

구리밀봉 증기발생기 설계코드의 개발과 이를 이용한 TRU 함유 노심계통의 증기발생기 설계

최선락* · 임성혁**†

Development of Copper Bonded Steam Generator Sizing Analyzer(CBSGSA), and its application to design a steam generator of TRU core system

Sun Rock Choi*, Sunghyuk Im**†

Key Words : Sodium-cooled fast reactor(소듐냉각고속로), Sodium-water reaction(소듐-물 반응), Copper bonded steam generator(구리 밀봉증기발생기), Thermal-hydraulic sizing code(열유동 설계코드), TRU core system (TRU 함유 노심계통)

ABSTRACT

KAERI has been conducting R&D on sodium-cooled fast reactor(SFR) as a next-generation reactor, and a copper bonded steam generator(CBSG) has been proposed to minimize the occurrence of sodium-water reaction(SWR) accident in SFRs. In this paper, a development progress of a CBSG sizing analyzer(CBSGSA) code is described. A sizing and rating analysis of CBSG has been performed to set thermal-hydraulic conditions applicable to the steam generator of the TRU core system.

1. 서 론

한국원자력연구원은 차세대 원자로 개발의 일환으로 소듐 냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)에 대한 연구를 진행하고 있다. 소듐은 열수력적 특성이 우수한 반면 다른 물질과 화학적으로 반응하기 쉽다는 단점이 있다. 특히 높은 열과 수소가 발생하는 소듐-물 반응은 소듐을 이용한 원자로 설계 시 고려해야 할 매우 중요한 현상이다. 이러한 소듐-물 반응 사고는 증기발생기 전열관의 파손에 의해 발생할 수 있으며, 소듐냉각고속로의 안전성에 영향을 주고 경제성을 낮추는 큰 요인이 된다. 이에 소듐-물 반응 압력 완화계통 개념을 도입하여 소듐-물 반응 사고의 영향을 줄이는 한편, 소듐-물 반응 사고의 발생을 극소화할 수 있는 새로운 형태의 증기발생기에 대한 연구를 수행하고 있다.

본 논문에서는 소듐-물 반응을 극소화하기 위해 제안된 증기발생기 후보 개념¹ 중 최적 개념으로 선정²되어 연구가 진행 중인 구리밀봉 증기발생기(Copper Bonded Steam Generator,

CBSG)의 개념과 열교환 구조에 대해 기술하고, CBSG의 열유동 설계 코드(CBSG Sizing Analyzer, CBSGSA)의 개발 및 이를 이용한 TRU 함유 노심계통의 증기발생기 설계에 대해 기술한다.

2. 구리밀봉 증기발생기

2.1 구리밀봉 증기발생기 개념

구리밀봉 증기발생기는 1950년대 영국의 DFR (Downreany Fast Reactor)에서 최초로 사용된 개념으로, 구리를 열전달 매개체로 하여 물관과 소듐관을 평행하게 배치하는 형태로 설계하였다³. 이후 2001년 영국 NNC사의 Sherwood는 HIP (Hot Isostatic Pressing) 공정을 이용하여 평행하게 배치된 원형관과 구리 매트릭스를 확산접합하는 구리밀봉 증기발생기를 제작하였다⁴. 이후, 기존 설계의 몇 가지 단점을 개선하기 위하여 사각 전열관 배치를 통해 구리의 사용을 줄인 구

* 한국원자력연구원 다목적원자로기술개발부 (Versatile Reactor Technology Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute)

** 서울사이버대학교 기계제어공학과 (Department of Mechanical and Control Engineering, Seoul Cyber University)

† 교신저자, E-mail : sunghyuk@iscu.ac.kr

리밀봉 증기발생기를 새롭게 제안하였으며^{5,6}, 일본 JAEA의 Chkazawa는 Sherwood와 공동 연구한 CBSG 개념 설계에 대한 JAEA 연구보고서를 발행하였다⁷.

2002년 한국원자력연구원에서는 평행관 형태의 CBSG 개념에 대한 열유체해석체제를 개발하고⁸, 이를 KALIMER 운전조건을 이용하여 기기 사이징을 수행하였다⁹. 2018년, 소듐-물 반응을 극소화하기 위해 제안된 증기발생기 후보 개념 중 최적 개념으로 선정된 구리밀봉 증기발생기에 대해 기기형상화 작업을 수행하였으며, 제안된 구리밀봉 증기발생기의 형태는 Fig. 1과 같다².

2.2 구리밀봉 증기발생기 개념

2018년 제안된 CBSG의 구조는 Fig. 1과 같이 수평 방향의 소듐측 전열관과 수직방향의 급수측 전열관이 교차되어 배치되어 있다. 이는 소듐측 헤더와 급수측 헤더의 위치를 분리시켜 소듐-물 반응의 발생 원인을 배제하는 효과를 가지게 된다. 소듐측에는 전열 모듈의 가공 및 제작에 유리한 사각형 전열관을 사용하였으며, 급수측에는 고압으로 인한 응력을 견디기 위해 원형의 전열관을 사용하였다. 전열관 사이의 공간은 구리 매트릭스를 채워 열전달 매개체로 사용한다. 이러한 직교형 전열모듈을 수직방향으로 배치하여 정해진 열출력에 대응하도록 하였다.

2.2.1 단일 전열모듈

CBSG의 단일 전열모듈 형태는 Fig. 2와 같다. x 축 방향으로 배치된 사각형의 소듐측 전열관은 z 축 방향으로 적층되어 x-z 평면을 구성하게 되고, z 축 방향으로 배치된 원형의 물측 전열관은 x 축 방향으로 적층되어 x-y 평면을 구성하게 된다. 이렇게 구성된 x-z 평면상의 소듐측 전열면과 물측 전열면이 y 축 방향으로 교차하며 배치되어 정육면체 형태의 전열모듈을 구성하게 된다. z 축 방향으로 배치된 원형의 물측 전열관과 x 축 방향으로 배치된 사각형의 소듐측 전열관 사이의 열전달 매개체 역할을 하게 된다. 이러한 전열모듈은 HIP 공정을 통해 제작되며, 이에 따라 물측 전열관, 구리 매트릭스, 소듐측 전열관 등의 동종 및 이종 금속 소재가 접하는 접촉면은 확산 접합되었다. 고온 고압의 확산접합 과정에서 조립된 부품의 접촉면 사이의 빈 공간은 완전히 메워지게 되어 열전달 성능의 저하를 방지하게 된다.

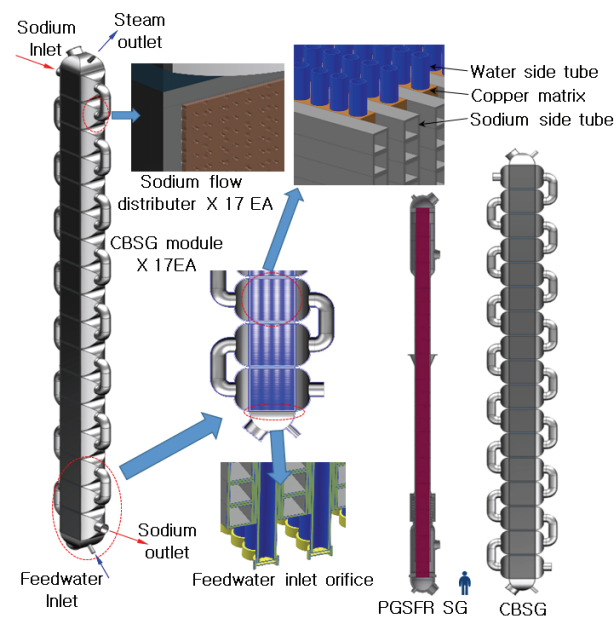


Fig. 1 Proposed CBSG concept

의 물측 전열관은 x 축 방향으로 적층되어 x-z 평면을 구성하게 된다. 이렇게 구성된 x-z 평면상의 소듐측 전열면과 물측 전열면이 y 축 방향으로 교차하며 배치되어 정육면체 형태의 전열모듈을 구성하게 된다. z 축 방향으로 배치된 원형의 물측 전열관과 x 축 방향으로 배치된 사각형의 소듐측 전열관 사이의 열전달 매개체 역할을 하게 된다. 이러한 전열모듈은 HIP 공정을 통해 제작되며, 이에 따라 물측 전열관, 구리 매트릭스, 소듐측 전열관 등의 동종 및 이종 금속 소재가 접하는 접촉면은 확산 접합되었다. 고온 고압의 확산접합 과정에서 조립된 부품의 접촉면 사이의 빈 공간은 완전히 메워지게 되어 열전달 성능의 저하를 방지하게 된다.

2.2.2 전열모듈 간 연결 헤더

앞서 소개된 정육면체 형태의 전열모듈의 경우 이를 제작하는 HIP 공정의 제약으로 인해 그 크기가 특정 크기 이하로 제약되며, 이로 인해 단일 전열모듈의 전열면적 및 열출력 용량이 제한된다. 제한된 크기의 전열모듈을 이용하여 대용량의 열출력에 대응하기 위해 Fig. 1과 같이 정육면체의 전열모듈을 수직방향으로 쌓아 연결하여 전체 증기발생기 형태를 구성하게 된다. 고온의 소듐은 최하단 모듈에 공급되어 수평방향의 소듐측 전열관을 따라 흐르고, 전열모듈의 양측에 배치된 소듐측 연결 헤더를 통해 하단 모듈로 전달된다. 저온의 급수는 최하단 모듈에 공급되어 수직방향의 물측 전열관을 따라 위쪽으로 흐르게 되며, 전열모듈의 위아래에 배치된 물측 연결 헤더를 통해 위쪽 모듈로 전달된다.

3. CBSGSA 코드 개발

상기 2장에서 소개된 CBSG의 경우, 기존의 대향류 형식의 증기발생기와는 달리 직교류 형식의 전열모듈이 수직으로 연결되어 전체의 증기발생기를 구성하는 모듈식 직교형

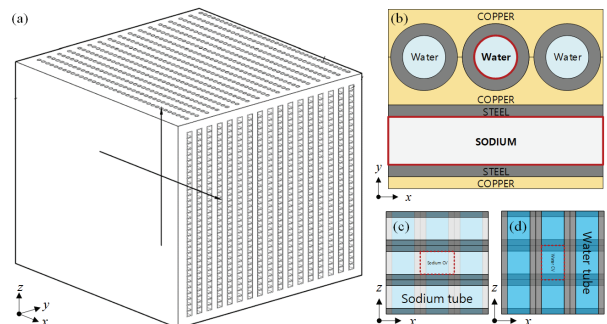


Fig. 2 Single heat transfer module of CBSG

- (a) perspective view
- (b) x-y cross-sectional view: heat transfer path
- (c) x-z cross-sectional view: sodium heat transfer tube
- (d) x-z cross-sectional view: water heat transfer tube

열교환기이다. 따라서 기존 대향류 증기발생기의 열유동 설계를 위한 사이징 코드¹⁰를 그대로 사용할 수 없으며, CBSG의 전열 구조(원형 급수관-구리매트릭스-사각 소듐관의 열저항 구조, 직교형 전열 모듈의 수직배치 등)를 충분히 반영한 구리밀봉 증기발생기 열유동 설계코드(CBSGSA)의 개발이 필요하다.

3.1 CBSGSA 코드에 사용된 가정

- (1) 증기발생기 내 열교환 현상은 정상상태를 가정하며, 과도현상은 고려하지 않는다.
- (2) 최상단 모듈의 소듐측 입구에 공급되는 고온 소듐은 $y-z$ 평면상에 배치되어있는 소듐측 전열관에 균일하게 공급된다.
- (3) 소듐측 연결 헤더를 통과한 소듐은 하부 전열모듈에 공급될 때 충분히 혼합되어 $y-z$ 평면상에 배치되어있는 소듐측 전열관에 균일하게 공급된다.
- (4) 최하단 모듈의 물측 입구에 공급되는 저온 급수는 $x-y$ 평면상에 배치되어 있는 물측 전열관에 균일하게 공급된다.
- (5) 물측 연결 헤더를 통과한 물(증기)는 상부 전열모듈에 공급될 때 혼합 없이 같은 위치에 배치되어있는 물측 전열관에 그대로 공급된다.
- (6) $x-z$ 단면의 소듐측 전열평면과 물측 전열평면이 반복되어 배치되는 y 축 방향으로는 벽면 효과를 무시한다. 이에 따라 y 축 방향으로는 반복 조건을 적용하여 하나의 소듐측 전열평면과 하나의 물측 전열평면 사이의 열전달을 $x-z$ 평면에서 고려하고, 이를 실제 y 축 방향의 전열 평면 개수에 비례하여 전체 열출력을 계산한다.
- (7) 소듐측 전열관의 제어체적에서 열전달을 계산하는 경우, 전열관 축방향의 열전도와 인접한 소듐측 전열관으로부터의 열전달은 무시하고, 물측 전열관과의 열전달만을 고려한다.
- (8) 물측 전열관의 제어체적에서 열전달을 계산하는 경우, 전열관 축방향의 열전도와 인접한 물측 전열관으로부터의 열전달은 무시하고, 소듐측 전열관과의 열전달만을 고려한다.
- (9) 소듐측 전열관과 물측 전열관의 단면은 계산의 편의를 위해 정사각 형태로 동일하게 가정한다.

3.2 해석 노드 체계

CBSGSA 코드에서는 3.1의 가정 (6)에 따라 Fig. 3a와 같이 CBSG의 열전달을 $x-z$ 평면의 2차원 상에서의 열전달 및 온도 분포를 해석하도록 한다. 이를 위해 Fig. 3b와 같은 노

드 체계를 구성하였다. 전열모듈을 통과한 소듐이 하부 모듈로 전달되는 소듐측 연결 헤더 내에서 완전히 혼합되어 균일하게 하부 모듈로 전달된다는 3.1의 가정 (3)에 따라 전열모듈 측면에 소듐 중간 헤더 노드를 배치하였다. 또한 전열모듈을 통과한 물/증기가 상부모듈로 전달되는 물측 연결 헤더 내에서는 혼합 없이 같은 위치에 있는 상부모듈의 전열관으로 바로 유입된다는 3.1의 가정 (5)에 따라 모듈 사이의 물측 중간 헤더는 하부 전열모듈의 물측 전열관 마지막 노드와 상부 전열모듈의 물측 전열관 첫 노드를 연결해주는 역할을 하게 하였다.

CBSG의 최상단 전열모듈에 공급된 소듐은 $+x$ 방향으로 흐르며 물/증기와 열교환을 하게 되고, 하부모듈로 전달된 후에는 $-x$ 방향으로 흐르며 열교환을 하게 된다. 따라서 Fig. 3b와 같이 최상단 전열모듈의 모듈 번호를 1번이라고 하고 아래로 내려갈수록 모듈 번호가 하나씩 증가한다고 했을 때, 흡수 전열모듈에서는 소듐이 $+x$ 방향, 짝수 전열모듈에서는 소듐이 $-x$ 방향으로 흐르며 열교환을 하게 된다. 한편, 물측 전열관에 공급된 물/증기의 경우 전열모듈 번호와 상관 없이 동일하게 $+z$ 방향인 아래에서 위로 흐르며 열교환을 하게 된다.

3.3 열교환기 성능 평가

열교환기 성능 평가는 경계조건과 열교환기의 기하조건이 주어져 있는 경우에 열교환기의 열전달 용량을 평가하는 절차이다. CBSG의 열교환 성능을 평가하기 위해 3.3.1과 같이 지배방정식을 이산화 하고, 반복 계산을 통해 각 노드에서의 열전달 및 온도분포를 계산한다.

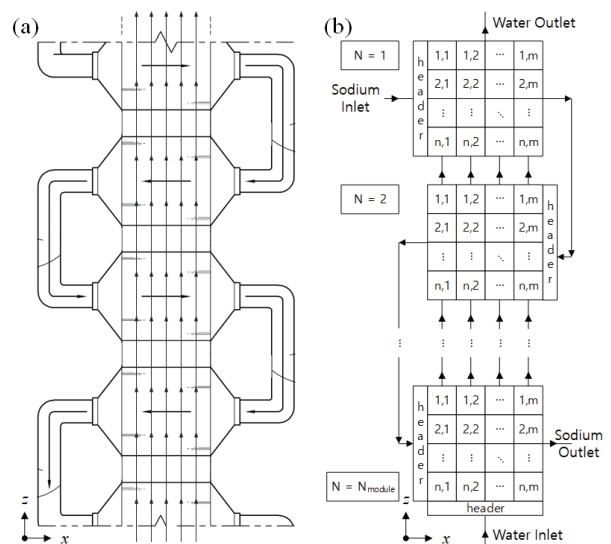


Fig. 3 CBSGSA nodalization
(a) working fluid flow direction, (b) nodalization

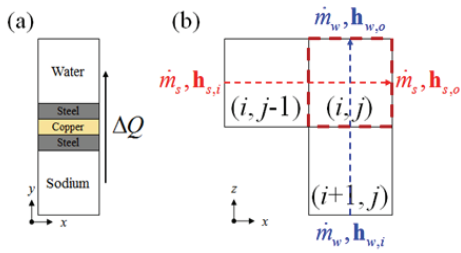


Fig. 4 Heat transfer node modeling of CBSGSA code

- (a) x-y cross-sectional view: heat transfer path
- (b) x-z cross-sectional view: control volume

3.3.1 지배방정식

CBSGSA 코드의 현 개발 단계에서는 열교환기 열유동 해석 및 성능 평가 시 열교환기 배관 내 압력강하를 제외한 열교환기 내 작동유체의 온도 분포 및 이에 따른 열전달을 대상으로 한다. 따라서 CBSGSA 코드에서는 운동 방정식을 제외한 연속 방정식과 에너지 방정식을 수치적으로 해석한다.

전열관 내 유동에 대한 연속 방정식은 다음의 식 (1), (2) 와 같이 일차원으로 모델링할 수 있다. 여기서 \dot{m} [kg/s]은 유체의 질량 유량이며, 아래 첨자 s와 w는 각각 소듐과 물을 나타낸다.

$$\dot{m}_s = \text{constant} \quad (1)$$

$$\dot{m}_w = \text{constant} \quad (2)$$

소듐측 전열관 내 고온 소듐과 물측 전열관 내 저온의 물/급수 사이 열전달 해석을 위해 각 제어 체적에 대해 Fig. 4와 같은 열전달 해석 노드 모델을 세워 에너지 방정식을 적용한다. Fig. 4a는 2차원 해석에서 깊이방향의 열전달 경로를 보여주는 x-y 단면으로, 고온의 소듐 작동유체와 저온의 물 작동유체 사이에 있는 소듐관, 구리매트릭스, 물관의 구조를 보여준다. Fig. 4b는 2차원의 온도분포를 나타낼 x-z 단면으로, 이 그림에서 소듐은 노드에서 노드로 흐르고, 물은 노드에서 노드로 흐르는 것으로 모델링 한다. 이는 홀수 번호의 전열모듈에 해당하며, 짝수 번호의 전열모듈의 경우 소듐의 흐름 방향은 반대가 된다.

Fig. 4a에서 소듐과 물 사이의 열전달량 ΔQ 는 식 (3)과 같이 계산되며, 이에 의한 작동유체의 엔탈피 변화는 식 (4), (5)와 같이 계산된다.

$$\Delta Q = U \Delta A \Delta T \quad (3)$$

$$\dot{m}_s \Delta h_s + \Delta Q = 0 \quad (4)$$

$$\dot{m}_w \Delta h_w + \Delta Q = 0 \quad (5)$$

식 (3)에서는 소듐측 제어체적과 물측 제어체적이 맞닿는

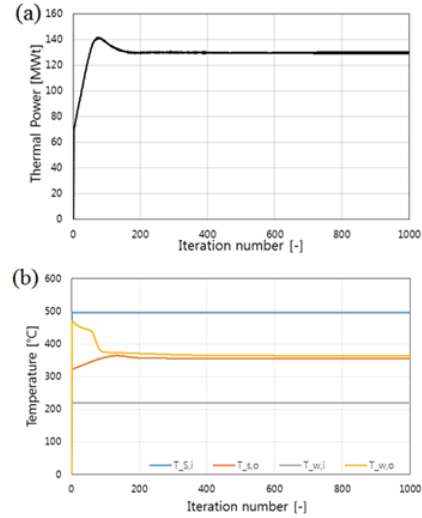


Fig. 5 Iteration result for rating calculation

- (a) Thermal power, (b) inlet/outlet coolant temperature

단면적을 나타내며, ΔT 는 (i, j) 노드를 기준으로 소듐과 물측 인접 노드와의 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)를 적용하였다. U 는 소듐과 물 사이의 열저항을 토대로 계산하였으며, 3.3.2에서 자세히 설명하도록 한다.

$$h_s^*(i, j) = h_s^k(i, j-1) - \Delta Q / \dot{m}_s \quad (6)$$

$$h_s^{k+1}(i, j) = h_s^k(i, j) \times (1 - \lambda) + h_s^*(i, j) \times \lambda \quad (7)$$

$$h_w^*(i, j) = h_w^k(i+1, j) + \Delta Q / \dot{m}_w \quad (8)$$

$$h_w^{k+1}(i, j) = h_w^k(i, j) \times (1 - \lambda) + h_w^*(i, j) \times \lambda \quad (9)$$

각 유로에서 작동유체의 엔탈피 변화를 계산하기 위한 식 (4), (5)를 수치적으로 계산하기 위해 Fig. 4b의 노드 체계에 맞춰 식 (6)~(9)와 같이 이산화 하였다. 전체 노드에 대한 위 식의 반복계산을 통해 수렴하는 정상 해석 결과를 얻게 되며, 반복 계산의 수렴성 향상을 위해 relaxation factor ($0 < \lambda < 1$)를 적용하였다. 반복계산이 수렴하는 한 λ 값은 계산 결과에 영향을 미치지 않았으며, 본 해석에서는 $\lambda = 0.5$ 를 사용하였다. 모든 노드에 대한 반복 계산 시 기준이 되는 경계 조건은 소듐과 물의 입구 온도를 기준으로 적용하였으며, 해석의 초기조건($k=0$)은 코드의 소듐과 물측의 입/출구 온도에 대한 선형 보간 값으로 가정하였다. 각 노드의 열전달량을 모두 합산하여 열교환기의 열전달 용량(Fig. 5a)을 구하고 엔탈피와 압력을 토대로 작동유체의 온도(Fig. 5b)를 계산하였으며, 반복 계산에 따라 열유동 조건(ΔQ , Δh , ΔT)의 수렴성을 확인하였다.

3.3.2. 열전달 상관식

식 (3)에서 소듐과 물 사이의 열전달량 ΔQ 를 계산하기 위

한 $U\Delta A$ 는 다음의 식 (10)과 같이 소듐측과 물측의 대류열전달($\Delta R_{s,conv}$, $\Delta R_{w,conv}$), 물측 전열관에서의 파울링($\Delta R_{w,foul}$), 전열관과 구리매트릭스에서의 열전도($\Delta R_{s,tube}$, $\Delta R_{w,tube}$, ΔR_{copper}) 및 접촉열저항($\Delta R_{contact}$) 등이 반영된다².

$$\frac{1}{U\Delta A} = \frac{\Delta R_{s,conv} + \Delta R_{s,tube} + \Delta R_{contact} + \Delta R_{copper}}{\Delta R_{contact} + \Delta R_{w,tube} + \Delta R_{w,foul} + \Delta R_{w,conv}} \quad (10)$$

위의 식 (10)에서 사용된 각 열저항 값은 다음의 식 (11)~(17)과 같이 계산된다.

$$\Delta R_{s,conv} = \frac{1}{h_s \Delta A} \quad (11)$$

$$\Delta R_{s,tube} = \frac{\delta_s}{k_s \Delta A} \quad (12)$$

$$\Delta R_{contact} = \frac{1}{h_{contact} \Delta A} \quad (13)$$

$$\Delta R_{copper} = \frac{\delta_{copper}}{k_{copper} \Delta A} \quad (14)$$

$$\Delta R_{w,tube} = \frac{\delta_w}{k_w \Delta A} \quad (15)$$

$$\Delta R_{w,foul} = \frac{1}{h_{f,w} \Delta A} \quad (16)$$

$$\Delta R_{w,conv} = \frac{1}{h_w \Delta A} \quad (17)$$

식 (11)의 소듐측 전열관 내의 소듐과 전열관 벽면 사이의 열전달을 계산하기 위한 대류열전달계수 h_s 는 식 (18)과 같이 Lubarsky-Kaufman 상관식을 사용하였다¹¹.

$$Nu = 0.625 \times Pe^{0.4} = 0.625 \times Re^{0.4} \times Pr^{0.4} \quad (18)$$

식 (12)의 소듐측 전열관 벽면에서의 열전도를 계산하기 위한 벽면의 열전도율은 ASME BPVC 코드¹²의 STS316L의 열전도율 값을 사용하였다. 식 (13)의 접촉열저항은 전열관 표면과 구리매트릭스 표면 사이 확산접합면에서의 열저항값을 반영하는 것으로, 접촉열저항계수 $h_{contact}$ 는 보수적으로 1.0×10^4 W/m²-K 값을 사용한다. 식 (14)의 구리매트릭스에서의 열전도를 계산하기 위한 구리합금(CuCrZr)의 열전도율은 Y. Birol의 측정 값¹³을 사용한다. 식 (15)의 물측 전열관 벽면에서의 열전도는 식 (12)와 마찬가지로 ASME 코드 내 STS316의 열전도율 값을 사용하였다. 물측 전열관 내 벽면에서의 파울링을 반영하기 위한 식 (16)에서 파울링 계수 $h_{f,w}$ 는 2.5×10^4 W/m²-K 값을 사용한다⁸. 식 (17)의 물측 전열관 내의 물/증기와 전열관 벽면 사이의 열전달을 계산하기 위한 대류열전달계수 h_w 는 물/증기의 상변화 영역에 따라 다르게 적용하였다.

물/증기의 상변화 영역은 주어진 압력 조건에서 포화액과 포화증기의 엔탈피를 기준으로 구분하였다. 물과 증기가 섞여있는 이상유동 영역에서의 건도(x)는 제어체적 내 혼합액의 엔탈피(h_m)를 포화액의 엔탈피(h_f)와 포화증기의 엔탈피(h_g)를 이용하여 식 (19)와 같이 계산하였다.

$$x = \frac{h_m - h_f}{h_g - h_f} \quad (19)$$

급수 입구에서부터 물/증기 상변화가 일어나기 전까지의 과냉각 영역에서는 식 (20)의 Dittus-Boelter 상관식을 사용하였으며, 이후 물과 증기가 섞여있는 이상유동 영역에서는 Chen 상관식을 사용하였다¹⁴.

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (20)$$

물/증기가 섞여있는 이상유동 영역이 끝난 뒤 과열증기 영역에 대한 대류열전달계수는 식 (21)의 Heinemann 상관식을 사용하였다¹⁵.

$$Nu = 0.0133 \times Re^{0.84} \times Pr^{0.333} \quad (21)$$

4. TRU 함유 노심계통의 CBSG 열유동 설계

상기 3장에서 소개된 CBSGSA 코드를 활용하여 TRU 함유 노심계통의 증기발생기 열유동 조건을 만족하는 CBSG를 설계하였다. Table 1은 한국원자력연구원에서 기존의 대향류 증기발생기 설계코드를 이용하여 CBSG 사이징 해석을 수행할 당시 사용한 CBSG의 설계 값²으로, 이는 TRU 함유 노심계통 계통의 열수력 조건¹⁶을 토대로 산출되었다. Fig. 6은 Table 1의 조건을 토대로 CBSG 사이징 해석을 수행한 결과이다. 증기발생기의 병렬 연결 개수(x 축)와 단일 증기발생기 내 수직으로 연결된 전열모듈의 개수(y 축)에 따른 전체 열출력(contour level)을 나타낸다. Fig. 6a는 정육면체인 전열모듈의 외곽 변의 길이가 1.6 m인 경우(소듐관 개수: $33 \times 66 = 2178$ 개, 물관 개수: $33 \times 66 = 2178$ 개)이며, Fig. 6b는 외곽 변의 길이가 0.8m로 축소된 경우(소듐관 개수: $16 \times 32 = 512$ 개, 물관 개수: $16 \times 32 = 512$ 개)의 열출력을 나타낸다. 그래프 상의 실선은 TRU 함유노심 계통의 단일 증기발생기에 요구되는 열출력인 158 MWt인 지점을 나타내며, CBSG의 설계점은 실선의 우상단에 있는 조건으로 선정되어야 한다.

Fig. 6b와 같이 단일 전열모듈의 크기가 $0.8 \times 0.8 \times 0.8$ m³인 경우, 요구되는 증기발생기 열출력을 만족시키기 위해서는 20개 이상의 전열모듈이 수직으로 연결된 증기발생기 병렬로 10개 이상 배치되어야 한다. 이는 증기발생기 배치를 위한 레이아웃 구성 및 다수의 전열모듈을 연결해야 하는 문

Table 1 Design parameters for CBSG sizing analysis

Design parameter	Value
Water tube O.D. [mm]	17.3
Water tube I.D. [mm]	12.7
Sodium tube O.D [mm]	23.4
Sodium tube I.D [mm]	18.8
Water inlet temperature [°C]	220.0
Sodium inlet temperature [°C]	495.0
Steam outlet pressure [MPa]	14.6
Water flowrate [kg/s]	69.4
Sodium flowrate [kg/s]	667.1

Table 2 CBSG rating results for TRU core system

Result variable	Value
Thermal power [MWt]	159.6
Sodium inlet temperature [°C]	495.0
Sodium outlet temperature [°C]	308.5
Water inlet temperature [°C]	220.0
Steam outlet temperature [°C]	476.2
Sodium inlet pressure [MPa]	0.400
Sodium outlet pressure [MPa]	0.420
Water inlet pressure [MPa]	14.71
Steam outlet pressure [MPa]	14.60

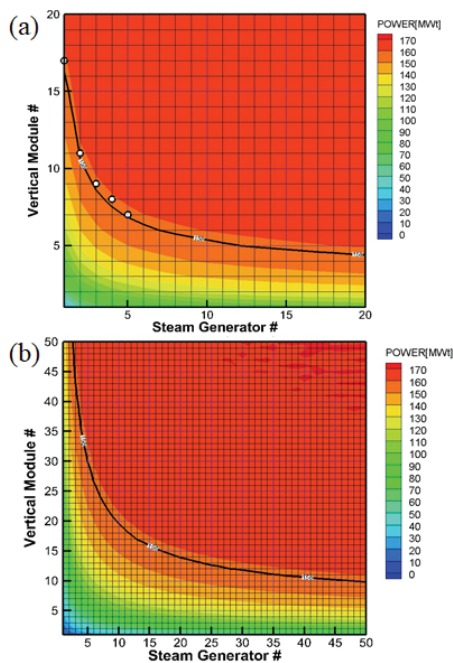


Fig. 6 CBSGSA sizing analysis with heat transfer module size of (a) $(1.6 \times 1.6 \times 1.6) \text{m}^3$, (b) $(0.8 \times 0.8 \times 0.8) \text{m}^3$

제가 있다. 이에, $1.6 \times 1.6 \times 1.6 \text{ m}^3$ 크기의 전열 모듈을 사용하는 Fig. 6a의 조건 중 사용되는 전열모듈의 총 개수가 가장 적은 조합(증기발생기 1대, 수직 전열모듈 17개)을 설계점으로 선정하였다.

선정된 조건에서의 CBSG 성능평가 해석 결과는 Fig. 7, Table 2와 같다. Fig. 7a는 고온의 소듐 온도를, Fig. 7b는 저온의 물/증기의 온도를 보여주며, Fig. 7c는 물/증기 측의 상변화에 따른 증기의 건도(quality)를 보여준다. Table 2는 성능평가 결과에 따라 계산된 소듐 측, 급수 측의 입출구 온도 및 압력 값이다. 이 결과들은 TRU 함유노심 계통의 열평형, 중간열전달계통(Intermediate Heat Transport System, IHTS) 및 BOP계통(Balance of plant System)의 열유체 설계를 위한 기초 자료로 활용된다.

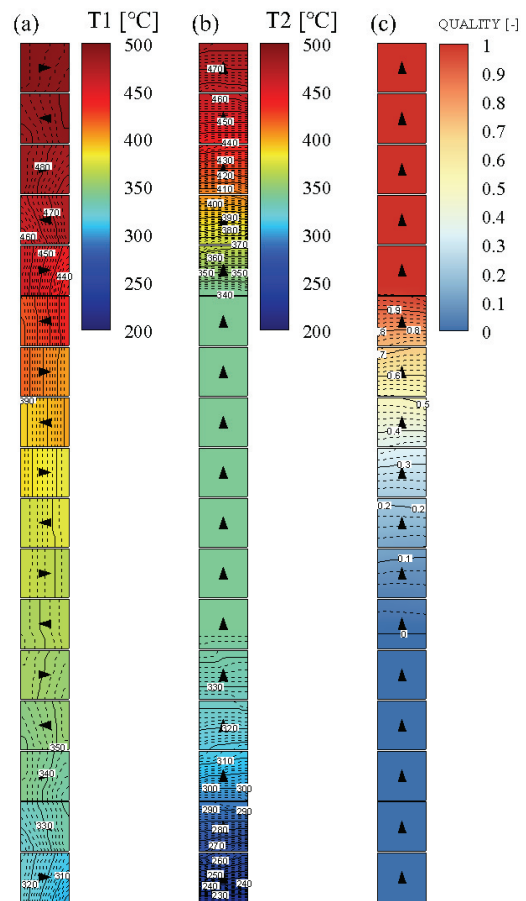


Fig. 7 CBSGSA rating analysis with heat transfer module size of $(1.6 \times 1.6 \times 1.6) \text{m}^3$,

(a) Sodium temperature, (b) Water/steam temperature, (c) Steam quality

5. 결론

소듐-물 반응 극소화 열교환기 개념으로 설계가 진행 중인 구리밀봉 증기발생기의 열유동 설계코드를 개발¹⁷하고, 이를 이용하여 TRU 함유 노심계통의 증기발생기 설계를 수

행하였다. 구리밀봉 증기발생기의 직교형 전열모듈이 수직으로 배치된 구조를 반영한 2차원의 노드 체계를 구성하고, 고온의 소듐과 저온의 물 사이의 열저항을 적절한 상관식을 통해 모델링하여 열전달 현상을 해석하였다. TRU 함유 노심계통의 증기발생기의 열출력에 대응하는 CBSG를 설계하기 위해 다양한 조건에서 열교환기 성능평가를 수행하였다. 성능평가 결과 크기 1.6x1.6x1.6 m³의 전열모듈이 수직으로 17개가 연결된 조합을 최종 설계점으로 선정하였으며, 선정된 조건에서의 성능해석 결과는 TRU 함유 노심계통 계통 설계에 활용할 예정이다. 향후 전열관 내 압력강하 계산식을 추가할 예정이며, CBSGSA 코드의 해석 결과에 대해 기존 문헌 및 CFD 결과를 토대로 검증 작업을 수행할 예정이다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government(MSIP) (No. 2012M2A8A2025624).

References

- (1) Hong, J., Han, J.-W., 2018, "Technology Status of Sodium-Water Reaction Minimized Heat Exchanger", KAERI/AR-1198/2018.
- (2) Hong, J., 2018, "Development Report on the Sodium-Water Reaction Minimized Heat Exchanger", SFR-330-P2-486-001.
- (3) IAEA, 2006, "Fast Reactor Database 2006 Update", IAEA-tecdoc-1531.
- (4) Sherwood, D.V., Lennox, T.A., 2001, "A SIMPLIFIED LMFBR CONCEPT (SFR)", In *Advanced Reactors with Innovative Fuels: Second Workshop Proceedings*, p. 305.
- (5) Sherwood, D.V., 2003, "A Reliable Steam Generator that will Allow the Elimination of the Secondary Sodium Circuit in an LMFBR", *Proceedings of ICAPP'03*.
- (6) Sherwood, D.V., Chikazawa, Y., 2005, "A Reliable Steam Generator that will Allow the Elimination of the Secondary Sodium Circuit in an LMFBR", *Nuclear Technology*, Vol. 150, pp.111-119.
- (7) Chikazawa, Y., Aizawa, K., Konomura, M., 2006, "Conceptual Design Study of Cu Bonded Steam Generator", *JAEA-Research 2006-007*.
- (8) Kim, E.K., Kim, S.-O, Wi, M.-H., Eoh, J.H., 2002, "Development of the Thermal Hydraulic Analysis Code for a Copper Bonded Steam Generator in LMR", *KAERI/TR-2300/2002*.
- (9) Kim, S.-O, Sim, Y.S., Kim, E.K., Wi, M.-H., Han, D.-H., 2002, "Evaluation of New Concepts for Liquid Metal Reactor", *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting 2002*.
- (10) Wi, M.-H., 2002, "User Manual for HSGSA Computer Code", *LMR/FS400-CM-01-R2/02*.
- (11) Lubarsky, B., Kaufman, S.J., 1956, "Review of Experimental Investigations of Liquid-Metal Heat Transfer", *NACA-TR-1270*.
- (12) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section-II, Part D, Properties (Metric), *ASME BPVC.II.D.M-2015*.
- (13) Birol, Y., 2010, "Thermal Fatigue Testing of CuCrZr Alloy for High Temperature Tooling Application", *J Mater Sci*, 45:4501-4506.
- (14) Chen, J.C., 1966, "Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow", *Industrial & engineering chemistry process design and development*, 5(3), 322-329.
- (15) Heineman, J.B., 1960, "An experimental investigation of heat transfer to superheated steam in round and rectangular channels", *ANL-6213*.
- (16) Choi, S.R., 2018, "Preliminary Report on the System Design Concept for the TRU Core", *SFR-050-P2-486-001*.
- (17) Im, S., 2019, "Development Report on the Performance Analysis Code for the Sodium-Water Reaction Minimized Heat Exchanger", *SFR-330-P2-486-002*.