

소듐냉각고속로용 인쇄기판형 증기발생기의 열성능 및 소듐-물 반응 압력전파에 대한 수치적 연구

김상지*[†] · 김태우**

Numerical Analysis on the Thermal Performance and Pressure Propagation by the Sodium-Water Reaction of the Printed Circuit Steam Generator for the Sodium-Cooled Fast Reactor

Sang Ji Kim*[†], Taewoo Kim**

Key Words : CFD(전산유체역학), Printed Circuit Steam Generator(인쇄기판형 증기발생기), Pressure propagation(압력전파), Sodium-Water Reaction(소듐-물 반응), Thermal sizing(열적 크기 산정)

ABSTRACT

The Printed Circuit Heat Exchanger is expected to dramatically improve the safety and economics of the Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) when it used as the steam generator. In this study, the thermal performance of the Printed Circuit Steam Generator (PCSG) and the pressure propagation by the Sodium-Water Reaction is numerically analyzed. Based on the stress calculation for the wall of flow channel and the 1D heat transfer analysis, the cross-section and length of PCSG is determined. The STAR-CCM+ is used to evaluate the thermal performance of designed PCSG. Although the flow maldistribution (~19%) exists in the feed water channels, the analyzed thermal power is around 26 MW close the target thermal power. The SWR pressure propagation is analyzed by the SWAAM-II Code. There is no pressure propagation from the PCSG to the Intermediate Heat Transport System of the SFR due to the volume difference between the flow channel and header.

1. 서 론

소듐냉각고속로(SFR)는 압력경계 파손으로 인한 소듐-물 반응 사고가 발생하는 것을 방지하기 위하여 증기발생기를 원자로 용기 외부에 위치시키며, 증기발생기로 공급되는 소듐은 원자로 내부의 열교환기에서 일차적으로 열을 교환하여 방사선오염물질을 포함하지 않는다⁽¹⁾. 소듐냉각고속로 원형로(PGSFR)의 개념 설계 단계에서 다양한 방식의 증기발생기가 검토되었지만, 직관을 병렬로 배열하여 제작되는 원통다관형(shell and tube type) 증기발생기가 제작성과 확장성 측면에서 우수함을 인정받아 채택되었다. 그러나, 높은 열전달률을 달성하기 위해서는 증기발생기의 길이가 길어져야한다. 또한, 전열관 파손에 의해 고압 급수가 소듐

이 있는 원통 측으로 누출 시, 소듐-물 반응이 빠르게 전파되어 중간열전달계통 전체의 건전성을 저하시키는 문제가 있다. 전열관 파손 시에도 사고 가능성을 낮춘 이중관형이 제안되었지만, 높은 전도열저항으로 인해 전체 크기가 증가하는 문제로 경제성 개선이 필요하다. 이와 같이 원통다관형 증기발생기는 기술적 한계를 가지고 있기 때문에 안전성과 경제성을 개선할 새로운 개념의 증기발생기 개발이 필요하다.

인쇄기판형 열교환기(PCHE)는 광화학적 식각방법을 통해 금속판에 유로를 제작하고, 확산접합을 이용하여 금속판을 적층시켜 제작되는 고집적 열교환기이다. 유로 직경은 수 mm로 단위체적당 전열면적이 높으며, 확산접합부의 강도가 원재료와 동일수준으로 고온 및 고압에 대한 내구성이

* 한국원자력연구원, 다목적원자로기술개발부 (Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)

** 과학기술연합대학원대학교, 한국원자력연구원 캠퍼스 (University of Science and Technology, UST)

† 교신저자, E-mail : sjkim3@kaeri.re.kr

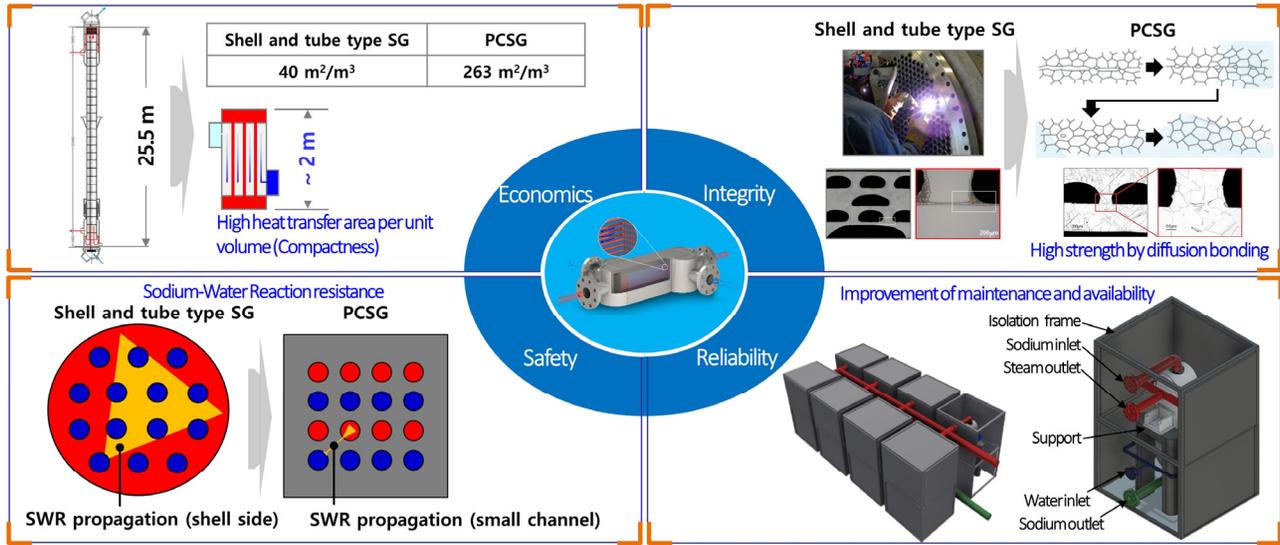


Fig. 1 Advantages of the Printed Circuit Steam Generator (PCSG)

우수하다. 인쇄기판형 열교환기는 고출력밀도로 인하여 열 전달 능력이 떨어지는 단상 기체 열교환기 분야에서 주로 사용되어 왔다. 최근 원자력발전소의 증기발생기를 인쇄기판형 열교환기로 대체하고자 인쇄기판형 증기발생기(PCSG)에 대한 연구가 시도되고 있다. 소형 모듈형 원자로인 IRIS의 증기발생기를 인쇄기판형 증기발생기로 대체하면 기기의 체적이 1/43로 줄어든다고 보고되었다.⁽²⁾ 작은 체적으로 인하여 예비용을 포함한 다 수의 증기발생기가 사용가능하다. 이는 증기발생기 사고 대응 및 유지보수를 용이하게 하고 원자로 정지를 막아 가용성이 향상될 수 있다. 특히, 소듐냉각고속로에 인쇄기판형 증기발생기 적용 시, 소듐-물 반응에 의한 사고가 단일 유로로만 전파되기 때문에 대형사고로서의 확대가 근원적으로 차단되는 것으로 예상된다.⁽³⁾ 그러나, 인쇄기판형 증기발생기에 관한 연구는 열적 크기 산정⁽⁴⁾외에는 수행되지 않았다. 최근 인쇄기판형 열교환기 내부 상변화에 대한 연구들이 수행되었지만, 작동유체가 냉매, 이산화탄소, 액화천연가스였다.⁽⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 기존의 소듐냉각고속로용 증기발생기를 인쇄기판형 증기발생기로 대체 시의 효과를 열성능 및 소듐-물 반응에 대한 안전성 측면에서 분석하였다. ASME Code Case를 바탕으로 인쇄기판형 증기발생기의 단면에 대한 응력 평가를 하였고, 열적 크기 산정을 위해 1차원 열전달 해석을 수행하였다. 크기 산정 결과를 바탕으로 파울링으로 인한 유로막힘 및 이상유동불안전성을 고려한 급수 유로 설계안을 제시하였다. 설계안에 대한 열성능 평가를 위해 STAR-CCM+를 사용하여 전산유체역학 해석을 수행하였다. 소듐-물 반응에 대한 안전성 평가는 SWAAM-II 코드를 사용하여 증간열전달계통에 가장 큰 영향을 미치는 압력전파를 해석하였고, 원통다관형과 인쇄기판형 증기발생기에 대한 해석결과를 비교하였다.

2. 인쇄기판형 증기발생기 열적 크기 산정

2.1 인쇄기판형 증기발생기 단면 치수 결정

소듐냉각고속로용 인쇄기판형 증기발생기의 열적 크기 산정을 위해 Fig. 2와 같이 소듐 유로와 급수 유로를 배치하였다. 각 유로 벽면들은 유로 내부 압력으로 인해 막응력과 굽힘응력을 받게 된다. 증기발생기 설계 압력은 소듐 5 MPa, 급수 20 MPa로 급수 측의 고압으로 인해 유로 벽면에 대한 응력 평가가 필수적이다. 인쇄기판형 증기발생기의 설계 기준은 ASME 원자력기기 기술기준에 등재되어 있지 않고, 인쇄기판형 열교환기에 대한 기술기준이 ASME BPVC Code case⁽⁸⁾에 일부 등재되어 있다. Kim 등⁽⁹⁾은 ASME Section VIII, Division 1⁽¹⁰⁾의 사각형 단면을 가진 압력용기에 대한 응력계산식과 확산접합 열교환기 허용압력 기준을 바탕으로 인쇄기판형 열교환기의 단면 치수를 결정하였다. 동일한 방법을 사용하여 인쇄기판형 증기발생기 유로 벽면에 가해지는 응력을 계산하고, 유로 크기 및 벽면 두께는 Table 1에 정리되어 있다. 측면(t_{side})에 가해지는 막응력(S_m)과 굽힘응력(S_b)은 다음과 같다.

$$S_{m,side} = \frac{PW}{2t_{side}} \left\{ 3 - \left[\frac{6 + K(11 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \right\} \quad (1)$$

$$S_{b,side} = \frac{Pt_{side}}{48I_{side}} \left\{ -3W^2 + 2H^2 \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \right\} \quad (\text{점 N}) \quad (2)$$

$$S_{b,side} = \frac{PH^2 t_{side}}{24I_{side}} \left(\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right) \quad (\text{점 Q}) \quad (3)$$

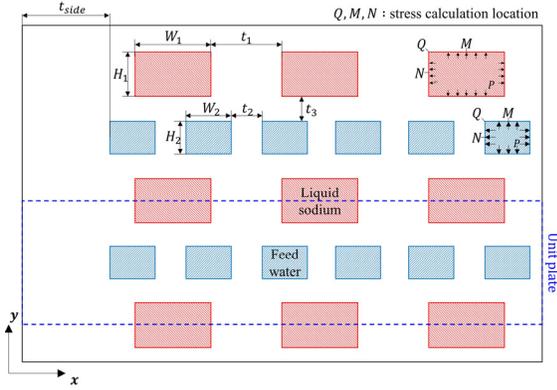


Fig. 2 Cross-section of the PCSG

P 는 유로 설계압력, W 는 유로 너비로 소듐, 급수 유로의 내부압력과 높이를 사용하여 각 유로에 대한 측면(t_{side}) 응력을 계산한다. K 는 용기 매개변수, α 는 사각 용기 매개변수로 유로 크기에 의해 결정되며 다음과 같다.

$$K = \frac{I_3}{I_{side}} - \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{H}{W} \quad (5)$$

$$I_3 = \frac{t_3}{12} \quad (6)$$

$$I_{side} = \frac{t_{side}}{12} \quad (7)$$

H 는 유로 높이, t 는 t 에 대한 단위 길이 관성모멘트이다. 전체 응력은 막응력과 굽힘응력의 합으로 N과 Q 위치에서 각각 계산한다.

$$S_{t,side} = S_{m,side} (\text{식 1}) + S_{b,side} (\text{식 2, 3}) \quad (8)$$

유로 사이의 벽면(t_1, t_2)에서는 양 옆의 유로 압력이 동일하므로 굽힘응력이 작용하지 않으며, 막응력은 다음과 같다.

$$S_m = \frac{PW}{2t} \left[\frac{6 + K(11 + \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (9)$$

소듐과 급수 유로 사이의 벽면(t_3)에 작용하는 막응력과 굽힘응력은 다음과 같다.

$$S_m = \frac{PH}{2t_3} \quad (10)$$

$$S_{b,3} = \frac{PW^2 t_3}{24I_3} \left[\frac{3 + K(6 - \alpha^2)}{3 + 5K} \right] \quad (\text{점 M}) \quad (11)$$

$$S_{b,3} = \frac{PW^2 t_3}{24I_3} \left[\frac{3 + 5\alpha^2 K}{3 + 5K} \right] \quad (\text{점 Q}) \quad (12)$$

측면 두께와 동일하게 막응력과 굽힘응력의 합으로 M, Q 위치의 전체 응력을 계산한다.

$$S_{t,3} = S_{m,3} (\text{식 10}) + S_{b,3} (\text{식 11, 12}) \quad (13)$$

Table 1 Dimensions of the PCSG cross-section

| Parameter | Value (mm) |
|--|------------|
| Side wall thickness, t_{side} | 49.5 |
| Width of sodium channel, W_1 | 4.5 |
| Height of sodium channel, H_1 | 4.0 |
| Wall thickness between sodium channels, t_1 | 4.1 |
| Width of water channel, W_2 | 3.0 |
| Height of water channel, H_2 | 1.5 |
| Wall thickness between water channels, t_2 | 2.0 |
| Wall thickness between sodium and water channel, t_3 | 1.5 |

Table 2 Stress calculation results

| Location | Stress | Sodium (MPa) | Feed water (MPa) | ASME criterion (MPa) |
|------------|-----------|--------------|------------------|----------------------|
| t_{side} | S_m | 0.23 | 0.61 | 78.4 |
| | $S_{b,N}$ | 0.22 | 0.63 | - |
| | $S_{b,Q}$ | 0.016 | 0.0092 | - |
| | $S_{t,N}$ | 0.45 | 1.26 | 117.6 |
| | $S_{t,Q}$ | 0.24 | 0.62 | 117.6 |
| t_1 | S_m | 2.75 | - | 78.4 |
| t_2 | S_m | - | 15 | 78.4 |
| t_3 | S_m | 6.67 | 20 | - |
| | $S_{b,N}$ | 22.50 | 40.0 | - |
| | $S_{b,Q}$ | 22.50 | 40.0 | - |
| | $S_{t,N}$ | 29.17 | 60.0 | 117.6 |
| | $S_{t,Q}$ | 29.17 | 60.0 | 117.6 |

소듐냉각고속로용 인쇄기판형 증기발생기의 설계온도는 550°C이며, 후보재료는 Incoloy 800H이다. ASME Code Section II, Part D⁽¹¹⁾에 정의된 Incoloy 800H의 허용응력 (S)은 112 MPa이고, 인쇄기판형 증기발생기의 막응력(S_m)은 재료 허용응력에 이음 계수($E=0.7$) 곱한 SE 보다 작아야 한다. 전체 응력(S_t)은 $1.5SE$ 보다 작아야 하며, Table 2에 식 (1)~(13)로 계산한 응력과 허용응력을 비교하였다. 모든 위치에서 ASME 응력 기준을 만족하며, 최대 응력은 t_3 에서의 전체응력으로 안전계수 1.96의 여유를 가진다.

2.2 인쇄기판형 증기발생기 길이 결정을 위한 1차원 열 전달 해석

소듐과 급수 유로의 길이는 소듐에서 급수로 전달되는 열 전달량을 계산하여 목표값 만족여부를 통해 결정한다. 소듐과 급수 유로는 Fig. 2와 같이 주기적으로 배치되어있어, Fig. 3(a)에 정의된 부영역(Subdomain)에서의 열전달량(q)만 계산한다. Fig. 3(b)와 같이 길이 방향으로 체적을 등분하고, 열저항 회로(Thermal resistance network)를 사용하여 각 체적에서의 열전달(q_{cv})을 1차원으로 계산한다.

$$q_{cv} = \frac{T_1 - T_2}{R_{conv,1} + R_{cond} + R_{conv,2}} \quad (14)$$

$R_{conv,1}$, R_{cond} , $R_{conv,2}$ 는 소듐 유로 벽면에서의 대류 열저항, 전도 열저항, 급수 유로 벽면에서의 대류 열저항으로 다음과 같다.

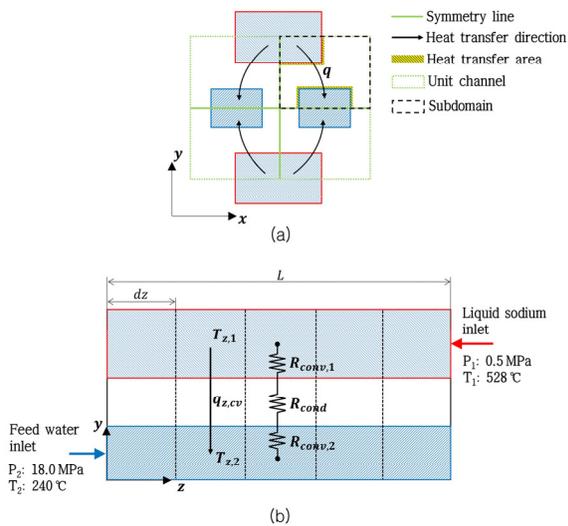


Fig. 3 (a) Cross-section of unit channel and (b) thermal resistance network for a discretized control volume along the length

$$R_{conv,1} = \frac{1}{h_1(W_1/2 + H_1/2)dz} \quad (15)$$

$$R_{cond} = \frac{t_3}{k_i} \quad (16)$$

$$R_{conv,2} = \frac{1}{h_2(W_2 + H_2)dz} \quad (17)$$

h_1 , h_2 는 소듐과 급수의 대류 열전달계수이고 k 는 Incoloy 800H의 열전도도이다. 소듐의 대류 열전달계수는 실험상관식⁽¹²⁾을 통해 계산한다.

$$h_1 = \frac{k}{D_h} [5 + 0.02(RePr)] \quad (18)$$

k , Re , Pr , D_h 는 액체 소듐 열전도도, Reynolds 수, Prandtl 수, 수력직경이다. 액체 소듐 물성치는 아르곤 국립 연구소의 보고서⁽¹³⁾를 바탕으로 도출한다. 급수 유로에서는 물에서 증기로의 상변화가 발생하므로 열평형 증기 건도(x_{eq})를 기준으로 단상 열전달계수($h_{2,s}$), 비등 열전달계수($h_{2,b}$)를 계산한다. 급수 유로 내 물, 증기의 Reynolds 수 범위는 9,000~80,000으로 Gnielkinksi 상관식을 사용하여 단상 열전달계수를 계산한다.

$$h_{2,s} = \frac{(Re - 1000)(f/2)Pr}{1 + 12.7(Pr^{2/3} - 1)(f/2)^{0.5}} \frac{k}{D_h} \quad (x_{eq} \leq 0, x_{eq} \geq 1) \quad (19)$$

$$f = [1.58 \ln(Re) - 3.28]^{-2}$$

증기 건도 0.1~0.8 범위에 적용 가능한 Kandlikar 상관식을 사용하여 비등 열전달계수를 계산한다.

$$h_{2,b} = \max(h_{NBD}, h_{CBD}) \quad (0 < x_{eq} < 1) \quad (20)$$

$$h_{NBD} = h_{f0} \left[\begin{aligned} &0.6683 Co^{-0.2} (1-x)^{0.8} f(Fr_{f0}) \dots \\ &+ 1058 Bo^{0.7} (1-x)^{0.8} F_{fl} \end{aligned} \right]$$

$$h_{CBD} = h_{f0} \left[\begin{aligned} &1.136 Co^{-0.9} (1-x)^{0.8} f(Fr_{f0}) \dots \\ &+ 667.2 Bo^{0.7} (1-x)^{0.8} F_{fl} \end{aligned} \right]$$

h_{f0} 는 단상 열전달계수로 식 (19)을 사용하여 계산하고, Co , Bo 은 Convection, Boiling 수이다. $f(Fr_{f0})$, F_{fl} 는 각각 1이다. 물, 증기 물성치는 REFPROP database를 바탕으로 계산하고, 열평형 증기 건도는 다음과 같다.

$$x_{eq} = \frac{i(T,P) - i_{sat}(T,P)}{i_{fg}(T,P)} \quad (21)$$

는 엔탈피로 온도와 압력을 바탕으로 도출한다. 온도는 열저항을 바탕으로 계산된 식 (14)의 열전달량을 사용하여 식 (22)와 같이 계산한다.

$$T_z = T_{z-1} - \frac{q_{cv}}{m C_p} \quad (22)$$

\dot{m} 는 질량유량, C_p 는 열 용량이다. 소뿔 유로 압력과 급수 단상 유동에 대한 압력은 압력강하 식 (23)을 사용하여 계산한다.

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2f\dot{m}^2}{\rho D_h} + \rho g \quad (23)$$

$$f = \begin{cases} 16/Re & (Re \leq 2000) \\ 0.079Re^{-0.25} & (Re > 2000) \end{cases}$$

급수 유로 내 비등으로 인한 압력강하는 이상유동 압력강하 식을 사용하여 계산한다.

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2f\dot{m}^2(1-x)^2}{\rho D_h} \phi^2 + G^2 \left(\frac{1}{\rho_g - \rho_f} \right) \frac{dx}{dz} + \rho_m g \quad (24)$$

G 는 단위 면적 질량유량, ρ_m 는 물-증기 혼합물 밀도이다. 하첨자 g 는 단상 증기, f 단상 물 유동을 의미한다. ϕ^2 는 이상유동 압력강하 증가계수로 Martinelli 상관식을 사용하여 계산한다.

$$\phi^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (25)$$

$$C = 21 [1 - \exp(-0.319D_h/1000)]$$

$$X^2 = \frac{2f_f G^2 (1-x)^2}{\rho_f D_h} / \frac{2f_g G^2 x^2}{\rho_g D_h}$$

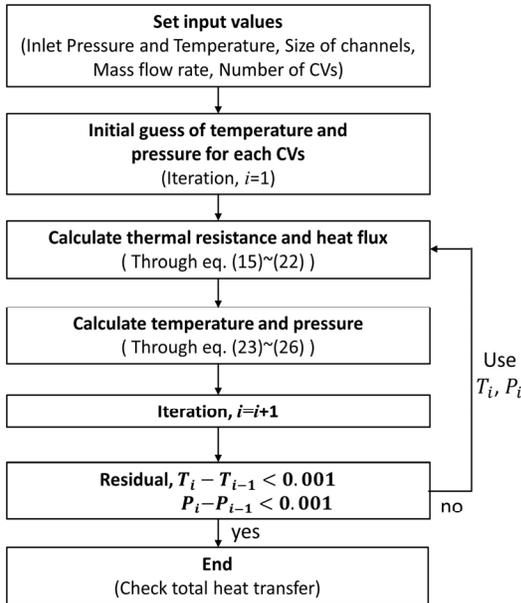


Fig. 4 Flow chart of 1D heat transfer analysis to determine the length of PCSG

Table 3 Inlet values for the 1D heat transfer analysis and design condition of PCSG

| Channel | Inlet values for 1D analysis | | |
|---|------------------------------|----------|----------------|
| | Temperature | Pressure | Mass flow rate |
| Sodium | 528 °C | 0.5 MPa | 0.0211 kg/s |
| Feed water | 240 °C | 18 MPa | 0.0015 kg/s |
| Parameter | Design condition | | |
| Outlet steam temperature | 503 °C | | |
| Allowable Pressure drop in secondary side | 1.3 MPa | | |
| Target thermal power for subdomain | 3346 W | | |

Fig. 4는 식 (14)~(25)의 계산 흐름도를 보여주며, 입력 값으로 입구 압력, 온도, 유량, 계산 체적 수를 설정한다. 식 (14)~(21)을 계산하기 위해서는 온도와 압력이 필요하며 초기 가정값을 사용하고 반복계산 단계를 $i=1$ 로 설정한다. 온도 가정값을 바탕으로 열저항과 열전달량 계산 후, 식 (22)~(25)를 통해 온도와 압력을 재계산하고 계산단계를 $i=i+1$ 로 설정한다. 재계산된 온도, 압력이 이전 계산단계에서의 온도, 압력과 차이가 0.001°C 또는 0.001 Pa 이상이면 재계산된 온도, 압력을 사용하여 열저항, 열전달량(식 (14)~(21))을 다시 계산한다. 수렴조건을 만족할 때까지 반복계산하며, 수렴될 경우 전체 열전달량을 계산하여 목표 열출력과 비교한다. Table 3에 해석에 사용된 유로 입구조건 및 설계조건을 정리되어 있다.

2.3 인쇄기판형 증기발생기 1차원 열전달 해석 결과

유로 길이를 늘려가며 1차원 열전달 해석을 수행하였고, Fig. 5는 2 m 유로 길이에 대한 1차원 열전달해석 결과이다. 열전달 영역은 급수 유로를 기준으로 단상 물, 비등, 단상 기체 세 가지 영역으로 구분되어 있다. 급수 유로 내 물의 온도가 포화온도가 되기 전까지의 소뿔 유로로부터 전달되는 열전달은 단상 대류열전달계수로 결정된다. 물의 온도가 포화 온도 이상이 되면 단상 열전달계수에서 비등 열전달계수로 급증하게 되며, 동시에 열유속 또한 급증한다. 동시에 이상 유동의 효과로 급수 측의 압력강하 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 열평형 증기 건도가 1 이상이 되었을 때, 비등 열전달계수에서 단상 기체 열전달계수로 감소하게 되고, 열유속 또한 감소하게 된다. 급수 측은 과열증기 상태로 온도가 꾸

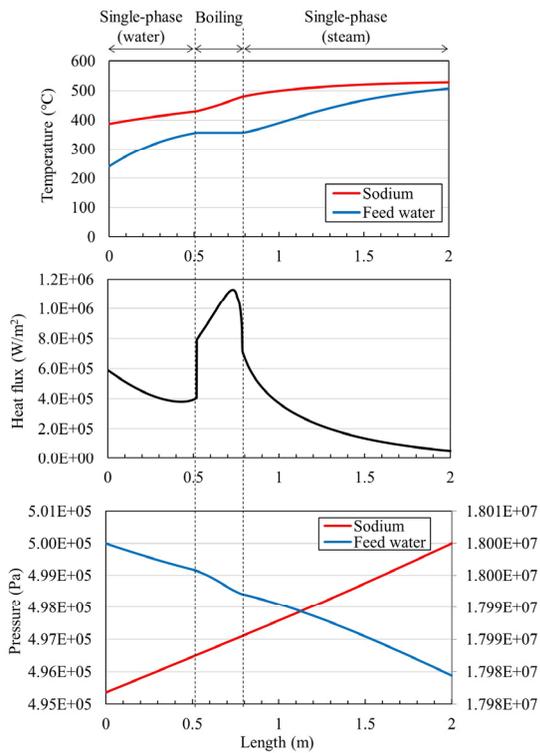


Fig. 5 1D heat transfer analysis of the PCSG

준히 증가한다. 전체 열전달량은 3714 W, 출구 증기 온도는 506°C, 급수 유로 압력강하는 21 kPa로 설계조건을 모두 만족한다.

3. 인쇄기판형 증기발생기 열성능 평가

3.1 인쇄기판형 증기발생기 상세 유로 설계

열적 크기 산정을 통해 결정된 유로 단면 및 길이를 바탕으로 상세 유로 설계안을 수립하고, 전산유체역학 해석을 통해 Fig. 2에 정의된 단위 유로판(Unit plate)을 대상으로 열성능을 평가한다. Fig. 6은 소듐 유로의 상세 설계로, 대칭

선을 중심으로 판재의 반만 보여준다. 소듐 유로 개수와 길이는 열적 크기 산정으로 결정된 개수와 크기와 동일하며, 사고 발생 시 소듐의 빠른 배출을 위해 -z 방향으로 흐른다. 급수 유로 설계 시에는 파울링으로 인한 유로 막힘, 이상유동불안정성으로 인한 안전성 저하, 열성능 확보를 위한 균일 유량 분포가 고려되어야 한다. Fig. 7은 급수 유로의 상세 설계안으로 대칭 선을 중심으로 반만 보여준다. 헤더 위치를 고려하여 입구는 -x 방향, 출구는 +x 방향으로 설계한다. 열적 크기 산정에서 결정된 단위 유로판의 급수 유로 개수는 120개이지만, 유로 막힘 및 이상유동불안정성 억제를 위해 고려한 설계안으로 인해 입/출구 측은 15개의 평행 유로로 설계한다. 유체 혼합을 야기시켜 유로 막힘을 억제하는 방안으로 입/출구 후단에 격자형 유로를 배치한다.

이상유동불안정성은 입구 측에 유로저항을 높여 억제 가능하며, 상관식을 사용하여 이상유동불안정성이 발생하지 않는 유로저항값을 도출한다. Once-through형 증기발생기에 대한 이상유동불안정성 상관식⁽¹⁴⁾을 사용하면 이상유동불안정성이 발생하지 않는 최소 유로저항은 26으로 도출된다. 180° 밴드형 오리피스는 유로저항이 1.5로 입구 측에 30개의 오리피스를 배치하여 45의 유로저항값을 가진다. 비등이 발생하는 영역은 단상 유동 영역에 비해 파울링이 더 많이 발생하므로 유로 막힘에 가장 취약하다. 격자형 보다 더 강한 유체 혼합을 야기시키기 위해 비등 영역에서는 3D 유로⁽¹⁵⁾를 사용한다. Fig. 8과 같이 판재 윗면에 특정 패턴을 가진 유로를 식각하고, 아랫면에 길이방향 형상은 동일하지만 좌우가 윗면과 반대인 패턴으로 유로를 식각한다. 격자형과 3D 유로 영역에서는 모든 유로가 평행 방향으로 연결되어 있으므로 균일한 유량분포가 유지되어야 한다. 균일 유량분포를 위해 출구 측에 수평방향으로 동일한 압력강하가 필요하다. 출구 유로 방향으로 인해 동일한 압력강하를 발생시키기 어려우므로, 입구 측에 사용된 오리피스를 출구 측에 10개 배치하여 높은 압력강하를 발생하게 한다. 즉, 출구 방향에 의한 압력강하 차이가 오리피스의 높은 압력강하로 인해 무시되는

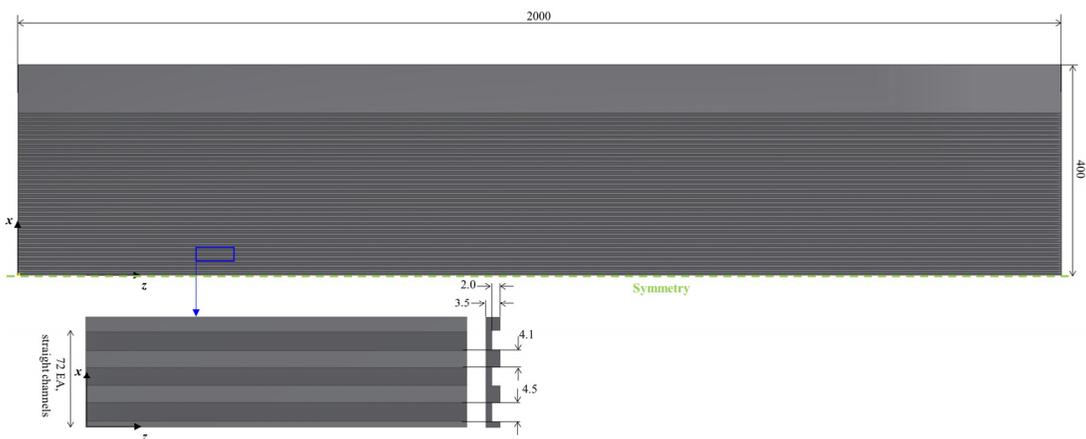


Fig. 6 Details of sodium channel plate of the PCSG (All dimensions in mm)

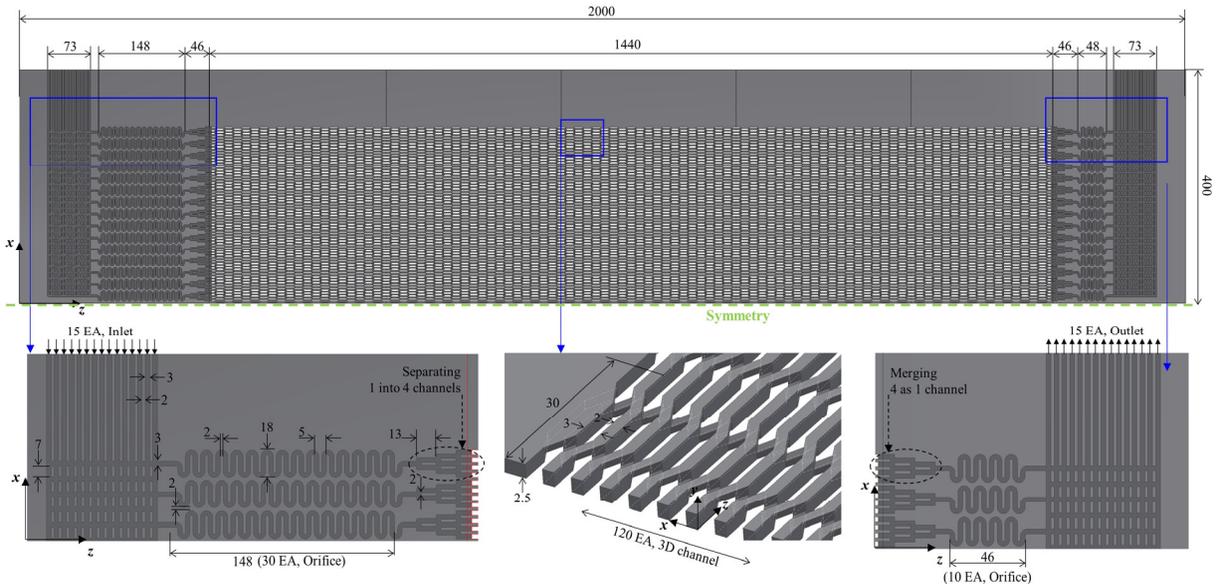


Fig. 7 Details of water channel plate of the PCSG (All dimensions in mm)

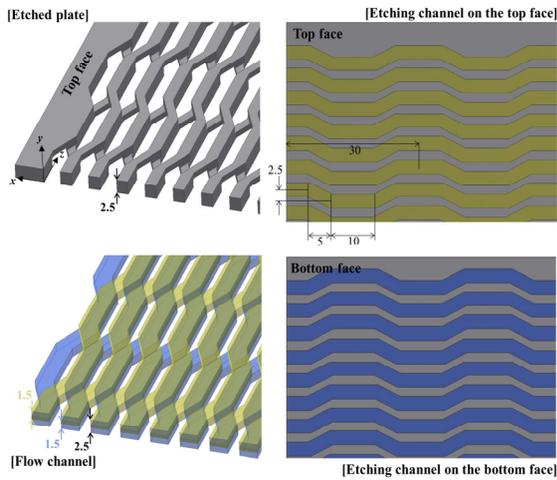


Fig. 8 Details of the 3D channel (All dimensions in mm)

효과이다. 입·출구 오리피스 측과 3D 유로 연결을 위해 분기유로와 병합유로를 각각 배치한다.

3.2 전산유체역학 모델링

급수 측의 3D 유로와 유동 분포를 고려하여 3차원 전산 유체역학 해석을 수행하였고 경계조건은 Fig. 9와 같다. 각 소듐 유로의 질량유량 입구조건은 0.0223 kg/s, 528°C이다. 각 급수유로는 0.006 kg/s, 240°C 입구조건을 가지며, 출구는 압력경계조건으로 소듐 측은 0.5 MPa, 급수 측은 16.7 MPa이다. 대칭면을 제외한 외부 벽면은 단열조건으로 하며, 판재 접촉면에서의 접촉저항은 없다고 가정한다. Fig. 10은 격자형상을 보여주며 사용된 총 격자 수는 2억 개 가량이다.

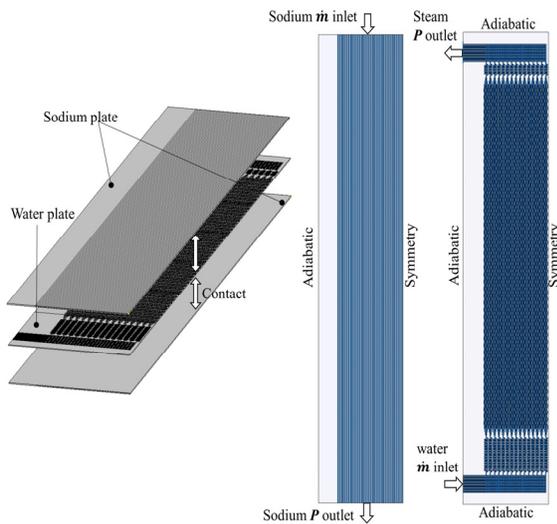


Fig. 9 Boundary condition for the CFD analysis

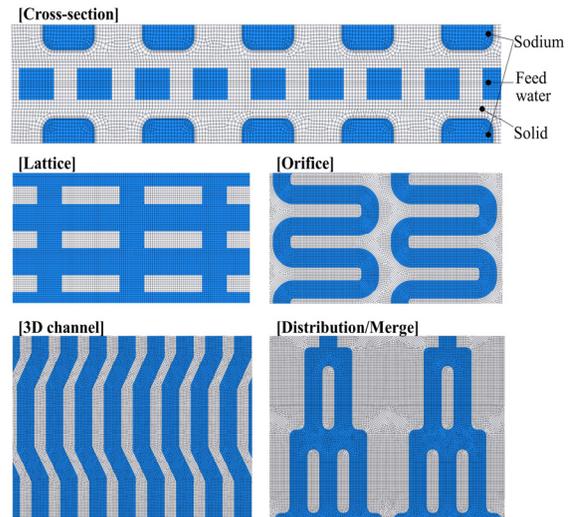


Fig. 10 Mesh configuration

전산유체역학 해석을 위해 STAR-CCM+를 사용하였으며, 물과 증기의 물성치는 IAPWS-IF97 모델로 계산한다. 소듐 물성치는 1차원 열전달해석과 동일하게 아르곤 국립 연구소의 보고서⁽¹³⁾를 바탕으로 도출한다. 난류 모델은 SST k-w 모델을 사용하며, 이상유동모델은 VOF transition boiling 모델을 사용한다. 급수 측으로 들어오는 물이 전부 과열증기로 변하는 열전달해석을 위해서는 핵비등, 천이비등, 막비등을 포함하는 넓은 범위의 비등열전달 해석이 요구된다. VOF transition boiling 모델은 핵비등, 천이비등, 임계열유속 조건에서의 벽면 과열도와 열유속 관계를 실험값을 바탕으로 모사하는 모델이다.⁽¹⁶⁾

3.3 전산유체역학 해석 결과

Fig. 11은 소듐과 급수 유로의 온도 분포 및 급수 유로의 증기 분율을 보여준다. 왼쪽 유로로 갈수록 온도가 낮아지며, 증기 분율 또한 동일한 경향이 나타난다. 이는 급수 측의 불균일한 유량 분포로 인한 결과로, 출구 측의 오리피스 수가 충분하지 않은 것으로 판단된다. Fig. 12와 같이 급수 측의 유량은 왼쪽으로 갈수록 높아진다. 출구로 갈수록 유량의 불균일도는 증가하며, 평균 대비 최대 19%의 유량불균일도가 발생한다. 유로의 유로저항으로 인한 압력강하는 속도의 제곱에 의해 결정되고, 물이 증기로 바뀌면서 유체의 속도가 증가하게 된다. 따라서, 출구 측으로 갈수록 수평방향 압력강하 차이가 증가하며 유로저항이 상대적으로 낮은 왼쪽 유로 편으로 유량이 증가하게 된다. 급수 유량이 높을수록 소듐 유로로부터 전달되는 열전달량이 작아져 유량이 높은 유로의 온도와 증기 분율이 낮아진다.

Fig. 13은 Fig. 11에 표시된 점선 영역에서의 온도, 열유속, 증기분율을 보여준다. 온도와 증기분율은 유로 단면에

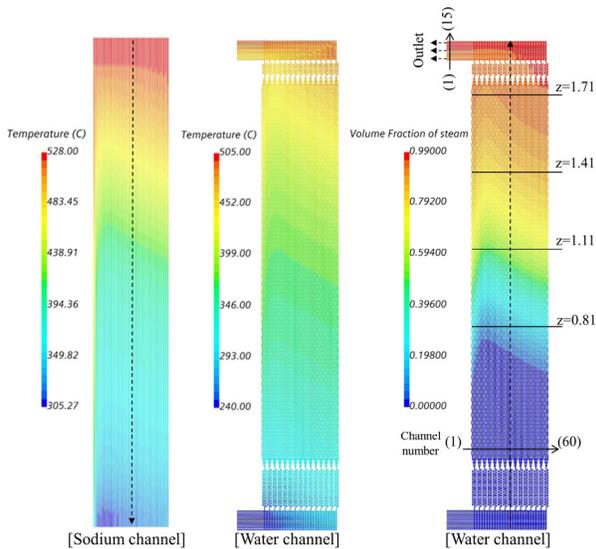


Fig. 11 Temperature and volume fraction contour

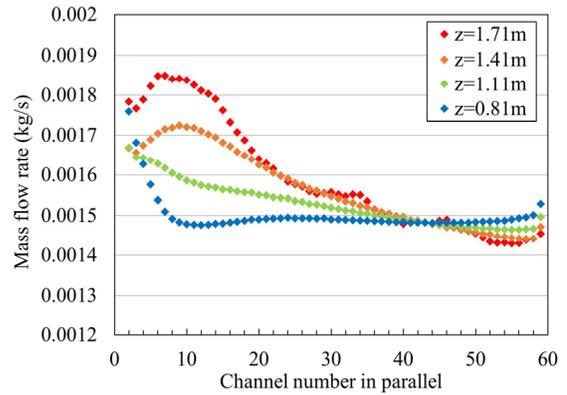


Fig. 12 Distribution of water mass flow rate in parallel

서의 평균값이며, 열유속은 급수 유로 벽면에서의 평균값이다. 1차원 열전달 해석과 온도, 열유속 분포는 다르지만, 증기의 출구 온도는 498°C로 목표값에 근접하다. 증기 분율이 0 이상이 되는 위치부터 열유속이 증가하기 시작하고 증기 분율 0.88이 될 때 최대열유속이 발생하며 이후 감소하기 시작한다. 증기분율 0~0.88 사이의 영역은 비등이 전체열전달에 지배적이며 파울링에 취약하지만, 3D 유로에서만 비등이 존재하기 때문에 유로막힘은 발생하지 않을 것으로 예상된다. 소듐, 급수 유로의 전체 압력강하는 각각 5.72 kPa, 232.04 kPa으로 급수 유로의 경우 1차원 해석결과와 210 kPa 정도

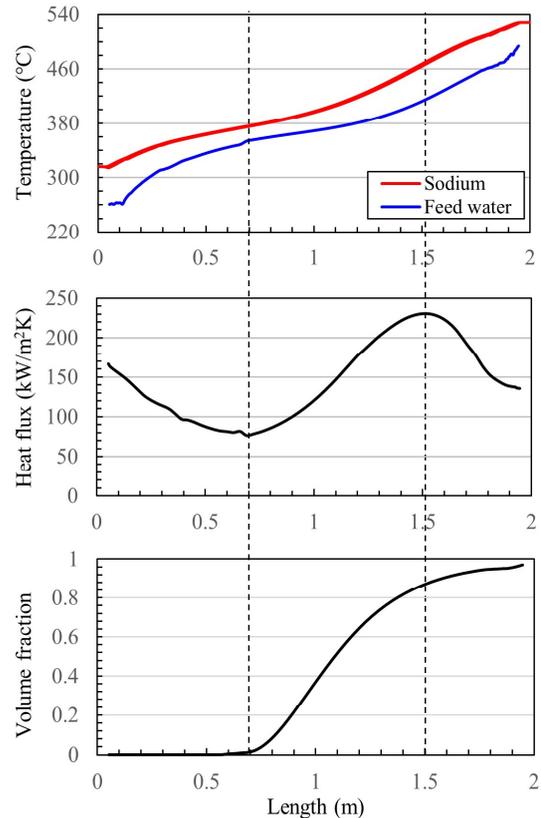


Fig. 13 Temperature, heat flux, and volume fraction variation along the length

의 차이가 있다. 전산유체해석 시에는 3D 유로와 오리피스 가 고려되었기 때문에 더 많은 압력강하가 발생하였지만, 허용 압력강하(1300 kPa)보다는 낮다.

VOF transition boiling 모델은 유체를 물과 증기의 혼합물로 취급하며, 최대열유속 이후의 단상 기체로 바뀌는 현상은 모사하지 못한다. 출구에서의 증기분율은 1이 될 수 없기 때문에 엔탈피를 기준으로 출구에서의 증기 상태를 파악한다. Fig. 14는 급수 유로 출구에서의 엔탈피와 증기분율을 보여준다. 증기분율은 0.94~0.97이지만 엔탈피의 경우 포화 엔탈피(2560 kJ/kg)보다 최소 430 kJ/kg 높기 때문에

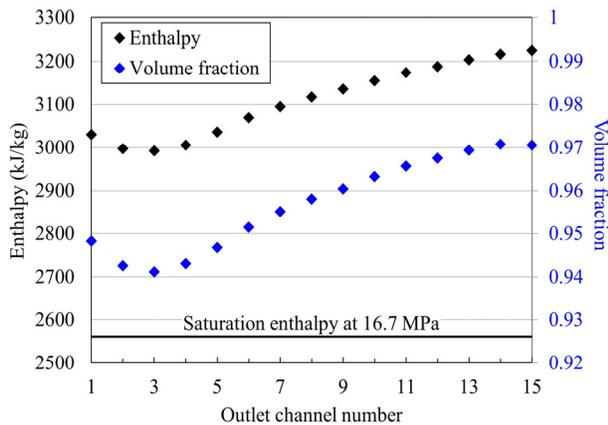


Fig. 14 Enthalpy and volume fraction of steam at the outlet

과열증기 상태로 볼 수 있다. 소듐에서 급수 유로로 전달되는 전체 열전달량은 급수 입·출구 유량과 엔탈피를 바탕으로 계산하며 단위 유로판에 대한 전체 열전달량은 423.62 kW이다. 총 61개의 단위 유로판이 사용되며, 한 대의 인쇄기 판형 증기발생기는 25.84 MW의 열출력을 가진다.

4. 소듐-물 반응 압력전파 해석

4.1 SWAAM-II 코드 모델링

증기발생기 내부 급수 유로의 결함이 발생하면 고압의 증기가 저압의 소듐 측으로 누설되어 급격한 발열반응과 동시에 많은 양의 수소 기체가 생성된다. 수소는 초기에 단일 구형기포를 형성하며 점차 증기발생기 원통 측의 직경에 근접하면서 환상관형기포로 형상이 바뀐다. 증기발생기 원통 측 소듐 유동 방향과 역방향으로 수소가 성장하면서 증기발생기 내부를 과압시킨다.⁽¹⁷⁾ 이후 증기발생기와 연결된 중간열전달계통으로 압력파가 전파되면서 계통의 압력증가 뿐만 아니라 계통 경계면의 건전성을 저하시킨다.

SWAAM-II 코드는 액체금속로 계통에 소듐-물 반응으로 인한 압력파 전파를 해석하기 위해 개발되었다.⁽¹⁸⁾ 모든 구조물들 1차원 원통형으로 가정하고 소듐-물 반응으로 인한 유체 속도나 온도 변화 등은 정확히 해석할 수 없으나 계통의

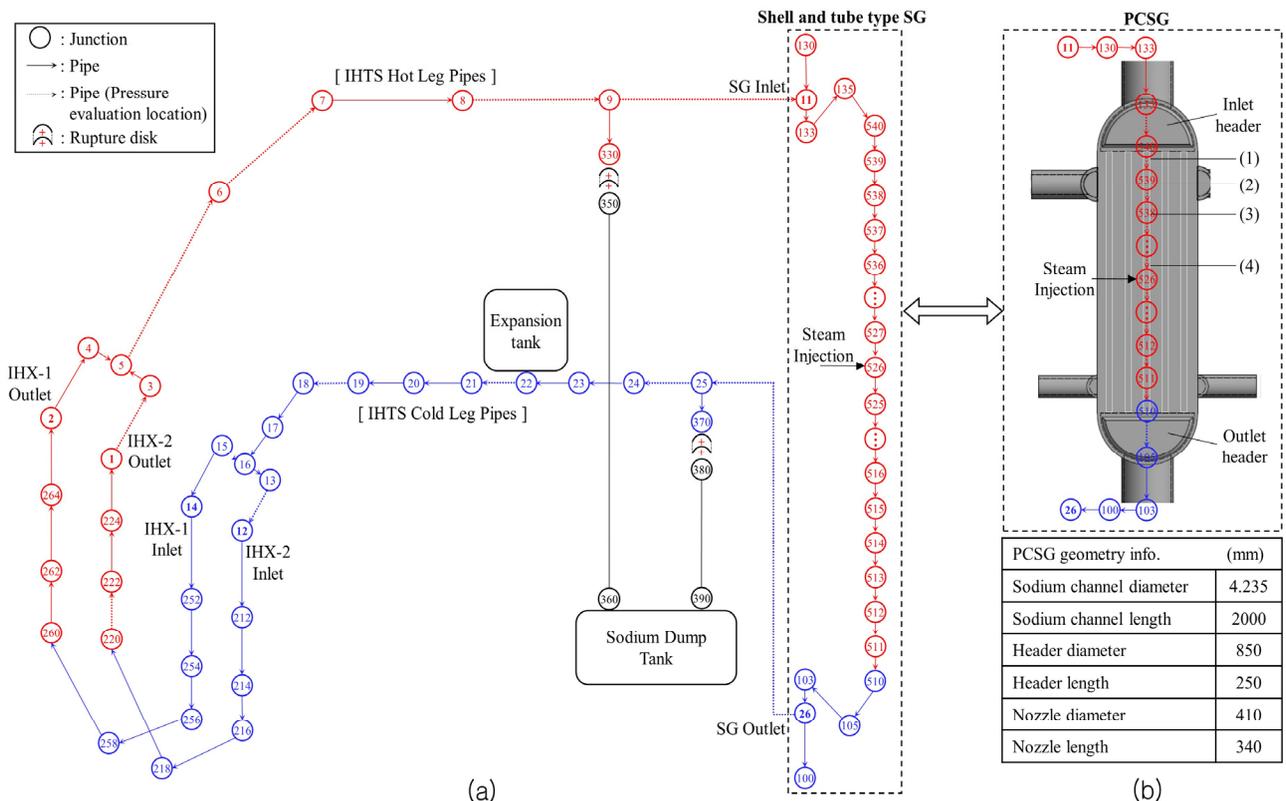


Fig. 15 (a) SWAAM-II Code nodalization for the sodium-water reaction analysis including intermediate heat transport system (IHTS) and steam generator of PGSFR and (b) PCSG nodalization

압력 변화를 해석하는데 사용된다. Ahn 등⁽¹⁹⁾은 SWAAM-II Code를 사용하여 소듐냉각고속로 원형로의 원통다관형 증기 발생기 내부 소듐-물 반응에 의한 중간열전달계통의 압력거동을 분석하였다. Fig. 15(a)와 같은 Nodalization를 통해 원통다관형 증기발생기와 중간열전달계통을 모델링하였다. 인쇄기판형 증기발생기 적용 시의 압력전파 해석을 위해 Fig. 15(b)와 같이 모델링한다. 단일 소듐 유로에 고압 증기를 주입하는 조건으로 헤더의 등가직경은 인쇄기판형 증기발생기 블록 크기에 맞게 설정한다. 계통 전체에 528℃, 0.5 MPa의 소듐이 저장되어있으며, 421℃, 16.8 MPa의 증기가 소듐 유로의 Junction을 통해 주입되는 조건이다.

4.2 SWAAM-II 코드 해석 결과

증기발생기로 주입되는 증기 누설량이 0.5, 1.0 kg/s 조건에서 소듐-물 반응 압력전파로 인한 중간열전달계통 주요 파이프에서의 최대압력은 Fig. 16과 같다. PGSGFR의 기존 원통다관형 증기발생기 적용 시, 중간열전달계통의 압력이 전반적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 원통다관형 증기발생기 내부에서 발생하는 소듐-물 반응 압력파가 중간열전달계통으로 전파되는 것을 의미한다. 1.0 kg/s 증기 누설의 경우, 파열판(파열압=1.0 MPa)이 파열되는 정도로 계통에 높은 압력파가 전파되는 것을 볼 수 있다. 그러나 인쇄기판형 증기발생기 적용 시, 중간열전달계통의 압력변화는 없고 초기 조건인 0.5 MPa로 유지된다. 인쇄기판형 증기발생기 내부 압력파는 중간열전달계통으로 전파되지 않고, 압력완화를 위한 팽창탱크 또한 필요 없음을 의미한다.

인쇄기판형 증기발생기 내부 소듐-물 반응에 의한 압력 변화를 자세히 파악하기 위해 소듐 유로와 급수 유로 벽면에 300 μm 직경의 크랙이 존재하는 조건에서 결과를 분석하였다. 증기 누설량은 임계유량 상관식⁽²⁰⁾을 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$m_{leak} = \frac{0.53 \times P_{steam} \times \frac{\pi}{4} D_{leak}^2}{1.62708 \times 10^{-7} \times (i - 430.195)} \quad (26)$$

D_{leak} 는 증기가 누설되는 결함의 직경이다. Fig. 17(a)는 인쇄기판형 증기발생기 입·출구 헤더와 단일 소듐 유로 (Fig. 15(b))에서 소듐-물 반응에 의한 최대압력을 보여준다. 증기가 누설되는 Junction과 직접 연결된 소듐 유로 영역에서 최대압력이 발생하고 헤더로 갈수록 점차 감소한다. 헤더에서는 최대압력은 초기 조건인 0.5 MPa로 유지되었다. Fig. 17(b)는 소듐 유로의 특정 위치에서 시간에 따른 압력변화를 보여준다. Fig. 15(b)에 대략적인 위치가 표시되어 있으며, (1)~(4) 위치는 증기 주입부로부터 각 0.93, 0.77, 0.49, 0.07 m

떨어진 소듐 유로 영역이다. 100 ms 이내로 모든 위치에서 압력이 일정한 상태로 유지되며 이를 준평형상태 압력이라 한다. 헤더와 근접할수록 준평형상태 압력이 감소하며, 헤더와 접촉된 유로 영역에서는 헤더 압력과 비슷한 0.65 MPa로 유지된다. 헤더와 단일 소듐유로의 등가직경은 대략 200배 차이로, 좁은 유로에서 높은 압력파가 발생하더라도 헤더와 유로의 단면적 차이로 인해 압력파가 감소된다. 즉, 인쇄기판형 증기발생기는 구조적으로 소듐-물 반응 압력파 전파를 방지하는 특성을 가진다.

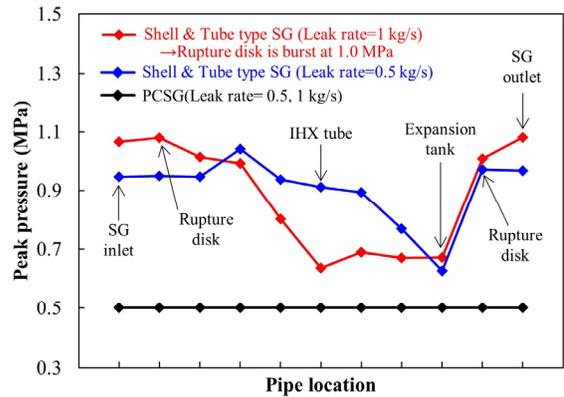


Fig. 16 Peak pressure at the intermediate heat transport system with different type of steam generator

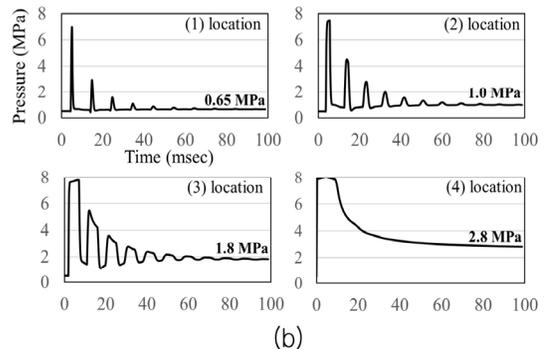
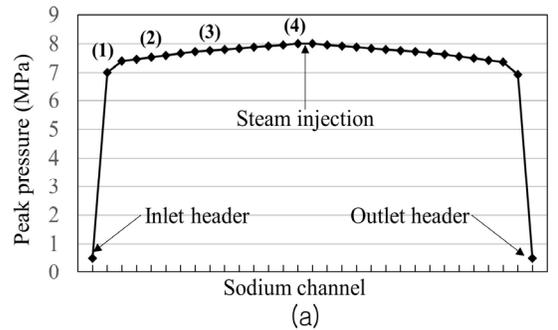


Fig. 17 (a) Peak pressure through the sodium channel of PCGS and (b) pressure variation with time at the specific location of sodium channel

5. 결 론

인쇄기판형 증기발생기의 열성능과 소듐-물 반응 압력전파 해석을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 급수 유로는 유로 막힘 방지를 위해 모든 유로가 연결되게 설계하며, 전산유체역학 해석결과 수평방향으로 최대 19%의 유량 불균일도가 발생한다. 이는 출구 측에 동일한 압력강하가 발생하지 않기 때문으로, 균일유량분포를 위해서는 출구 측에 더 높은 압력강하가 필요하다.
- 2) 출구에서의 과열증기 온도는 498 °C으로 설계값과 근접하며, 허용압력강하 보다 210 KPa 낮은 압력강하가 발생한다. 단위 유로판의 전체 열전달량은 423.62 kW로, 총 61개의 단위 유로판으로 증기발생기를 구성할 시 한 대의 증기발생기 열출력은 25.84 MW이다. Table 4에 원통다관형과 인쇄기판형 증기발생기의 열성능을 비교하였다.
- 3) 인쇄기판형 증기발생기의 부피는 원통다관형 대비 25배 가량 작으며, 열출력 밀도는 3배 가량 높다. 기존 소듐냉각고속로 원형로의 원통다관형을 인쇄기판형 증기발생기로 대체 시, 16대의 증기발생기가 필요하며 36.34 m³ 정도의 부피가 감소하게 된다.
- 4) 기존 원통다관형 증기발생기의 경우, 셸 측에서 발생하는 소듐-물 반응으로 인한 압력파가 중간열전달계통으로 전파되어 계통 경계면의 건전성을 저하시킨다. 인쇄기판형 증기발생기는 소듐 유로와 헤더 사이의 큰 단면적 차이로 인해 유로 내부 소듐-물 반응에 의한 압력파는 헤더에서 감쇠된다. 원통다관형과 달리 소듐-물 반응에 의한 중간열전달계통에 전파되는 압력파가 없어 소듐-물 반응 사고 시에도 계통 건전성이 유지된다.

Table 4 Comparison of the shell and tube type SG and PCSG

| Parameter | Shell and Tube type | PCSG |
|---------------------------------|--|--|
| Target thermal power of the SFR | 392 MW | |
| Thermal power of single SG | 196 MW | 25.84 MW |
| Volume | 26.73 m ³ | 1.07 m ³ |
| Thermal density | 7.33 MW/m ³ | 24.15 MW/m ³ |
| Number of SG for the SFR | 2 | 16 |
| Resistance to SWR | High pressure propagation towards the IHTS | No pressure propagation towards the IHTS |

후 기

본 논문은 2020년도 과학기술정보통신부(ICT)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. NRF-2018M2A8A4081307).

References

- (1) Yoo, J., Chang, J., Lim, J. Y., Cheon, J. S., Lee, T. H., Kim, S. K., Lee, K. L., and Joo, H. K., 2016, "Overall System Description and Safety Characteristics of Prototype Gen IV Sodium Cooled Fast Reactor in Korea," Nuclear Engineering and Technology, Vol. 48, pp. 1059~1070.
- (2) Shirvan, K., Hejzlar, P., and Kazimi, M. S., 2012, The design of a compact integral medium size PWR, Nuclear Engineering and Design, Vol. 243, pp. 393~403.
- (3) Hong, J., Kim, S. J., 2019, "Sodium-Water Reaction in Printed Circuit Steam Generator for SFR Application," Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Goyang, Korea.
- (4) Kang, H. O., Han, H. S., and Kim, Y. I., 2014, "Thermal-hydraulic Design of a Printed-Circuit Steam Generator for Integral Reactor," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 17, No. 6, pp. 77~83.
- (5) Zhao, Z., Zang, Y., Chen, X., Ma, X., Yang, S., and Li, S., 2019, "A numerical study on condensation flow and heat transfer of refrigerant in minichannels of printed circuit heat exchanger," International Journal of Refrigeration, Vol. 102, pp. 96~111.
- (6) Bae, S. J., Kwon, J., Kim, S. G., Son, I., and Lee, J. I., 2019, "Condensation heat transfer and multi-phase pressure drop of CO2 near the critical point in a printed circuit heat exchanger," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 129, pp. 1206~1221.
- (7) Shin, J. H. and Yoon, S. H., 2020, "Thermal and hydraulic performance of a printed circuit heat exchanger using two-phase nitrogen," Applied Thermal Engineering, Vol. 168.
- (8) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", 2015, Code Cases 2437-1, American Society of Mechanical Engineers.
- (9) Kim, J., Shin, J. H., Kim, D. O., Choi, J. S., and Yoon, S. H., 2017, "Channel Structure and Header Design of Printed Circuit Heat Exchanger by Applying Internal Fluid Pressure," The Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 41, No. 11, pp. 767~773.
- (10) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", 2015, Section VIII, Division 1, American Society of Mechanical Engineers
- (11) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code," 2017, Sec. II, Part D, American Society of Mechanical Engineers.

- (12) Seban, R. A. and Shimazaki, T. T., 1951, "Heat transfer to a fluid flow-ing turbulently in a smooth pipe with walls at constant temperature", Transactions of ASME, Vol. 73, pp. 803-809.
- (13) Fink, J. K. and Leibowitz, L., 1995, "Thermodynamic and transport properties of sodium liquid and vapor", Argonne National Laboratory, ANL/RE-95/2"
- (14) Ünal, H. C., 1981, "Density wave oscillations in sodium heated once-through steam generator tubes", Journal of Heat Transfer, Vol. 103, No. 3, pp. 485~491.
- (15) Choi, Y. J., 2019 US Patent No. 10365045B2.
- (16) Chen, T. W., 2019, "A new approach for computational fluid dynamics studying power transient critical heat flux, M.D. Thesis, Department of Nuclear Science and Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR.
- (17) Eoh, J. H., Kim, S. Y., Kim, S. O., 2006, "Evaluation of System Dynamic Responses during a SWR Event in KALIMER-600", KAERI/TR-3165/2006.
- (18) Shin, Y. W., Youngdahl, C. K., 1975, "User Manual for the Sodium-Water Reaction Analysis Computer Code SWAAM-II, ANL-83-75, Argonne National Laboratory.
- (19) Ahn, S. J., Park, G. Y., Lee, K. L., Choi, C., Jeong, T., Kim, J. T., Lee, S. W., and Jeong, J. H., 2018, "The sensitivity analysis for IHTS and SG due to the Large-scale Sodium-Water Reaction event in PGSFR," Annals of Nuclear Energy, Vol. 118, pp. 26~34.
- (20) Hong, J., Kwon, K., Kim, S. J., 2019, "Theoretical Study on Sodium-Water Reaction in Printed Circuit Steam Generator," Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea.