

# 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통의 급수배출 및 수소방출 설계 요건 연구

박선희<sup>†</sup> · 예휘열 · 이태호

한국원자력연구원 SFR계통설계부  
34057 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111  
(2016년 7월 11일 접수, 2016년 10월 25일 수정본 접수, 2016년 10월 25일 채택)

## Investigation on Design Requirements of Feed Water Drain and Hydrogen Vent Systems for the Prototype Generation IV Sodium Cooled Fast Reactor

Sun Hee Park<sup>†</sup>, Hwee-Youl Ye and Tae-Ho Lee

SFR System Design Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 Beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34057, Korea  
(Received 11 July 2016; Received in revised form 25 October 2016; accepted 25 October 2016)

### 요 약

본 논문은 소듐냉각고속로 원형로 소듐-물 반응 압력완화계통의 급수배출부와 수소방출부의 설계요건 도출을 목적으로 한다. 증기발생기 전열관 누설에 의한 소듐-물 반응 발생 시, 증기발생기 내의 급수 증기를 신속하게 배출하는 조건을 도출하기 위해 급수덤프탱크 가스방출배관의 단면적과 증기발생기 급수배출배관의 수직길이를 변화시켜 연구를 수행하였다. 정상운전과 재장전운전에 대해 각각 계산을 수행하여 급수덤프탱크 가스방출배관의 단면적과 증기발생기 급수배출배관의 수직길이를 결정하였다. 정상운전 조건에서 소듐-물 반응 발생 시, 생성물인 수소에 의해 형성되는 과압이 소듐덤프탱크의 설계압력을 만족시킬 수 있도록 하는 가스방출배관의 직경을 도출하였고, 이 때 대기로 방출되는 수소의 유량과 농도를 계산하였다. 본 논문의 계산결과는 향후 소듐냉각고속로 원형로의 소듐-물 반응 압력완화계통의 설계요건으로 활용될 예정이다.

**Abstract** – We investigated design requirements of feed water drain and hydrogen vent systems for the sodium-water reaction pressure relief system (SWRPRS) of the prototype generation IV sodium cooled fast reactor (PGSFR). We evaluated the areas of the gas vent pipe of the water dump tank and the length of the water drain pipe of the steam generator to rapid drain of the water-steam inside the steam generator for the normal and refueling operations, respectively. We also calculated the diameter of the gas vent pipe of the sodium dump tank which met its design pressure.

Key words: sodium cooled fast reactor, PGSFR, sodium-water reaction pressure relief system, feed water drain, hydrogen vent

### 1. 서 론

소듐냉각고속로 원형로(prototype generation IV sodium cooled fast reactor, PGSFR)는 소듐을 냉각재로 사용하고 고속중성자로 핵분열을 일으켜 발생하는 열로 전기(150 MWe)를 생산하는 목적으로 개발 중인 제 4세대 원자로이다[1]. 경수로에서 발생하는 고준위 사용후 핵연료 물질을 연소시켜 영구 처분량을 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있지만 기존 경수로에 비해 상대적으로 발전단가가 높

고 소듐-물 반응(sodium-water reaction, SWR)과 소듐화재 등에 대한 부정적 인식으로 인해 상용화가 지연되고 있다[2]. SWR은 증기발생기(steam generator, SG)의 전열관 누설 시 발생하여 수산화소듐, 산화소듐, 수소 등을 생성한다. 이 때 발생된 수소는 SG와 중간 열전달계통 내에 과압을 형성하여 계통의 안전성을 저해하므로 이에 대한 대비 설계가 필요하다. 소듐-물 반응 압력완화계통(sodium-water reaction pressure release system, SWRPRS)은 SG 내부에서 급수 증기의 대규모 누출이 발생하였을 때 누출의 영향을 완화하여 일차열전달계통(primary heat transport system, PHTS) 경계를 보호하고 사고확대를 방지하는 역할을 수행한다. SG 내부 다수의 전열관이 양단 파단되는 대규모 누출이 발생하면, 많은 양의 급수 증기가 짧은 시간에 SG의 셸 측으로 흘러나와 SWR을 일으켜 반응이 일어나는 곳의 주변의 과도한 온도 상승을 유발하고 반응생성물인

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

E-mail: sunheepark@kaeri.re.kr

<sup>‡</sup>이 논문은 고려대학교 김성현 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

수소의 발생량이 순식간에 증가하여 SG 내부 압력은 급격히 증가한다. SG 내부 압력이 증가됨에 따라 SG 셸 측 입·출구 배관의 분기관에 설치된 파열판 전·후단의 압력차이가 파열압력(bursting pressure)에 도달하면, 파열판이 개방되어 소듐 및 반응생성물이 소듐덤프탱크(sodium dump tank, SDT)로 방출된다. 급수·증기는 WDT 배출밸브를 개방하여 급수덤프탱크(water dump tank, WDT)로 배출시킨다.

본 논문은 WDT의 가스방출배관 직경과 SG의 급수배출수직배관 길이에 따른 급수배출 소요시간을 정상운전과 재장전운전에 대해 평가하고, SDT의 설계압력을 만족시킬 수 있는 가스방출배관 직경과 방출가스의 유량·농도를 계산하는 것을 목적으로 한다.

## 2. SWRPRS

SWRPRS는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 주급수 격리밸브(1), 주급수 배관(2), SG 전열관 측(3), 주증기 배관(4), 주증기 격리밸브(5), 증기 대기방출밸브(6), SG 급수 배출밸브(7), SG 급수배출배관(8), WDT(9), WDT 가스방출배관(10), 주파열판(11), SDT(12), 기액분리기(13), 배압파열판(14) 등으로 구성된다.

### 2-1. 급수배출시간 평가

SG 내 전열관 누설 시 일어나는 SWR의 반응생성물인 수소는 SG와 중간열전달계통 내에 과압을 형성한다. 수소의 압력이 주파열

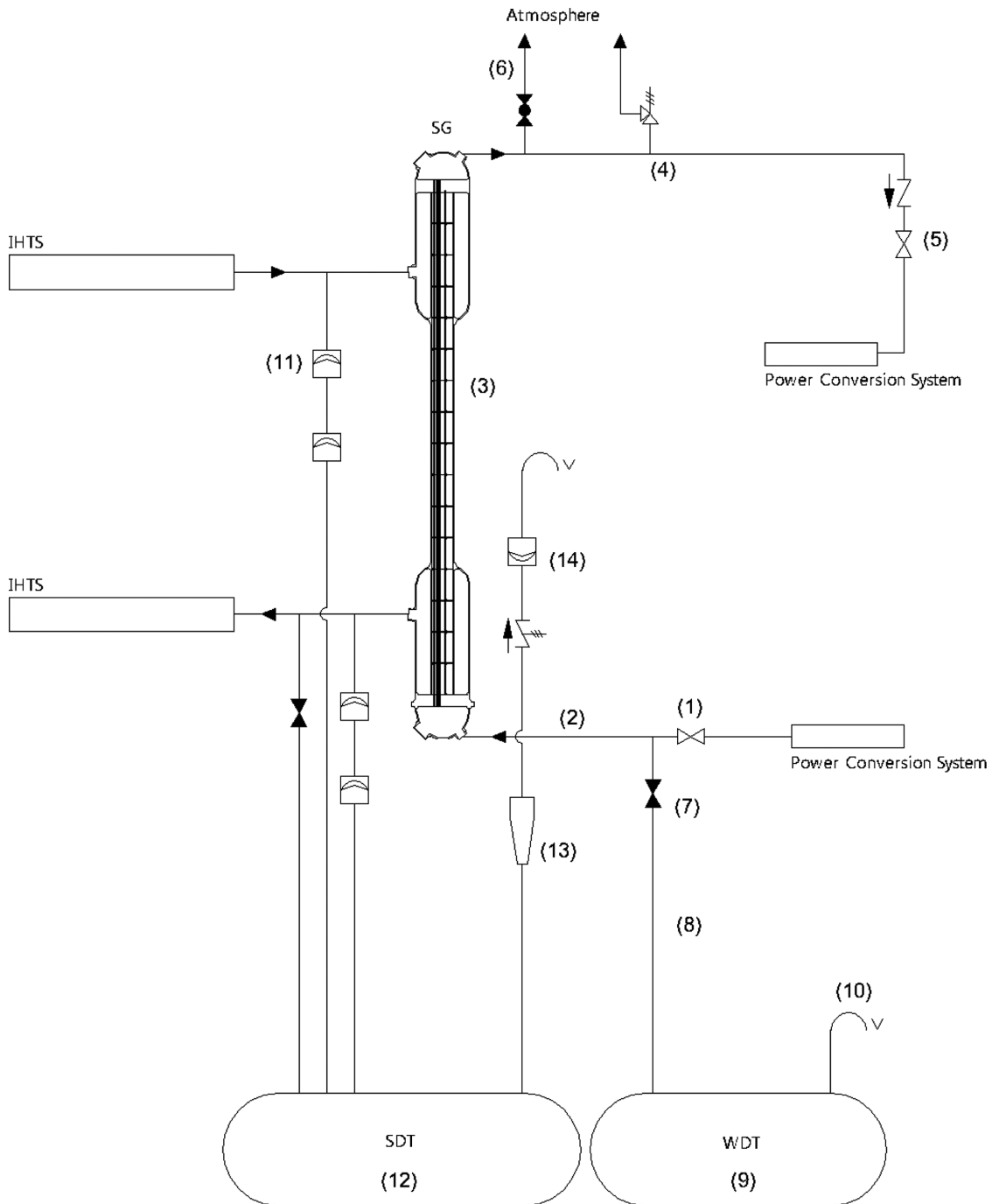


Fig. 1. Schematic diagram of SWRPRS [2].

판의 파열 설정압력을 초과하면, 주파열판이 자동으로 개방(파열)되어 소듐과 반응생성물인 NaOH, Na<sub>2</sub>O, 수소 등은 SDT로 배출된다 [2]. 주급수·주증기 격리밸브는 차단되고 급수 배출밸브와 증기 대기방출밸브는 개방되어 SG 내의 급수·증기는 WDT 및 대기로 배출된다. SG 전열관 측 내부압력은 1.0~1.5 MPa로 유지되도록 질소가

공급된다. 이 때 급수·증기는 SWR에 의한 수소 발생을 최소화하기 위해 신속하게 WDT로 배출되어야 한다. 이를 위해 정상 운전과 재장전 운전에서 급수 배출배관과 가스 방출배관의 직경, 갯수, 길이 등의 조건을 변화시켜 SG 전열관 내 급수·증기를 WDT 및 대기로 배출하는데 소요되는 시간을 계산하였다.

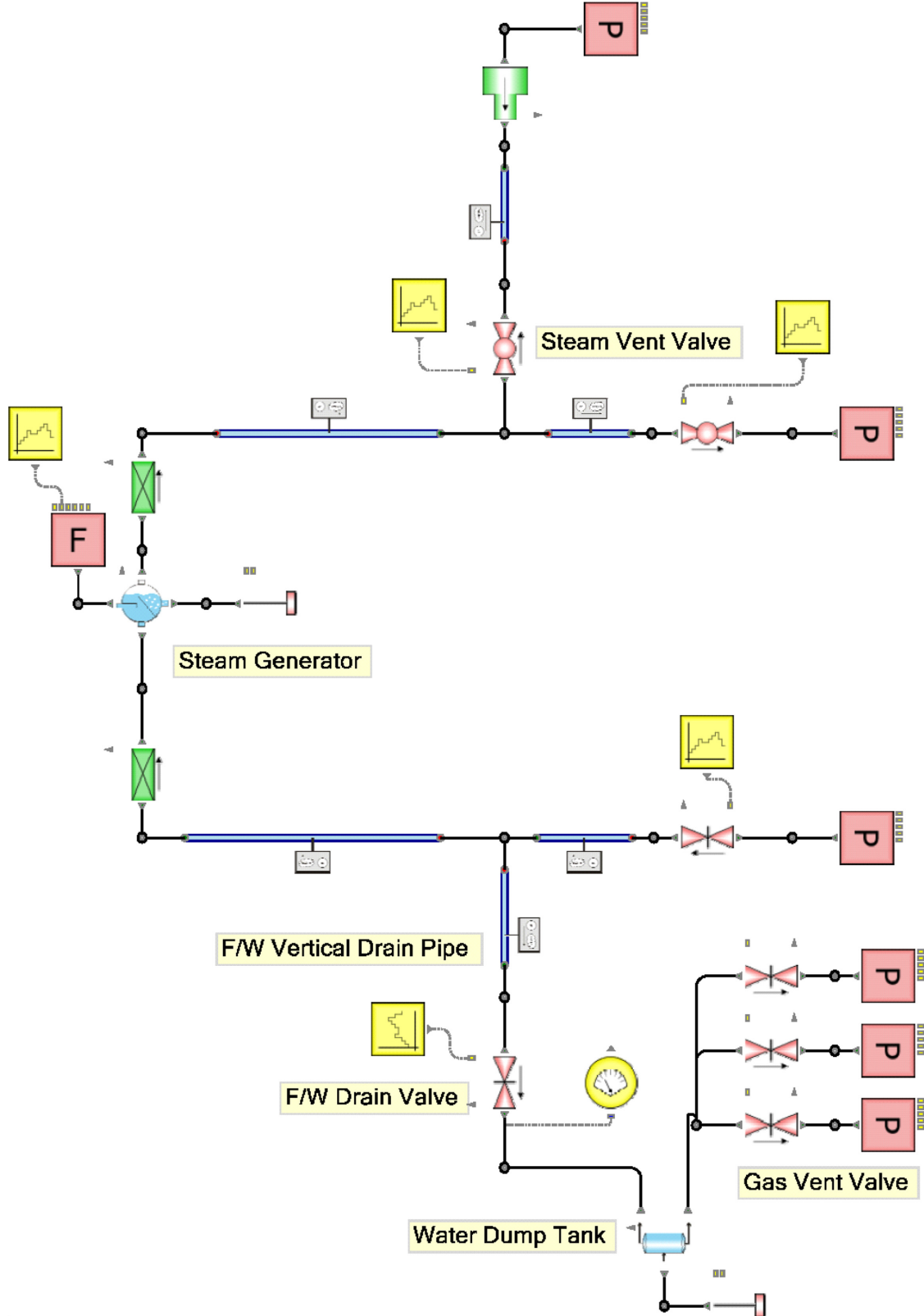


Fig. 2. FLOMASTER modeling for calculating the time of feed water drain.

**Table 1. Input conditions for the FLOWMASTER modeling [2]**

Operation Condition	Normal Operation	- feedwater pipe: 240 °C, 18.0 MPa - steam pipe: 503 °C, 16.7 MPa - flowrate: 86.9 kg/s × 2
	Refueling Operation	- feedwater pipe: 150 °C - steam pipe: 200 °C, 1.55 MPa - flowrate: 23.2 kg/s × 2
Component Specification	Pipe	- feedwater pipe: ID 0.20 m - steam pipe: ID 0.20 m
	Valve	- valve close time: 5 s - feedwater isolation valve: ID 0.20 m - steam isolation valve: ID 0.20 m - steam vent valve: ID 0.05 m
	WDT	- volume: 19.14 m <sup>3</sup>

2-1-1. 급수배출시간 평가 방법

2-1-1-1. 해석 영역

주급수 격리밸브(1), 주급수 배관(2), SG 전열관 측(3), 주증기 배관(4), 주증기 격리밸브(5), 증기 대기방출밸브(6), SG 급수 배출밸브

브(7), SG 급수배출배관(8), WDT(9), WDT 가스방출배관(10)

2-1-1-2. 해석 방법

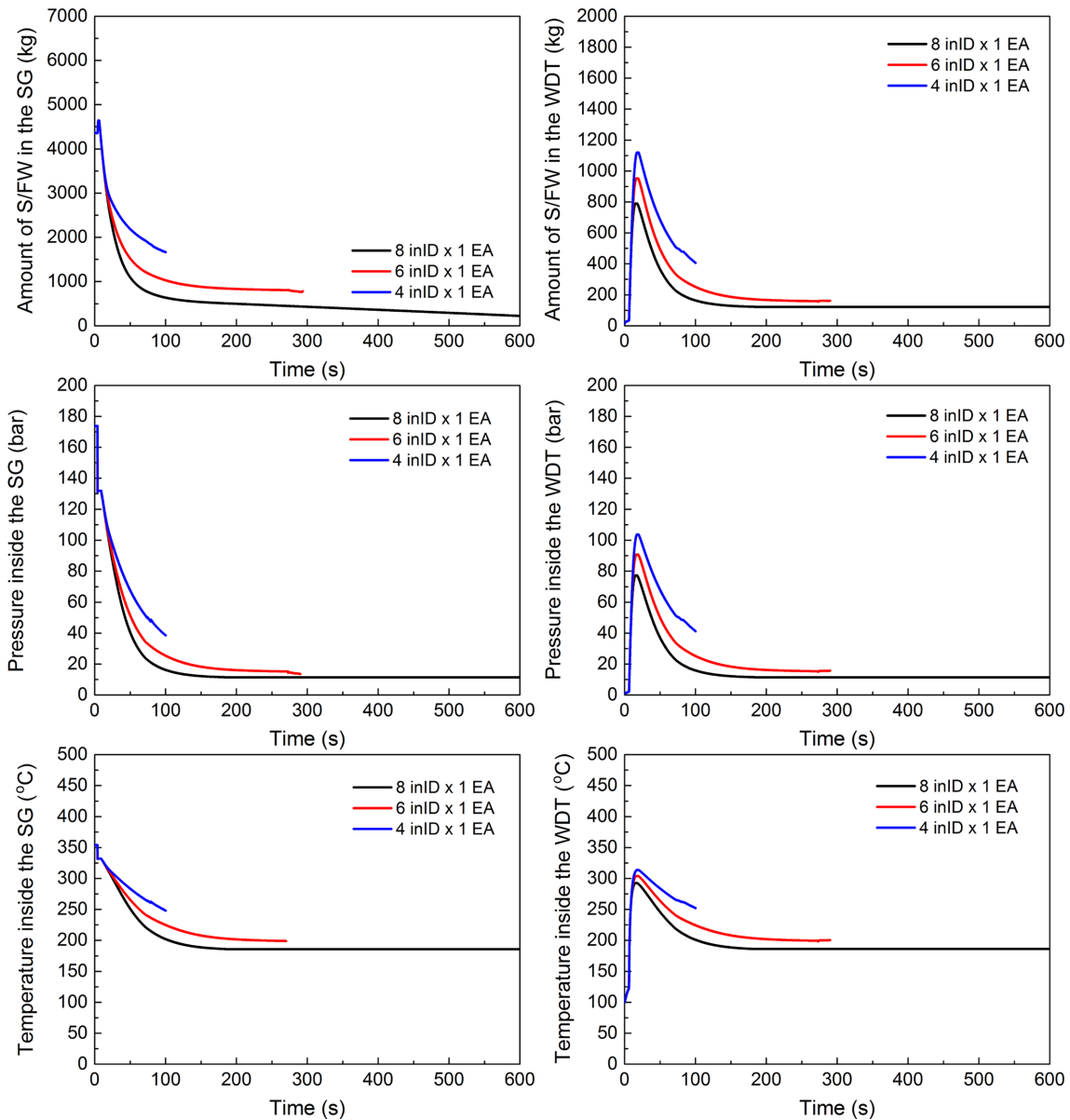
FLOWMASTER (Ver. 7.9.4)를 이용해 위의 해석 영역을 모델링 하였으며(Fig. 2), 모델링 입력 조건은 Table 1에 나타내었다.

2-1-1-3. 해석 case

SG 전열관 측(총 10.6 m<sup>3</sup>)의 상단 챔버(3.6 m<sup>3</sup>)와 전열관(2.6 m<sup>3</sup>)의 급수·증기가 모두 배출되는데 소요되는 시간을 계산하였다. 계산은 정상 운전과 재장전 운전에 대해 수행하였다. 급수배출 시작 후 SG의 전열관 측과 웰 측 간의 열전달은 없는 것으로 가정하였다. 정상 운전 시의 WDT 가스 방출배관 직경(4, 6, 8 inID)과 SG 급수 배출수직배관 길이(10, 20, 30 m)의 영향을 조사하였다. 재장전 운전 시의 WDT 가스 방출배관(8 inID) 갯수(1, 2, 3개)와 SG 급수배출 수직배관 길이(10, 20, 30 m)의 영향을 조사하였다.

2-1-2. 급수배출시간 평가 결과

2-1-2-1. 정상 운전



**Fig. 3. Feed water drain at normal operation along with various WDT gas vent pipe sizes.**

(1) WDT 가스 방출배관 단면적별

정상 운전 시, WDT 가스 방출배관의 단면적별 급수배출시간 simulation 결과를 Fig. 3에 나타내었다(SG 급수 배출수직배관 길이 30 m로 동일 조건). SG 내 급수 증기량(4363.3 kg)은 급수배출시작 100초 후 WDT 가스 방출배관 직경이 8, 6, 4 in일 때 각각 636.0, 1028.5, 1664.2 kg만 잔류한다(99%이상 액체상태). 이는 0.72, 1.19, 1.95 m<sup>3</sup>에 해당하는 체적으로 급수배출시작 100초 후 SG 내부의 급수 증기는 모두 하단 챔버(4.4 m<sup>3</sup>)에만 존재하게 된다. 계산결과는 Table 2에 정리하였다.

(2) SG 급수 배출배관 길이별

정상 운전 시, SG 급수배출 수직배관의 길이별 급수배출시간 simulation 결과를 Fig. 4에 나타내었다(WDT 가스 방출배관 직경 8 in × 1개로 동일 조건). 계산결과 급수 배출배관의 길이를 10, 20, 30 m로 달리 하여도 급수배출시간은 거의 동일하였다.

2-1-2-2. 재장전 운전

(1) WDT 가스 방출배관 단면적별

재장전 운전 시, WDT 가스 방출배관의 단면적별 급수배출시간 simulation 결과를 Fig. 5에 나타내었다(SG 급수 배출수직배관 길이 30 m로 동일 조건). 급수 증기량(6105.4 kg)은 급수배출시작 500초 후 WDT 가스 방출배관 직경 8 in 1, 2, 3개일 때 각각 4521.3,

Table 2. Calculation results of feed water drain for 100 s at normal operation

Inner Diameter of the WDT Vent Pipe [in]	Vertical Length of the SG Drain Pipe [m]	Remained Amount of Water in the SG		Temperature [°C]	Pressure [bar]	Density of Water [kg/m <sup>3</sup> ]
		Mass [kg]	Volume [m <sup>3</sup> ]			
4	30	1664.2	1.95	248.1	38.5	865.4
6	30	1028.5	1.19	224.9	25.4	865.6
8	30	636.0	0.72	202.0	16.2	877.3

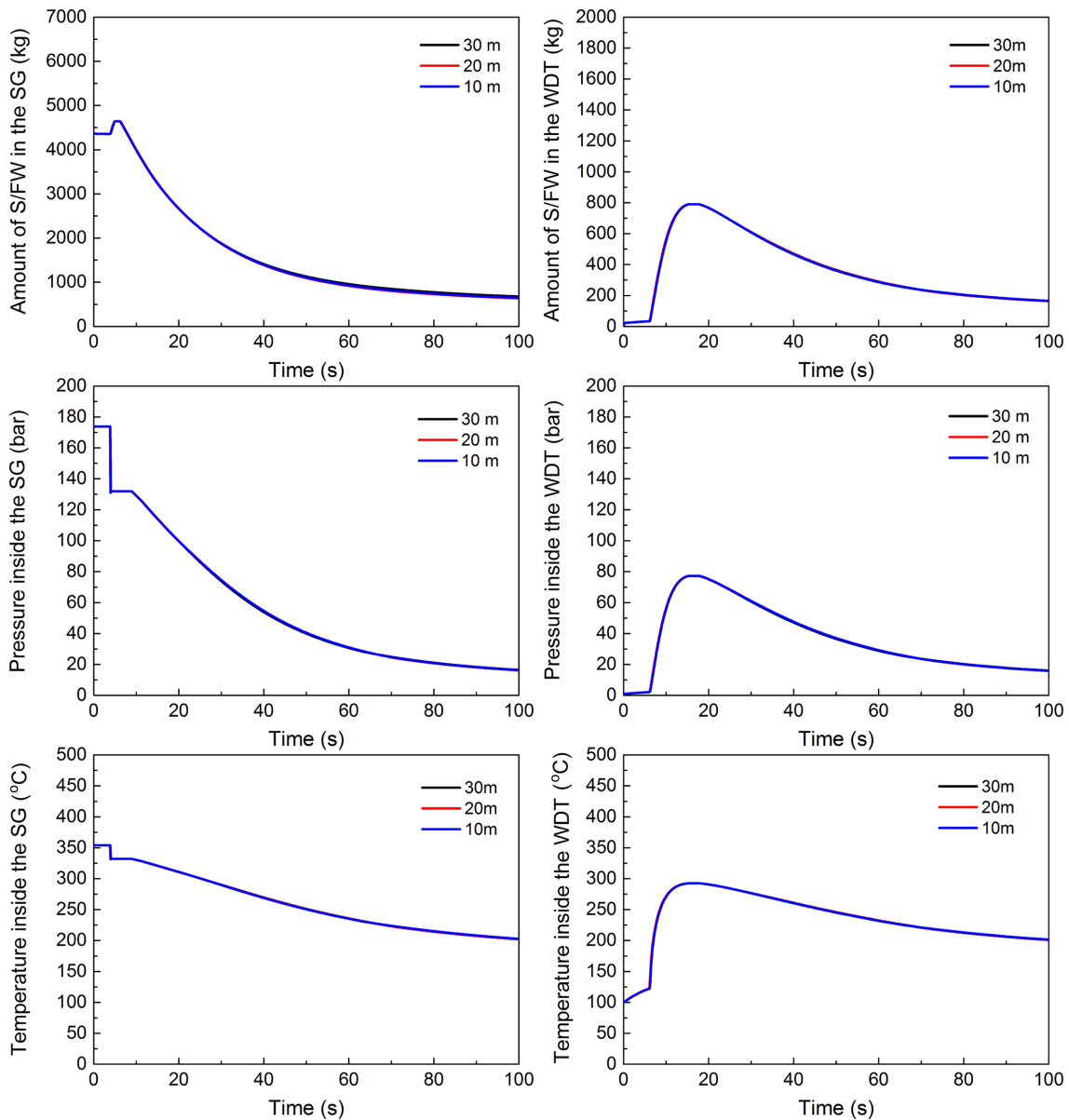


Fig. 4. Feed water drain at normal operation along with various SG feed water drain pipe lengths.

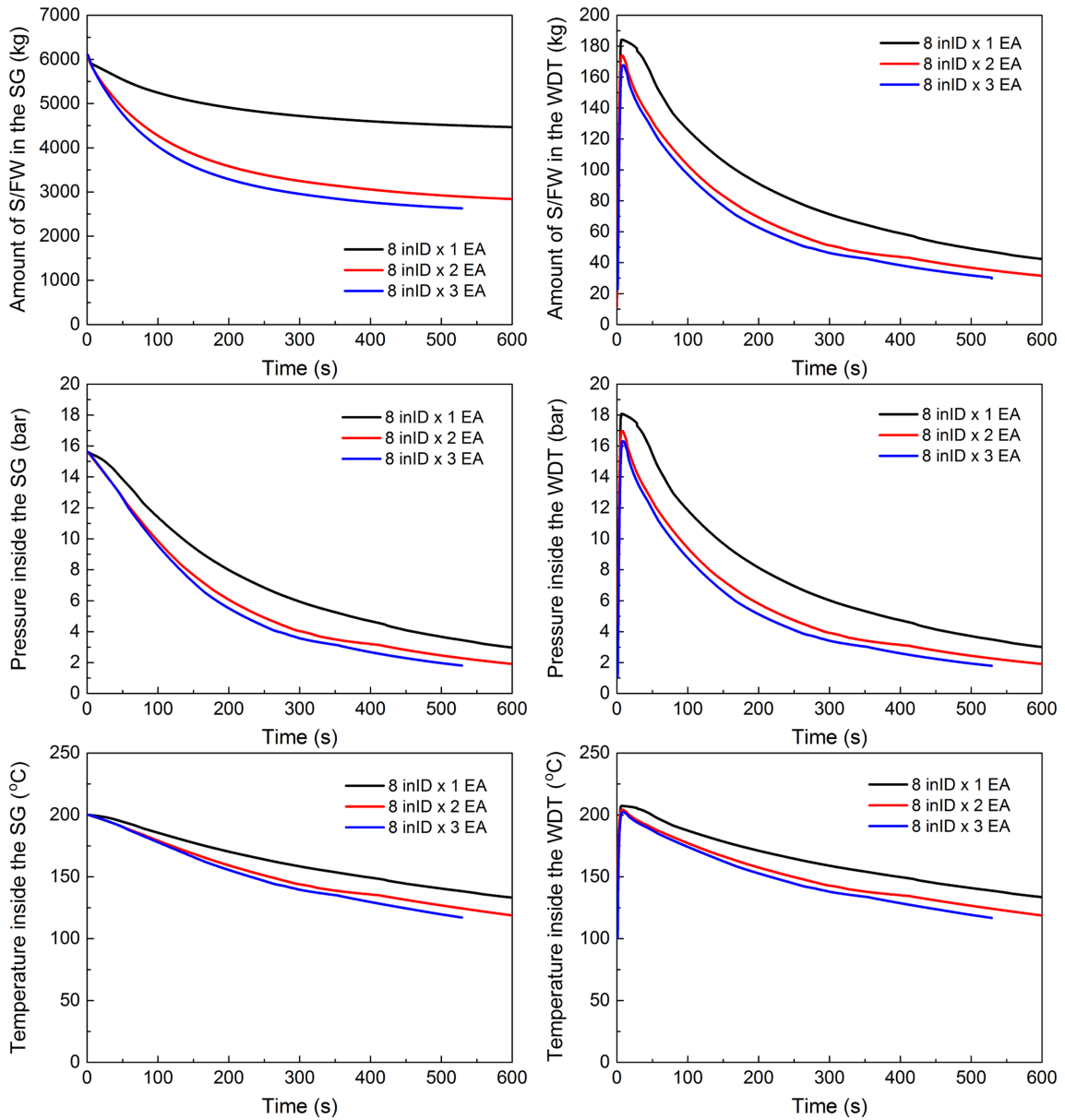


Fig. 5. Feed water drain at refueling operation along with various WDT gas vent pipe sizes.

Table 3. Calculation results of feed water drain for 500 s at refueling operation along with various WDT gas vent pipe areas

cross sectional area of the WDT vent pipe [in]	vertical length of the SG drain pipe [m]	Remained Amount of Water in the SG		Temperature [°C]	Pressure [bar]	Density of Water [kg/m <sup>3</sup> ]
		Mass [kg]	Volume [m <sup>3</sup> ]			
8 inID × 1	30	4521.3	4.96	140.5	3.67	911.0
8 inID × 2	30	2923.5	3.18	126.9	2.46	918.8
8 inID × 3	30	2652.6	2.87	119.7	1.97	923.1

2923.5, 2652.6 kg만 잔류한다(99%이상 액체상태). 이는 4.96, 3.18, 2.87 m<sup>3</sup>에 해당하는 체적으로, 8 in 방출배관이 2개와 3개인 경우에 SG 내부의 급수 증기는 급수배출시작 500초 후 하단 챔버(4.4 m<sup>3</sup>)에만 있게 된다. 계산결과는 Table 3에 정리하였다.

(2) SG 급수 배출배관 길이별

제장전 운전 시, SG 급수 배출배관의 길이별 급수배출시작 simulation 결과를 Fig. 6에 나타내었다(WDT 가스 방출배관 직경 8 in × 3개로 동일 조건). 급수배출배관의 길이를 10, 20, 30 m로 달리 했을 때, SG 내 급수 증기량(6105.4 kg)은 급수배출시작 500초 후

각각 2266.3, 2906.6, 2652.6 kg만 잔류한다(99%이상 액체상태). 이는 2.46, 3.14, 2.87 m<sup>3</sup>에 해당하는 체적으로, 급수 배출배관의 길이 10, 20, 30 m 모든 경우에 대해 SG 내부의 급수 증기는 급수배출시작 500초 후 하단 챔버(4.4 m<sup>3</sup>)에만 있게 된다. 계산결과는 Table 4에 정리하였다.

2-2. SDT 가스방출배관 크기 선정

SWR에 의해 발생한 수소로 인해 SDT에 과압이 형성되면 SDT 가스방출배관에 설치된 배압파열판이 개방되면서 SDT 내 기체가

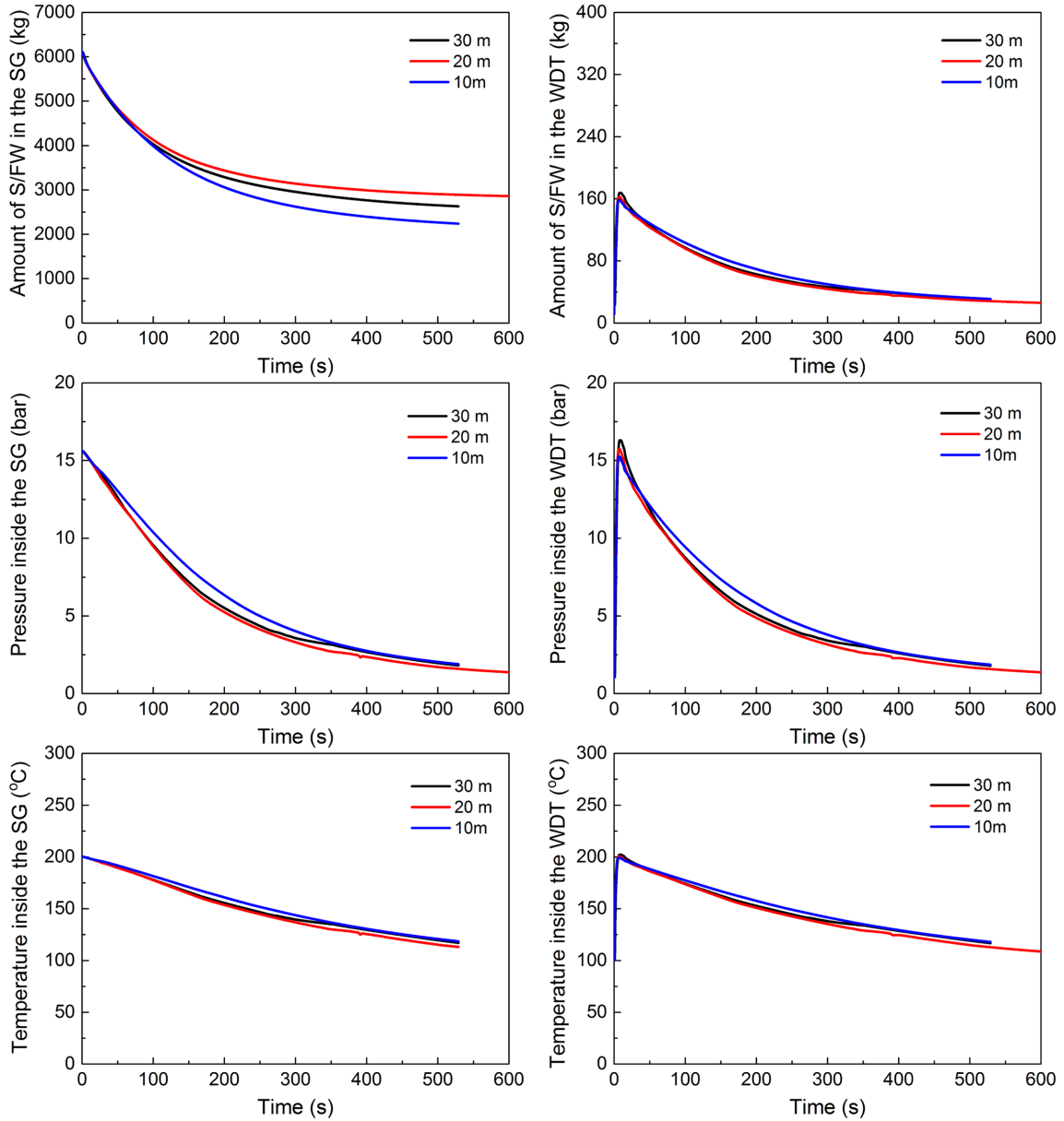


Fig. 6. Feed water drain at refueling operation along with various SG feed water drain pipe lengths.

Table 4. Calculation results of feed water drain for 500 s at refueling operation along with various SG feed water drain pipe lengths

Cross Sectional Area of the WDT Vent Pipe [in]	Vertical Length of the SG Drain Pipe [m]	Remained Amount of Water in the SG		Temperature [°C]	Pressure [bar]	Density of Water [kg/m <sup>3</sup> ]
		Mass [kg]	Volume [m <sup>3</sup> ]			
8 inID × 3	10	2266.3	2.46	120.8	2.04	922.4
8 inID × 3	20	2906.6	3.14	115.3	1.71	925.7
8 inID × 3	30	2652.6	2.87	119.7	1.97	923.1

대기 중으로 방출된다. 방출되는 기체는 수소와 아르곤(SDT 커버 가스)이다. 수소는 아르곤과 혼합 시 3.1% 이상 농도에서 점화 가능 가스로 분류되고, 약 500 °C 이상에서 자연발화의 위험이 있으므로 대기로 방출 시 수소점화기를 이용해 연소시킬 필요가 있다[3-5]. 따라서 SDT에서 방출되는 가스에 포함된 수소를 연소시키기 위해 설치하는 수소점화기의 크기를 결정하는데 필요한 요건인 방출가스 유량, 수소농도, 가스방출배관 직경을 계산하였다.

2-2-1. SDT 가스방출배관 크기 계산

SDT로부터 대기로 방출되는 가스의 유량 및 수소농도는 SDT의 커버가스인 아르곤량, SDT로 유입되는 수소량, SDT 내 가스압력, 방출가스 전속도, 방출배관 단면적으로부터 계산된다. 방출가스 유량( $F_{vent}$ )과 수소농도( $C_{H,vent}$ )는 mass balance, momentum balance, energy balance를 연계하여 계산한다. 방출가스의 수소농도는 SDT 내의 수소농도와 같다고 가정한다.

$$F_{vent} = v_{vent} \times A_{vent} \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (1)$$

$$C_{H,vent} = C_{H,SDT} = \frac{n_{H,SDT}}{n_{H,SDT} + n_{Ar,SDT}} \times 100 \text{ [mol\%]} \quad (2)$$

$F_{vent}$  : volumetric flow rate of the vent gas [m<sup>3</sup>/s]

$v_{vent}$  : linear velocity of the vent gas [m/s]

$A_{vent}$  : inner cross sectional area of the vent pipe [m<sup>2</sup>]

방출가스의 선속도( $v_{vent}$ )는 유체의 압축성을 고려한 momentum balance로부터 구한다. 계산된 선속도가 유체 온도에서 음속에 도달하면, 유체는 임계유동(critical flow) 특성을 보이므로 이 때의 방출 가스 선속도는 유체 온도에서의 음속으로 결정한다. SDT 내 가스는 방출배관에 설치된 배압과열관의 과열설정 압력(0.3 MPa)보다 컸을 때 방출되는 것으로 계산한다[2,6].

$$v_{vent} = \sqrt{\frac{1}{K_{total}} \frac{2k}{k-1} \left( \frac{P_{SDT,gage}}{\rho_{SDT}} - \frac{P_{vent,gage}}{\rho_{vent}} \right)} \text{ [m/s]} \text{ when } v_{vent} < c_{T_{vent}} \quad (3)$$

$$v_{vent} = c_{T_{vent}} = \sqrt{kRT_{vent}} \text{ [m/s]} \text{ when } v_{vent} \geq c_{T_{vent}} \quad (4)$$

$$K_{total} = K_{friction} + K_{rupture\ disk} \quad (5)$$

$$K_{fric} = \left( 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \right) \frac{L_{vent}}{D_{vent}} \quad (6)$$

$$K_{RD} = \left( 0.707 \sqrt{\left( 1 - \frac{A_{RD}}{A_{vent}} \right)^3 + 1} - \frac{A_{RD}}{A_{vent}} \right) \left( \frac{A_{vent}}{A_{RD}} \right)^2 \quad (7)$$

$k$  : average ratio of specific heats for H<sub>2</sub> and Ar

$P_{SDT,gage}$  : gage pressure of gas in the SDT [Pa]

$P_{vent,gage}$  : gage pressure of vent gas [Pa]

$\rho_{SDT}$  : density of gas in the SDT [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{vent}$  : density of vent gas [kg/m<sup>3</sup>]

$c_T$  : sound speed at the temperature [m/s]

$R$  : gas constant [J/mol·K]

$T_{vent}$  : temperature of the vent gas [K]

$K_{total}$  : total loss factor

$K_{friction}$  ( $K_{fric}$ ) : friction loss

$K_{rupture\ disk}$  ( $K_{RD}$ ) : loss at rupture disk

$A_{RD}$  : cross sectional area of the rupture disk [m<sup>2</sup>]

SDT의 가스압력( $P_{SDT}$ )과 밀도( $\rho_{SDT}$ ), 방출가스의 밀도( $\rho_{vent}$ )는 식 (12), (13), (14)로 구한다. 수소와 아르곤은 이상기체에 가까우므로 이들의 밀도는 이상기체 상태방정식으로 계산한다. SDT의 수소 몰수( $n_{H,SDT}$ )는 소듐-물반응에 의한 수소생성량과 대기로 방출되는 수소량의 차로 계산한다.

수소생성량은 설계기준누출(design basis leak, DBL)을 전열관 5개의 양단파단(double ended guillotine, DEG)으로 가정하고 소듐과 물 사이 반응을 고려하여 계산한다. 이때 소듐과 물은 동일 공간에 존재하면 반응이 순간적으로 일어나며(instantaneous reaction model), 소듐으로 유입된 물은 모두 소듐과 반응한다고 가정하였다. 또한 물 누출은 전열관이 과열되자마자 바로 평형의 상태에 도달한다고 가정하였다. 반응 시 생성되는 수소의 양은 물에서 수소로의 전환비(conversion ratio)의 함수이며, 기포는 등온팽창하는 일정온도 모델을 적용하였다. 전열관 양단파단에 의한 증기 누출이 발생하

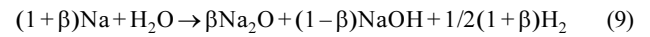
였을 때 고압의 SG 전열관 측 증기와 상대적으로 저압으로 유지되는 SG 셀 측 소듐 간의 큰 압력차로 인해 누출되는 증기는 임계유량으로 가정할 수 있으며, 한 개의 전열관에서 누출되는 증기의 양은 아래의 임계유속 상관식(critical flow correlation)을 통해 계산할 수 있다[7].

$$G_{leak} = \frac{0.53 P_{tube}}{1.62708 \times 10^{-7} \times (h_g - 430.195)} \quad (8)$$

$P_{tube}$ : saturation pressure of steam [Pa]

$h_g$ : enthalpy of steam [J/kg]

전열관 직경과 SG의 운전조건을 적용한 5DEG의 설계기준 누출량은 21 kg/s 이다. 소듐-물반응은 주로 아래 식과 같은 형태의 반응에 대해 이루어지며, 이를 이용하여 수소 생성량을 계산한다.



여기서 반응빈도상수(reaction frequency constant)  $\beta$ 는 0에서 1사이 값을 갖는다. 계통 내 압력거동에 주된 영향을 미치는 수소기체의 생성량에 대한 화학양론적 반응상수(stoichiometric reaction constant)  $\alpha$ 는 반응빈도상수에 의해 다음과 같은 관계로 정의한다.

$$\alpha = 1/2(1 + \beta) \quad (10)$$

$\alpha$ 는 소듐과 물의 화학반응 시 생성되는 수소의 양을 계산하기 위한 일종의 mole 단위 전환상수(molar conversion factor)로 물 1 mole 당 0.7 mole의 수소가 생성하는 것으로 보고되고 있으므로[7,8], 반응빈도상수는 위 식에 의해 0.4가 된다. 따라서 단위 시간당 생성되는 수소 질량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{H_2, generation} = 0.7 \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \dot{m}_{H_2O, leak} \quad (11)$$

위식에 의해 계산한 수소의 생성량은 1653.2 g/s 이다.

급수배출완료 시간인 500초 이후에는 소듐-물 반응이 없다고 가정하여 SDT로 유입되는 수소유량은 500초 이후에는 0 g/s로 계산한다. SDT의 아르곤 몰수( $n_{Ar,SDT}$ )는 식 (12)로 계산한다. SDT의 가스체적은 SDT로 유입되는 SG와 중간열교환기의 소듐 총량에 여유공간을 더한 SDT의 부피인 170.7 m<sup>3</sup>에서 SDT로 유입되는 소듐유량인 5.19 m<sup>3</sup>/s를 제외한 부피인 식 (16)으로 계산한다.

$$P_{SDT} = P_{H,SDT} + P_{Ar,SDT} = \frac{RT_{SDT}(n_{H,SDT} + n_{Ar,SDT})}{V_{SDT,CG}} \text{ [Pa]} \quad (12)$$

$$\rho_{SDT} = \rho_{H,SDT} + \rho_{Ar,SDT} = \frac{(P_{H,SDT}M_H + P_{Ar,SDT}M_{Ar})}{RT_{SDT}} \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (13)$$

$$\rho_{vent} = \rho_{H,vent} + \rho_{Ar,vent} = \frac{P_{vent}(C_{H,SDT}M_H + C_{Ar,SDT}M_{Ar})}{RT_{vent}} \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (14)$$

$$T_{SDT,t2} = \frac{\dot{m}_{H,inlet}\Delta T C_{V,H}T_{inlet} + (m_{H,SDT}C_{V,H} + m_{Ar,SDT}C_{V,Ar})T_{SDT,t1}}{\dot{m}_{H,inlet}\Delta T C_{V,H} + m_{H,SDT}C_{V,H} + m_{Ar,SDT}C_{V,Ar}} \quad (15)$$

$$V_{SDT,CG} = V_{SDT} - \frac{\dot{m}_{Na}\Delta t}{\rho_{Na}} \text{ [m}^3\text{]} \quad (16)$$

$$n_{H,SDT} = \frac{(\dot{m}_{H,inlet} - \dot{m}_{H,vent})\Delta t}{M_H} \text{ [mol]} \quad (17)$$

$$n_{Ar,SDT} = \frac{m_{Ar,initial} - \dot{m}_{Ar,vent}\Delta t}{M_{Ar}} \text{ [mol]} \quad (18)$$

$$T_{inlet} = \frac{\dot{m}_{H_2,inlet} C_{V_H} T_{SWR} \Delta t - \dot{m}_{Na,SG} C_{V_{Na}} T_{SG}}{\dot{m}_{H_2,inlet} C_{V_H} \Delta t + \dot{m}_{Na,SG} C_{V_{Na}}} \text{ [K]} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{H_2,inlet} = F_{vent} \times C_{H_2,inlet} \times \rho_{H_2,inlet} \text{ [g/s]} \quad (20)$$

$$\dot{m}_{Ar,vent} = F_{vent} \times C_{Ar,vent} \times \rho_{Ar,vent} \text{ [g/s]} \quad (21)$$

$P_{H_2,SDT}$ : pressure of H<sub>2</sub> in the SDT [Pa]

$P_{Ar,SDT}$ : pressure of Ar in the SDT [Pa]

$V_{SDT,CG}$ : volume of the cover gas in the SDT [m<sup>3</sup>]

$V_{SDT}$ : volume of the SDT [m<sup>3</sup>]

$\rho_{H_2,SDT}$ : density of H<sub>2</sub> in the SDT [g/m<sup>3</sup>]

$\rho_{Ar,SDT}$ : density of Ar in the SDT [g/m<sup>3</sup>]

$M_{H_2}$ : molar mass of H<sub>2</sub> [g/mol]

$M_{Ar}$ : molar mass of Ar [g/mol]

$\rho_{H_2,vent}$ : density of H<sub>2</sub> in the vent gas [g/m<sup>3</sup>]

$\rho_{Ar,vent}$ : density of Ar in the vent gas [g/m<sup>3</sup>]

$T_{vent}$ : temperature of the vent gas [K]

$T_{SDT,t}$ : temperature of the cover gas in the SDT at time t [K]

$T_{inlet}$ : temperature of the inlet fluid into the SDT [K]

$C_{V_H}$ : heat capacity of H<sub>2</sub> at constant volume [J/g·K]

$C_{V_{Ar}}$ : heat capacity of Ar at constant volume [J/g·K]

$\dot{m}_{H_2,inlet}$ : mass flow rate of H<sub>2</sub> at SDT inlet [g/s]

$\dot{m}_{Ar,inlet}$ : mass flow rate of Ar at SDT inlet [g/s]

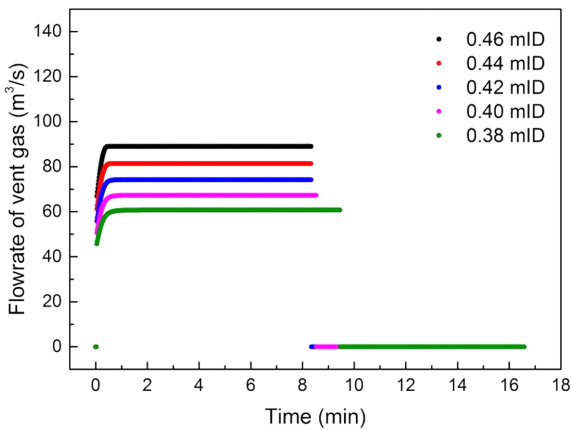


Fig. 7. Flow rate of the vent gas from the SDT along with various SDT gas vent pipe sizes.

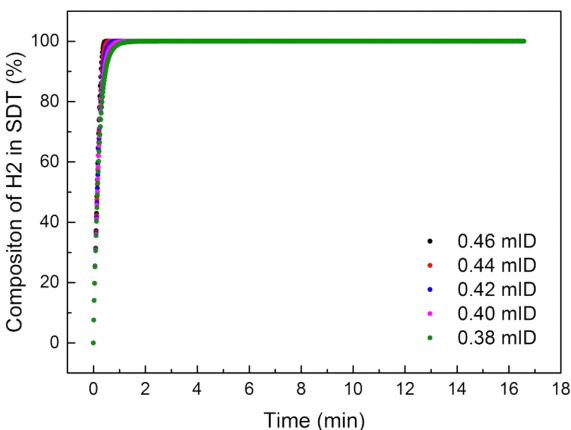


Fig. 8. Composition of hydrogen in the SDT along with various SDT gas vent pipe sizes.

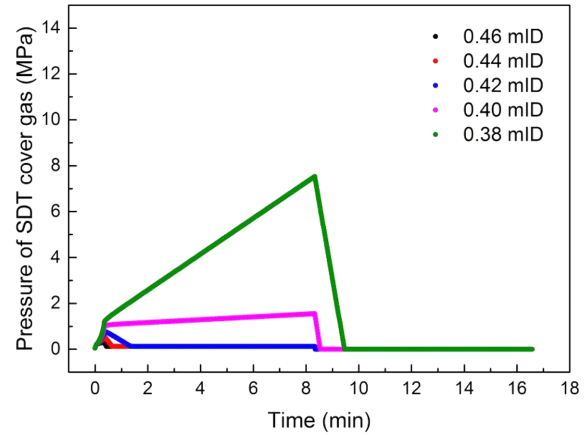


Fig. 9. Cover gas pressure inside the SDT along with various SDT gas vent pipe sizes.

$\dot{m}_{H_2,vent}$ : mass flow rate of vent H<sub>2</sub> [g/s]

$\dot{m}_{Ar,vent}$ : mass flow rate of vent Ar [g/s]

$\dot{m}_{Na,inlet}$ : mass flow rate of Na at SDT inlet [g/s]

### 2-2-2. SDT 가스방출배관 크기 계산 결과

SDT 방출가스 배관면적별 방출가스 유량, 수소농도, SDT 압력의 계산결과를 Fig. 7, 8, 9에 나타내었다. SDT 가스 방출배관 내경이 0.38 m 이하에서 SDT압력이 지속적으로 누적되는 현상이 나타났고, 0.40 m 이상에서 SDT 설계압력인 3.5 MPa[2]를 넘지 않으면서 수소/아르곤 혼합가스가 방출되었다. 이 때 가스유량은 67.3 m<sup>3</sup>/s, 수소농도는 100%(방출 47초 후 99%에 도달)이다.

## 3. 결 론

PGSFR SG의 전열관 누설에 의한 SWR 발생 시, SG 내 급수·증기를 신속하게 WDT로 배출할 수 있는 조건을 도출하는 simulation을 수행하였고 SDT의 설계압력을 만족시키는 가스방출배관의 직경을 계산하였다.

정상 운전과 재장전 운전에서 WDT 가스방출배관과 SG 급수배출배관의 직경, 갯수, 길이 등의 조건을 변화시켜 SG 전열관 내 급수·증기를 WDT 및 대기로 배출하는데 소요되는 시간을 계산하였다. 정상 운전 시, WDT 가스 방출배관 4, 6, 8 in에 대해(SG 급수 배출배관 길이 30 m로 동일), 급수배출시작 100초 후 결과에서 SG 내 급수·증기는 모두 하단 챔버(4.4 m<sup>3</sup>)에만 잔류하는 것으로 계산되었다. SG 급수 배출배관 길이(10~30 m)에 따른 SG 내 급수·증기 잔량은 거의 동일하다. 재장전 운전 시, WDT 가스 방출배관 8 in 2, 3개에 대해(SG 급수 배출배관 길이 30 m로 동일), 급수배출시작 500초 후 결과에서 SG 내 급수·증기는 모두 하단 챔버에만 잔류하는 것으로 계산되었다. SG 급수 배출배관 길이(10~30 m)에 따른 SG 내 급수·증기 잔량은 급수 배출배관의 길이 10, 20, 30 m 모든 경우에 대해 급수배출시작 500초 후 결과에서 모두 하단 챔버에만 잔류하는 것으로 계산되었다.

SDT 가스방출배관의 직경, 방출가스의 유량 및 수소농도를 계산하였다. SDT 설계압력인 3.5 MPa를 만족하는 방출배관 최소 내경인 0.40 m에서 방출가스유량은 67.3 m<sup>3</sup>/s이고 수소농도는 100.0%이다(배압과열관 파열에 의한 방출시작 47초 후 99%에 도달).

## 감 사

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. Tim, A. and Sue, I., "Generation-IV Nuclear Power: A Review of the State of the Science," *Energy Policy*, **36**(11), 4323-4330 (2008).
2. Sodium cooled Fast Reactor development Agency, "PGSFR Preliminary Safety Information Document," Korea Atomic Energy Research Institute, 2015.
3. Safety Data Sheet "Flammable Gas Mixture: Argon 1-96.89% / Hydrogen 3.11-99%," AirGas 002005, 2016.
4. Frederick Gregory, "Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation," NASA NSS 1740.16, 1997.
5. Jung, H. J., Yoon, I. K. and Choi, S. H., "Quantitative Risk Analysis of a Pervaporation Process for Concentrating Hydrogen Peroxide," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(6), 750-754(2014).
6. 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).
7. 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**, 286-301(2005).
8. Hori, M., "Sodium/Water Reactions in Steam Generators of Liquid Metal Fast Breeder Reactors," *Atomic Energy Review*, **18**(3), 707-778(1980).