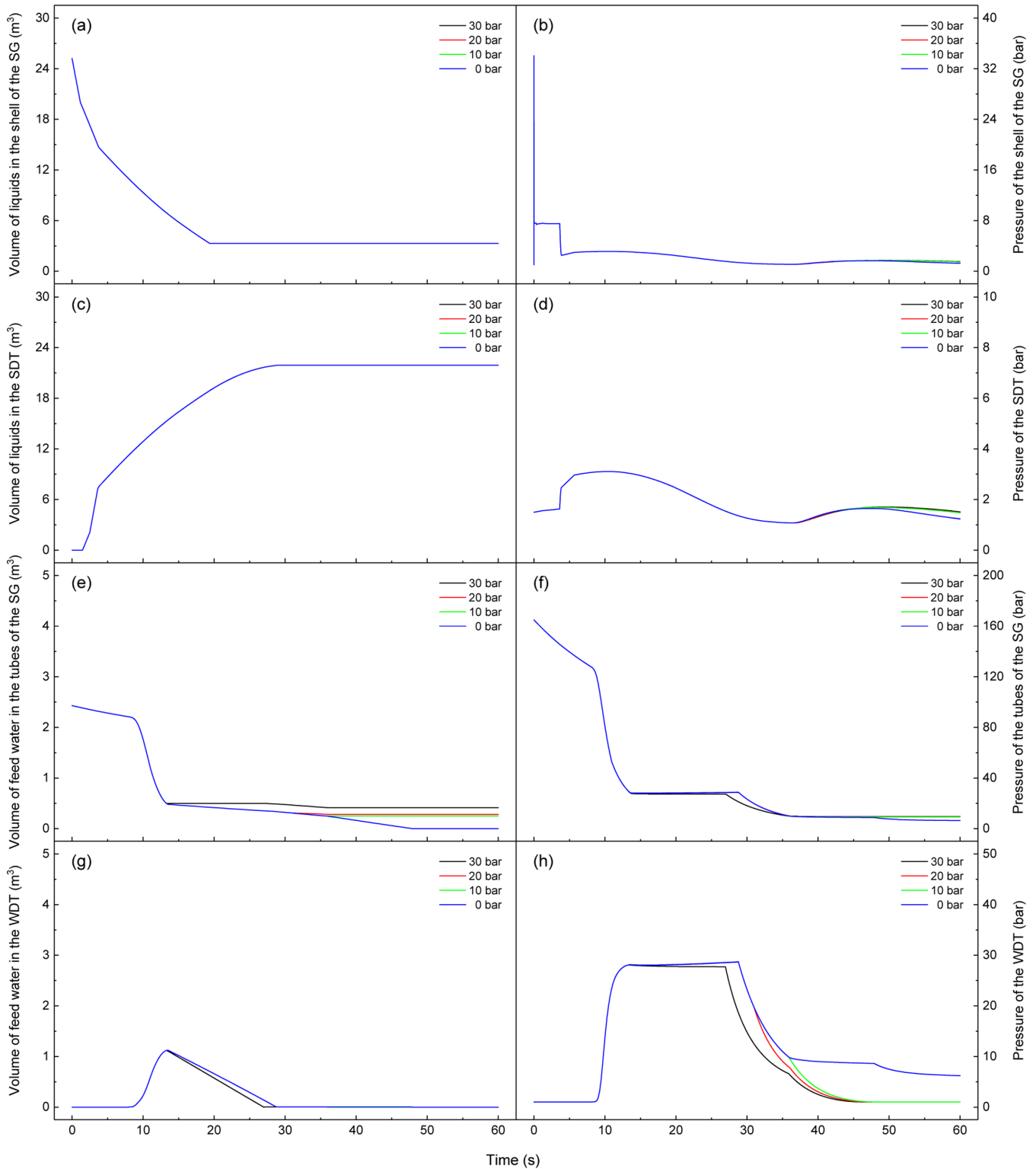


Fig. 6. Calculation of the close pressure of the large diameter water dump valve effects on volume of liquids in the shell of the SG (a), pressure on the shell of the SG (b), volume of liquids in the SDT (c), pressure of the SDT (d), volume of feed water in the tubes of the SG (e), pressure of the tubes of the SG (f), volume of feed water in the WDT (g), and pressure of the WDT (h).

전열관 파단에 의한 대규모 물누출 사고 발생 시 실제 운전 내용을 해석에 추가로 반영하였다(그 외 사항은 크기산정 계산에 적용한 내용과 동일).

- 증기발생기 전열관 측의 압력을 셸 측의 압력보다 높게 유지해서 셸 측의 소듐 및 반응생성물의 전열관 측으로 이동하는 것을 방지하기 위해, 증기발생기 내 유체가 모두 배출될 때까지 질소를 2 in 배관을 통해 20 bar로 주입하는 것을 계산에 반영함
- 사고 발생 초기 파열관 개방신호에 의해 급수공급펌프는 즉시 정지하기 시작하여 완전히 정지하는데 소요시간은 5초로 설정함
- 급수 공급배관 격리밸브와 주증기 공급배관 격리밸브는 급수공급펌프 정지 후 차단됨. 밸브 차단 소요시간은 5초로 설정함
- 증기발생기 대구경 및 소구경 물 배출배관 격리밸브는 급수공급펌프 정지 5초 후 작동하기 시작하고 개방/차단 소요시간은 대구경 밸브는 5초/2초, 소구경 밸브는 3초/1초로 설정함
- 증기발생기 증기 방출배관 격리밸브는 개방하지 않음

증기발생기 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력에 따른 계산 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력은 셸 측의 유체 배출시간 및 압력에는 거의 영향을 주지 않았다(Fig. 6a). 차단 설정압력의 영향은 30초 이후에 나타나는데 셸 측의 유체는 20초 정도에 모두 배출되기 때문이다. 대구경 물 배출배관 격리밸브를 차단하지 않았을 때(차단 설정압력 0 bar), 60초 후 셸 측의 압력은 1 bar인 반면, 차단 설정압력을 30 bar로 설정하였을 때 60초 후 셸 측의 압력은 1.5 bar이다(Fig. 6b).

대구경 물 배출배관 격리밸브 차단 설정압력에 따라 전열관 측의 유체 배출시간과 압력은 양상이 달라진다(Fig. 6c). 대구경 밸브를 차단하지 않았을 때 증기발생기 전열관 측의 급수가 모두 배출되는데 47초가 소요되지만, 밸브 차단압력을 10 bar 이상으로 설정하였을 때 증기발생기의 급수가 모두 배출되기 전에 밸브가 차단되고

공급 질소에 의해 증기발생기 전열관 측의 압력은 10 bar로 유지된다. 물배출조에 240 °C 이상의 물이 배출되어 물배출조 내 급수량이 1.2 m<sup>3</sup> 까지 상승하지만 물배출조 내의 증기가 외기로 모두 방출되어 물배출조 압력이 대기압에 도달하므로 물배출조 내의 급수는 모두 증발하여 잔류량이 없는 것으로 계산되었다(Fig 6g). 대구경 밸브의 차단 설정압력에 영향을 크게 받지 않아서, 물배출조의 압력은 약 30 bar까지 상승한 뒤 47초 후 대기압에 도달한다(Fig 6h). 증기발생기 전열관 측과 셸 측의 압력차이는 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력을 0, 10, 20, 30 bar로 설정했을 때 5.1, 7.5, 7.6, 7.8 bar 이상이다(Fig. 7). 따라서 증기발생기 전열관 측의 물을 신속히 배출하면서 셸 측보다 압력을 높게 유지하기 위해 대구경 물 배출배관 격리밸브 차단 설정압력은 보수적으로 10 bar 이상으로 설정한다.

#### 4-6. 증발율 영향

앞에서 증기발생기의 파열관 면적, 소듐배출조의 가스 방출배관 직경, 물배출조의 기체 방출배관 직경, 대구경 물 배출배관 직경, 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력을 산출하기 위해 물의 증발율을 보수적으로 가정하였다. 가압에 의해 액상으로 유지되던 100 °C 이상의 물에 가해지는 압력이 감소하면서 물은 해당 온도-압력 조건에서 포화증기압까지 증발하게 된다. 증발율이 1이면 압력이 감소할 때 포화증기압까지 도달하는데 시간이 전혀 소요되지 않는 것을 의미하고, 증발율이 0이면 압력이 감소해도 물이 전혀 증발하지 않는다는 것을 의미한다(포화증기압까지 도달하는데 소요되는 시간이 무한대). 두 경우 모두 실제 현상에서 발생하기 어려운 가정이다. 따라서 물의 증발율을 고려하여 앞에서 수행한 설계인자 도출의 타당성을 확인하였다. 계산 입력조건은 앞의 ‘4.5. 증기발생기의 대구경 물 배출배관 격리밸브 차단 설정압력 설정’에서 적용한 값들과 동일하다.

증발율에 따른 계산 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 증발율이 1에 가까울수록 초반에 전열관 측 압력이 상대적으로 크게 감소한다(Fig. 8f). 증발율이 클수록 증발에 의해 증기량이 보충되지만 그만큼 누출·배출되는 물의 양이 커지기 때문이다. 이러한 결과는 증발율이 1 일 때 전열관 측의 물 배출 소요시간이 가장 짧고, 증발율이 0에 가까워질수록 물 배출 소요시간이 길어지는 결과와 일맥상통한다. 증기발생기 전열관 측과 셸 측의 압력차이는 증발율이 0.1, 0.4, 0.7, 1.0일 때 7.4, 7.4, 7.8, 7.9 bar 이상으로 유지된다(Fig. 9). 따라서 본 연구에서 도출한 설계인자를 적용했을 때 실제 증발율에 상관없이 전열관 측의 압력을 셸 측 압력보다 높게 유지할 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

SFR 원형로의 전열관 파단에 의한 대규모 물 누출 사고 발생 시, 증기발생기 셸 측의 소듐 및 반응생성물과 전열관 측의 물을 신속하게 배출하기 위한 설계요건 도출 연구를 수행하였다. 보수적인 가정 하에 증기발생기의 파열관 면적, 소듐배출조의 가스 방출배관 직경, 물배출조의 기체 방출배관 직경, 대구경 물 배출배관 직경을 산정하였다. 이를 바탕으로 정상운전 조건에서 대구경 물 배출배관 격리밸브의 차단 설정압력에 따른 증기발생기 내 유체의 거동을 해석하였고, 물의 증발율의 영향을 고찰하였다. 본 연구에서 산정한

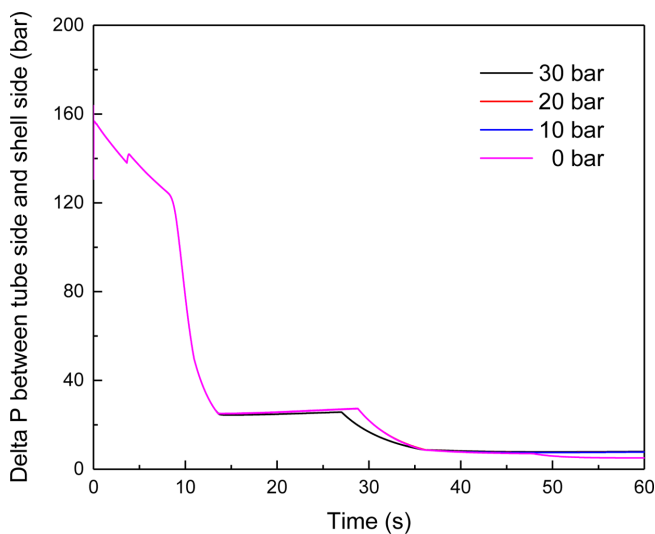


Fig. 7. Pressure difference between tube side and shell side of the steam generator at various close pressures of the large diameter water dump valve. Note that the plot for the pressure difference shown here was obtained with the tube side pressure minus the shell side pressure. See also Fig. 6.

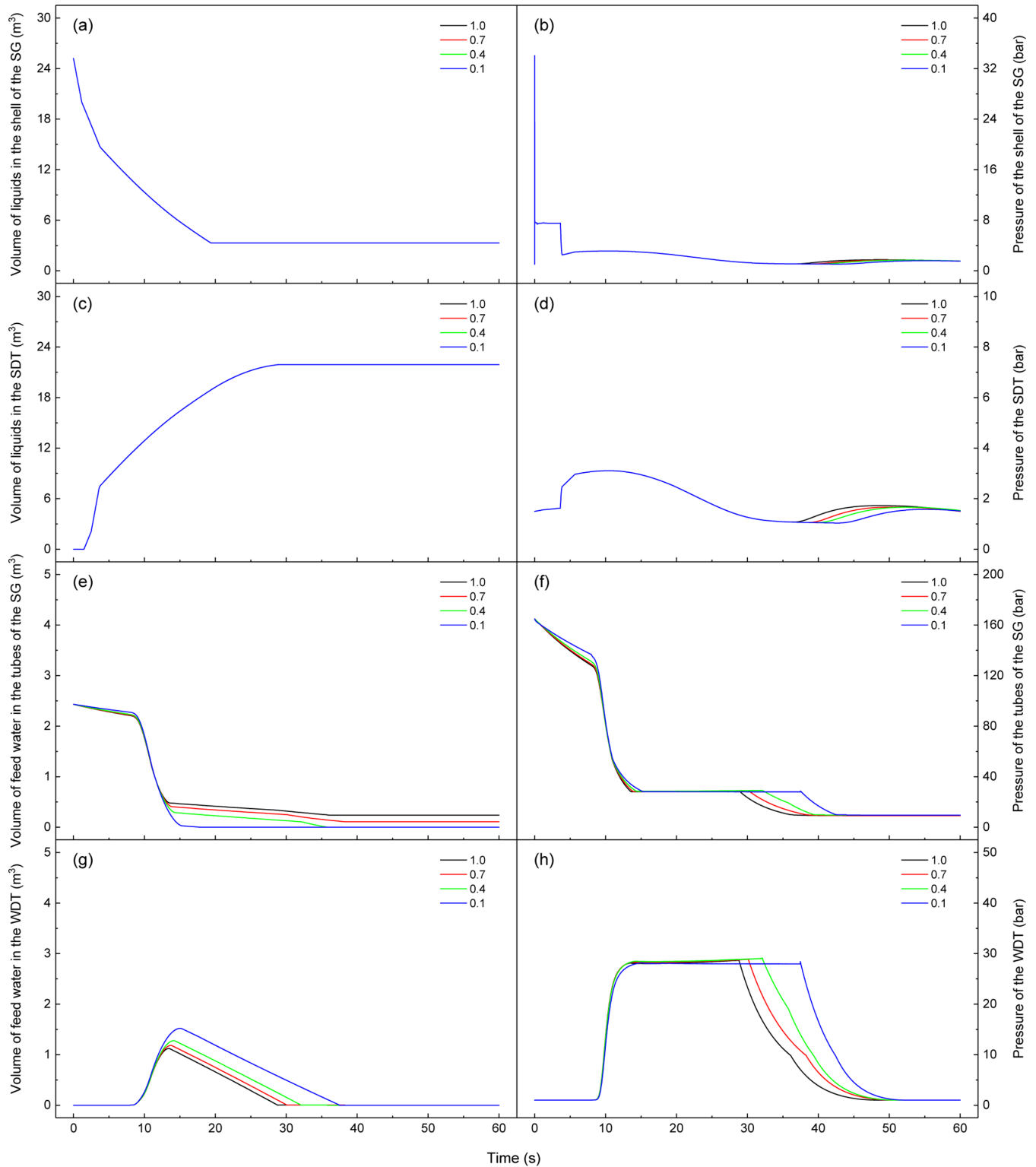


Fig. 8. Calculation of the vaporization rate effects on volume of liquids in the shell of the SG (a), pressure on the shell of the SG (b), volume of liquids in the SDT (c), pressure of the SDT (d), volume of feed water in the tubes of the SG (e), pressure of the tubes of the SG (f), volume of feed water in the WDT (g), and pressure of the WDT (h).

설계인자에서 증기발생기 셸 측의 유체와 전열관 측의 유체는 1분 이내에 모두 배출되는 것으로 계산되었으며, 전열관 측의 압력은 셸 측의 압력보다 높게 유지되는 것으로 계산되었다. 본 연구에서

도출된 설계인자들은 SFR 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통 설계에 기초자료로 활용될 계획이다.

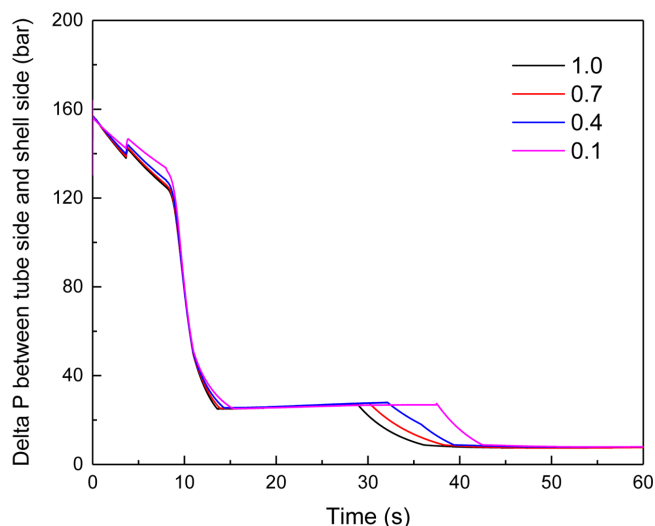


Fig. 9. Pressure difference between tube side and shell side of the steam generator at various vaporization rate. Note that the plot for the pressure difference shown here was obtained with the tube side pressure minus the shell side pressure. See also Fig. 8.

## 감 사

본 연구는 과학기술정보통신부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## Nomenclature

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| $A_{after\ cont}$                    | : area after the sudden contraction                                     |
| $A_{after\ expn}$                    | : area after the sudden expansion                                       |
| $A_{before\ cont}$                   | : area before the sudden contraction                                    |
| $A_{before\ expn}$                   | : area before the sudden expansion                                      |
| $A_{bulk}$                           | : clear area of the grid plate  |
| $A_{hole, total}$                    | : area of total hole  |
| $A_{pipe}$                           | : clear area before the rupture disk                                    |
| $A_{RD}$                             | : area of the rupture disk  |
| $A_{\beta inlet}^{cross\ sectional}$ | : cross-sectional area at $\beta$ inlet                                 |
| $C_{\alpha}$                         | : mole concentration of the material $i$ in the control volume $\alpha$ |
| $Cp_i$                               | : specific heat capacity of the material $i$ in constant pressure       |
| $Cv_i$                               | : specific heat capacity of the material $i$ in constant volume         |
| $Cp_{liq}$                           | : specific heat capacity of liquid mixture in constant pressure         |
| $Cv_{gas}$                           | : specific heat capacity of gas mixture in constant volume              |
| $d_{hole}$                           | : diameter of a hole  |
| $D_e$                                | : diameter of the separation outlet                                     |
| $D_h$                                | : hydraulic diameter of the line  |
| $D_{pipe}$                           | : diameter of the line  |
| $f$                                  | : friction loss coefficient   |
| $f_{hole}$                           | : friction loss coefficient at a hole                                   |

|   |  |
|---|--|
| $\bar{f}$   | : ratio of the clear area before the hole to the area of the total hole  |
| $g$   | : gradational acceleration   |
| $h_{i, \alpha}$   | : level of the material $i$ in the control volume $\alpha$   |
| $h_{liq, SG(CL)}$   | : level of liquid mixture in the SG based on the height of the cold leg nozzle of the SG                             |
| $h_{liq, SG(HL)}$   | : level of liquid mixture in the SG based on the height of the hot leg nozzle of the SG                              |
| $H$   | : height of the separation inlet   |
| $\Delta H_{SWR}$  | : enthalpy of sodium-water reaction  |
| $\Delta H_{vap}$  | : enthalpy of vaporization   |
| $K_{fric}$  | : friction loss coefficient  |
| $K_{fric, trans}$   | : friction loss coefficient at the sudden contraction or expansion part  |
| $K_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{bend}$                  | : loss coefficient of the mixture of the materials $i$ and $j$ moving from $\alpha$ to $\beta$ at bend               |
| $K_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{fric(pipe)}$            | : loss coefficient of the mixture of the materials $i$ and $j$ moving from $\alpha$ to $\beta$ due to friction       |
| $K_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{sudden\ contraction}$   | : loss coefficient of the mixture of the materials $i$ and $j$ moving from $\alpha$ to $\beta$ at sudden contraction |
| $K_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{sudden\ expansion}$     | : loss coefficient of the mixture of the materials $i$ and $j$ moving from $\alpha$ to $\beta$ at sudden expansion   |
| $l_{hole}$  | : length of a hole   |
| $L$   | : length of the line   |
| $L_{width}$   | : width of converging part   |
| $m_{gas, \alpha}$   | : 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 $\alpha$  |
| $\dot{m}_{evapor, \alpha \rightarrow \beta}$                | : 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 $\beta$                         |
| $M_{i+j}^{avg}$   | : average molecular weight of the mixture of the materials $i$ and $j$ in $\alpha$                                   |
| $n_{i, \alpha}$   | : mole of the material $i$ in the control volume $\alpha$  |
| $\dot{n}_{evapor, \alpha \rightarrow \beta}$                | : 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 $\alpha$  |
| $\Delta P_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{form\ loss}$     | : pressure loss of the mixture of the materials $i$ and $j$ moving from $\alpha$ to $\beta$ due to flow change       |
| $\Delta P_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{friction\ loss}$ | : pressure loss of the mixture of the materials $i$ and $j$ moving from $\alpha$ to $\beta$ due to friction          |



|  |   |
|--|---|
|  | j moving from $\alpha$ to $\beta$ due to friction   |
| $\Delta P_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}^{total\ loss}$ | : total pressure loss of the mixture of the materials i and j moving from $\alpha$ to $\beta$ |
| $\Delta P_{gas, \alpha \rightarrow \beta}^{total\ loss}$ | : total pressure loss of gas mixture moving from $\alpha$ to $\beta$                          |
| $\Delta P_{liq, \alpha \rightarrow \beta}^{total\ loss}$ | : total pressure loss of liquid mixture moving from $\alpha$ to $\beta$                       |
| R  | : gas constant  |
| $R_{bend}$   | : curvature radius of the bend  |
| $T_{gas, \alpha}$  | : 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 $\alpha$                                |
| $\Delta T_{liq, \alpha \rightarrow \beta}$               | : temperature change of liquid mixture from $\alpha$ to $\beta$                               |
| $\Delta T_{gas, \alpha \rightarrow \beta}$               | : temperature change of gas mixture from $\alpha$ to $\beta$                                  |
| $V_{i+j, \alpha \rightarrow \beta}$                      | : linear velocity of the mixture of the materials i and j moving from $\alpha$ to $\beta$     |
| $V_{gas, \beta}$   | : linear velocity of gas mixture at $\beta$   |
| $V_{liq, \beta}$   | : linear velocity of liquid mixture at $\beta$  |
| $V_{i, \alpha}$  | : Volume of the control volume $\alpha$   |
| W  | : width of the separation inlet   |
| $Z_{i, \alpha}$  | : compressibility factor of the material i in the control volume $\alpha$                     |
| $\theta$   | : angle of the bend ( $0^\circ < \theta \leq 180^\circ$ ; $0^\circ$ : straight line)          |
| $\rho_{gas, \alpha}^{avg}$                               | : average density of the gas mixture in the control volume $\alpha$                           |
| $\rho_{i+j, \alpha \text{ and } \beta}^{avg}$            | : average density of the mixture of the materials i and j between $\alpha$ and $\beta$        |
| $\rho_{i+j, \beta_{inlet}}^{avg}$                        | : average density of the mixture of the materials i and j at $\beta$ inlet                    |
| $\rho_{liq, \alpha}^{avg}$                               | : average density of the liquid mixture in the control volume $\alpha$                        |
| $\lambda$  | : vaporization rate of water  |
| $V_{i, SWR}$   | : stoichiometric ratio of the material i in sodium-water reaction                             |

## 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).
- 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(1988).
- Ye, H.-Y., Choi, S.-R., Han, J.-W., 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, Korea(2016).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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, Germany(1993).
- 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).
- Hori, M., "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors," *Atomic Energy Review*, **18**(3), 707-778(1980).
- Baldev Raj, P. Chellapandi and P. R. Vasudeva Rao, Sodium Fast Reactors with Closed Fuel Cycle, 1st ed., CRC Press, Boca Raton, FL(2015).
- Idelchik, I. E., Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd ed., Begell House, NY(1996). a: Diagram 8-3, p. 518; b: Diagram 4-9, p. 216; c: Diagram 4-1, p. 208; d: Diagram 6-1, p. 357; e: Diagram 6-7, p. 366; f: Diagram 6-7, p. 366; g: Diagram 6-8, p. 367; h: Diagram 4-11, p. 219.
- Shepherd, C. B. and Lapple, C. E., "Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors," *Ind. Eng. Chem.*, **32**(9), 1246-1248(1940).
- Han, G. B., Jang, J. H., Choi, C. and Lee, T. J., "Effect of Efficient Supply of Pure O<sub>2</sub> Concentrated by PSA-type O<sub>2</sub> Separator on Improvement of Indoor Air Quality," *Korean J. Chem. Eng.*, **33**(4), 1305-1310(2016).

**Appendix 1. Major design parameters of SWRPRS**

| Parameter                           | Unit           | Value     |
|-------------------------------------|----------------|-----------|
| SG sodium inlet temperature         | °C             | 500~550   |
| SG sodium outlet temperature        | °C             | 300~350   |
| SG tube side inlet pressure         | MPa            | 18~20     |
| SG tube side outlet pressure        | MPa            | 15~18     |
| SG tube side inlet temperature      | °C             | 490~510   |
| SG tube side outlet temperature     | °C             | 220~250   |
| SG feedwater flow rate              | kg/s           | 80~100    |
| SG cylinder outer diameter          | mm             | 1000~1300 |
| SG cylinder thickness               | mm             | 1~40      |
| SG steam header volume              | m <sup>3</sup> | 0.7~1.0   |
| SG feedwater chamber volume         | m <sup>3</sup> | 1.0~1.5   |
| SG tube total length                | m              | 20~30     |
| SG tube outer diameter              | mm             | 15~20     |
| SG tube pitch                       | mm             | 30~40     |
| SG tube number                      | EA             | 500~800   |
| SG tube inner diameter              | m              | 10~20     |
| SG tube support plate diameter      | mm             | 1000~1200 |
| SG tube support plate hole diameter | mm             | 10~20     |
| SG tube support plate thickness     | mm             | 10~40     |
| SG tube support plate hole number   | EA             | 1000~3000 |
| SG tube support plate number        | EA             | 10~30     |
| SG tube support plate pitch         | m              | 0.5~2.0   |
| IHTS piping inner diameter          | m              | 0.50~0.55 |
| SDT operating pressure              | MPa            | 0.11~0.15 |
| SDT total volume                    | m <sup>3</sup> | 100~150   |
| SDT operating temperature           | °C             | 100~150   |
| SDT gas vent line length            | m              | 30~50     |