2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

증기발생기-중간열교환기 일체형열교환기(집적형) 열유체해석체제개발

Development of a Thermal Hydraulic Analysis Code for a Combined Steam Generator-IHX Heat Exchanger (Integrated Type)

김의광, 심윤섭, 정경채, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

단일지역, 복수지역 2 종류의 집적형 일체형 열교환기의 열적크기 및 성능분석 계산을 위한 1 차원 열수력 전산코드를 개발하였다. 고온관은 소듐이 흐르고, 저온관은 급수가 유입된다. 쉘측의 중간매질은 납-비스무스이고 펌프를 이용하여 순환시킨다. 물/증기측 유동영역은 과냉, 포화, 막비등, 과열영역의 4 구간으로 구분하였다.

Abstract

One-dimensional thermal-hydraulic analysis computer codes were developed for the thermal sizing and performance analysis of a Combined Steam Generator-IHX Heat Exchanger (Integrated Type). The flow regions of water/steam side were divided into four regions, which are sub-cooled, saturated, film boiling, and super-heated regions. Sodium flows inside hot side tube and feed water is provided into the cold side tube. Pb-Bi is used for shell side coolant and flows by a circulating pump.

1. 서 론

액체금속로에서 냉매로 사용되는 소듐은 물과 폭발적으로 반응하는 화학적 특성으로 인하여 이에 대비하여 중간열전달계통(Intermediate Heat Transport System)을 설치하고 있다. 중간열전달계통은 두 가지 중요한 기능을 수행하는데 첫째는 일차계통의 소듐과 증기터빈계통의 물/증기가 직접 접촉하는 것을 방지하는 안전방벽 역할, 둘째는 일차계통에서 물/증기 계통으로 열을 전달하는 것이다. 이와 같은

기능을 수행하면서 액체금속로의 경제성과 안전성을 향상시키기 위한 목적으로 납-비스무스가 담긴 열교환통내에 소듐측과 물증기측 전열관을 함께 설치하는 형태인 일체형 열교환기가 제안되었다. 이 개념은 크게 분리형과 집적형으로 구분되고, 분리형은 일차계통의 고온측 전열관군(tube banks)과 저온측 물/증기계통의 전열관군이 열교환통 내에서 서로 분리되어 있는 방식이다. 집적형은 고온측과 저온측의 전열관군이 서로 가까이 접하고 있는 형태이며, 한국원자력연구소에서 처음으로 제시한 개념이다. 분리형은 다시 반경방향 분리형과 상하분리형으로 나누고, 집적형은 단일지역형과 복수지역형으로 구분된다.

일본의 Miyazaki 와 Horiike 는 개량형 중간열교환기(Advanced Intermediate Heat Exchanger)를 제시하였는데 [1),2)], 중간매체로는 납-비스무스를 이용하고 일차계통의 전열다발은 직관형 전열관을, 물/증기계통의 전열관군은 헬리컬 코일형 전열관을 적용한 상하분리 일체형 열교환기로서, 중간매체의 유동을 자연순환을 이용한 경우와 펌프를 이용한 강제순환경우에 일체형 열교환기의 직경, 길이, 중량, 열교환기 통(Shell)에 야기되는 좌굴(buckling)하중 등에 대한 분석을 수행하였다.
일본의 Kinoshita et al.은 납-비스무스를 이용한 액체금속로용 Innovative Heat Exchanger 라는 상하분리형 일체형 열교환기에 대한 개념설계를 통하여 240 MW 급과 50 MW 급 일체형 열교환기의 크기와 무게를 평가하였고, 납-비스무스의 대류열전달에 대한 실험을 통하여 액체금속인 소듐에 비하여 약 10 - 20 % 정도 전열효율이 떨어진다고 발표하였다 [3), 4)].

국내에서는 한국원자력연구소에서 일본에서 제시한 분리형 열교환기와는 달리 고온측과 저온측의 열교환 형태가 액체금속이 갖는 높은 열전도도를 이용하여 열교환이 국부적으로 함께 발생하는 단일지역 집적형 열교환기에 대한 개념을 제시하고, 이를 개선한 복수지역 집적형 열교환기를 발표하였다 [5)].

본 연구에서는 일체형 열교환기의 설계시 가장 먼저 선행되어야 할 열수력적 설계 및 성능분석용 전산프로그램을 개발하였다. 이 논문은 먼저 프로그램의 계산모델과 구조를 소개하고, 다음으로 기준으로 선정 한 열유체적 조건하의 해석결과를 논의한 후, 마지막으로 결론에 대해 기술한다.

2. 집적형 열교환기의 종류

그림1은 단일지역 집적형으로 일차계통 전열관과 급수/증기계통 전열관 다발을 동일지역 안에 두어 만들어지는 전열관 다발군에 중간 순환유체를 펌프를 이용하여 순환시키는 개념이다. 이 개념에서는 고온유체에서 저온유체로의 전열이 중간매질 유체에 의해 지역적으로 이루어진다는 점이 특징이다. 이 배치에서 중간유체의 순환에 의해 얻고자 하는 것은 단지 중간유체와 전열관 외부면 사이의 대류열전달계

수가 적절한 크기가 되도록 하는 것이다. 이 배치에서는 고온유체와 저온유체의 온도분포의 전체적인 경향이 전열관 다발하부가 제일 온도가 낮고 위로 가면서 점차 온도가 증가하는 경향이 되는 데 비하여 중간유체의 온도는 전열관 다발이 맨 위쪽 지점과 아래 지점이 동일하게 되는 특징이 있다.

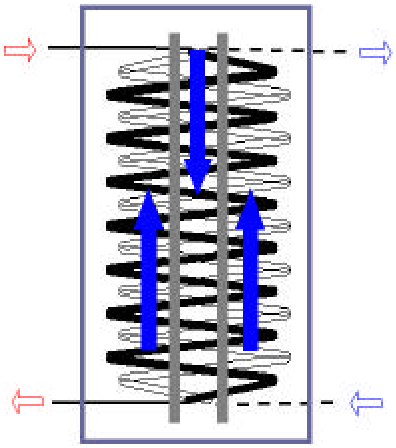

그림1 단일지역 집적형 일체형 열교환기의 구조개념도

앞의 집적 단일지역 배치형은 중간유체의 온도가 최상부와 최하부에서 서로 동일하게 됨으로서 고온유체와 저온유체간의 전열이 비효율적으로 이루어지는 단점이 있어 이를 보완하는 방법으로 전열관 다발지역을 그림 2와 같이 반경방향으로 둘로 나누어 중간유체를 흐르게 하는 방법이다. 이 배치에서는 중간유체가 하부 안쪽에서 전열관 다발에 진입하여 상부에서 방향을 180° 바꾸어 하부로 내려가고 최하부에서 다시 방향을 바꾸어 전열관 다발 안쪽에 위치한 원통의 통로를 통하여 순환이 이루어지고, 이러한 배치로 인하여 중간유체의 온도분포는 고온 및 저온유체와 비슷한 분포를 하게 된다

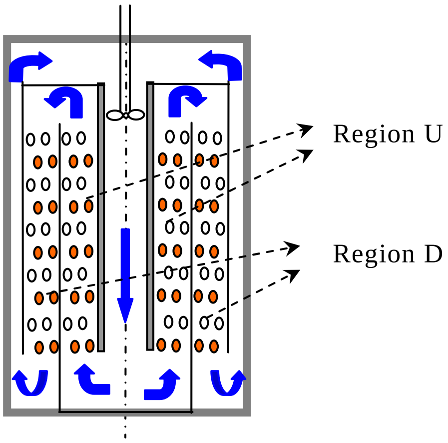

그림2 복수지역 집적형 일체형 열교환기의 구조개념도

3. 해석방법

열교환기 해석체제 개발을 위한 모델링 및 가정은 다음과 같다. 열교환기내의 동일 전열관다발의 전열관 각각의 전열특성은 동일하다. 전열관은 헬리컬코일형이고, 전열관의 직경은 전열관의 길이에 비하여 매우 작으므로 전열관의 열수력해석은 1차원으로 한다. 물증기측의 이상유동은 균질(homogeneous)모델을 적용하였다.

3.1 지배방정식 및 열전달 계산모델

(가) 연속방정식

일차원 모델의 연속방정식은 상대적으로 단순하며 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$w_s = const.$$

$$w_w = const.$$

여기서, w_s : shell side flow rate, w_w : tube side flow rate

(나) 운동방정식

각 제어체적(control volume)의 전압력손실은 세가지 형태로 나눌 수 있다. 즉, 가속도항, 마찰저항항, 그리고 중력항으로서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta p = \Delta p_{acc,i} + \Delta p_{fric,i} + \Delta p_{grav,i}$$

여기서, $\Delta p_{acc,i}$: accelerational pressure drop

$$= \left(\frac{G_w^2}{\rho}\right)_i - \left(\frac{G_w^2}{\rho}\right)_{i-1}$$

$\Delta p_{fric,i}$: frictional pressure drop

$$= f\frac{\Delta L_l}{d_i}\frac{G_w^2}{2\rho_l} + f\frac{\Delta L_{2\phi}}{d_i}\overline{\phi}_{lo}^2\frac{G_w^2}{2\rho_f} + f\frac{\Delta L_g}{d_i}\frac{G_w^2}{2\rho_g}$$

$\Delta p_{grav,i}$: gravitational pressure drop

$$= \rho_l g \Delta L_l + \langle \overline{\rho} \rangle g \Delta L_{2\phi} + \rho_g g \Delta L_g$$

$\overline{\phi}_{lo}^2$: two-phase multiplier

$\langle \overline{\rho} \rangle_i = \dfrac{\langle \rho \rangle_i + \langle \rho \rangle_{i-1}}{2}$: average density for the i-th control volume

$\langle \rho \rangle_i = \dfrac{1}{v_f + \langle x \rangle_i v_{fg}}$: average density for the i-th node

위 압력손실 모형은 튜브측의 유동에 관한 것이지만 이상유동과 기체 단상 유동 관련항을 제외하면 쉘측에도 적용할 수 있다.

(다) 에너지 방정식

각 제어체적(control volume)의 에너지 방정식은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.
튜브 벽면을 통한 열전달은

$\Delta Q = U \Delta A_o \Delta T_o$ 이며,

쉘측 유동을 통한 열전달은

$\Delta Q = w_s \left(h_{s,in} - h_{s,out}\right)$ 이다.

튜브측 유동을 통한 열전달은

$$\Delta Q = w_w\left(h_{w,out} - h_{w,in}\right)$$

여기서, ΔT_o : 평균 온도차

$$= \frac{\left(T_{s,in} + T_{s,out}\right)}{2} - \frac{\left(T_{t,in} + T_{t,out}\right)}{2}$$

ΔA_o : 전열면적

$$= \pi d_o \Delta L$$

제어체적의 계산모델(그림 3)에서 열전달율은 쉘측, 튜브벽, 튜브측, 화울링지역 (fouling regions) 등을 연결하는 모든 지역에서 동일하므로 다음 식이 성립한다. 식에서 화울링(fouling)의 영향은 전열계수 보정인자로 고려한다.

$$\Delta Q = h_s \Delta A_o\left(T_s - T_{Fs}\right) = h_{Fs}\Delta A_o\left(T_{Fs} - T_o\right)$$
$$= \Delta A_o \frac{2k}{d_o}\frac{T_o - T_i}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}$$
$$= h_{Fw}\Delta A_i\left(T_i - T_{Fw}\right) = h_w \Delta A_i\left(T_{Fw} - T_w\right)$$

따라서 총열전달계수 U (overall heat transfer coefficients)는 전열관의 외경을 기준으로 할 때 다음과 같이 정리된다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_{Fs}} + \frac{d_o}{2k}\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{d_o}{d_i}\frac{1}{h_{Fw}} + \frac{d_o}{d_i}\frac{1}{h_w}}$$

그림 3 은 1 개의 쉘측을 사이에 두고 2 개의 전열관이 서로 열교환하는 3 종 유체 집적형 열교환기에 대한 열전달 해석모델이다. 따라서 열전달은 액체금속을 구조물처럼 통과하는 국부열전도에 의한 것과 쉘측 납-비스무스의 대류를 통한 열전달로 이루어진다.

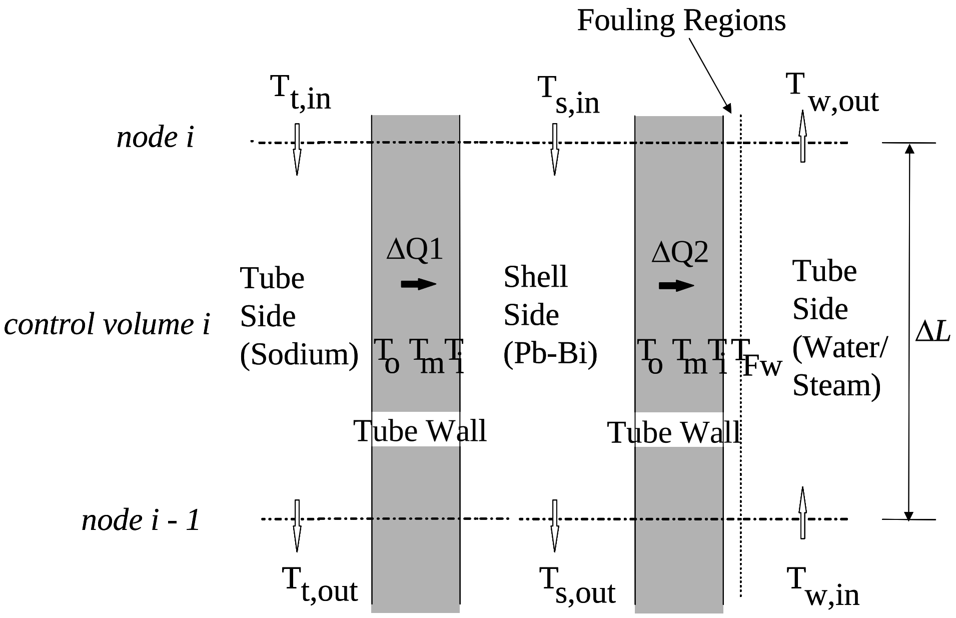

그림3 제어체적의 열전달 계산모델

3.2 열전달 및 마찰압력손실 상관식

일체형 열교환기는 관류형 증기발생기이기 때문에 물/증기측은 열전달이 이루어지면서 입구에서 출구까지 여러 종류의 열전달양식을 보이는데 이를 단순화하여 네 영역, 즉, 과냉영역, 포화영역, 막비등(film boiling)영역, 과열영역 등으로 구분하고, 각 영역과 관련한 압력손실 및 열전달 상관식을 적용한다. 표 1, 2 는 해석에 적용한 상관식이다. Fouling factor 는 물/증기측에 25,000 W/m²-ºC 을 적용하였다

표 1. 열전달 상관식

sub-cooled region	Mori-Nakayama
saturate boiling region	Chen
film boiling region	Bishop et al.
super-heated region	modified Bishop et al.
critical heat flux	Duchatelle et al.
Pb-Bi	Dwyer
sodium	Lubarsky-Kaufman

표 2. 마찰압력손실 상관식

friction factor	Mori-Nakayama
two-phase friction multiplier	homogeneous equilibrium model

증기발생기의 전열관 재질로는 2-1/4Cr-1Mo, SUS304, SUS316 등이 사용되는데 일체형 열교환기는 관류형 증기발생기이기 때문에 물/증기측에서 비등이 발생한다. 비등이 발생하는 증기발생기 부분은 부식균열(SCC : Stress Corrosion Cracking)에 의한 손상에 대한 저항성이 큰 2-1/4Cr-1Mo 을 전열관 재질로 사용한다.

3.3 계산절차

열교환기 성능분석계산은 주어진 전열면적에서 고온측에서 저온측으로 어느 정도의 전열이 이루어지는가를 계산하는 것으로, 먼저 IHX 측과 SG 측 각각에 대한 성능분석 계산흐름은 다음과 같다.

(1) 입력자료 입력

입력 기본자료는 열전달 면적, 고온측 입구온도, 저온측 입구온도, 양측의 유량, 압력 등의 열유체 경계조건, 전열관의 크기 및 배치에 대한 자료, 반복계산 제어치 등이 필요하다. 이와 함께 열전달 및 마찰계수 상관식, 튜브재질 등의 선택사항을 입력한다.

(2) 반복계산을 위한 초기치 설정

먼저 쉘 및 튜브측의 온도와 압력을 가정하고, 계산에 주어진 노드의 개수로 열전달 면적을 나누어 한 개의 노드당 전열 면적을 구한다. 본 계산에서는 계산노드 48 개를 기본노드수로 사용하였다. 이와 함께 고온 및 저온측의 유로 단면적 등 초기에 한번 수행이 필요한 자료를 계산한다.

(3) 총열전달계수 및 전열량 계산

다음은 주어진 온도, 압력, 유량조건에서 각 노드의 유동상태에 따른 열전달계수를 구하고, 튜브벽의 열전도 열저항과 물/증기측의 화울링계수(fouling factor)의 열저항을 감안하여 총열전달계수, U(overall heat transfer coefficients)를 구한다. 쉘 및 튜브측의 온도분포를 이용하여 양측의 온도차를 구하고, 따라서 각 노드에서 전열되는 양은 다음 식으로 구한다.

$$\Delta Q = U\,\Delta A_o\,\Delta T$$

(4) 전열관 위치별 엔탈피 및 온도분포 계산

앞 단계에서 계산된 각 노드의 전열량과 입구경계조건으로 주어진 입구 엔탈피를 이용하여 전열관 위치별로 순차적으로 엔탈피와 온도분포를 계산한다. 이때 이전 계산 온도 및 압력값은 수렴여부를 판단하기 위해 저장한다. 계산진행방향은 유동

방향과 일치시킨다.

(5) 전열관 온도계산

계산된 온도분포와 열저항값을 이용하여 전열관 안과 밖의 표면온도, 전열관 평균온도, 전열관 열전도도 등을 구한다.

(6) 물성치 계산

계산된 온도와 압력값을 이용하여 각 노드의 밀도, 건도, 보이드율, 비체적 등을 구한다.

(7) 수렴확인

(3), (4), (5), (6)번 계산은 수렴 조건식이 만족될 때까지 반복 계산한다. 즉, 온도와 압력에 대한 이전 반복계산결과와 현 계산결과의 차이를 현 계산값으로 나눈 값의 최대값이 수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산한다.

$$\left|\frac{T-T^{old}}{T}\right|<\varepsilon, \quad \left|\frac{P-P^{old}}{P}\right|<\varepsilon, \quad \varepsilon=1.E-5$$

(8) 결과물 출력

앞의 (7)번 과정에서 수렴이 확인되거나 주어진 최대 반복계산횟수만큼 수행되면 계산을 마치고, 필요한 정보를 출력한다.

일체형 열교환기의 경우 SG 측 성능분석과 IHX 측 성능분석 각각의 부분에 대해서는 위의 계산과정(그림 4)을 적용한다. 분리형 일체형 열교환기의 전체 성능분석 계산과정은 다음과 같다.

(1) 입력자료 입력 및 반복계산을 위한 초기값 설정

SG 성능분석측과 IHX 성능분석측 각각의 입력자료 입력하고, 반복계산을 위한 초기값을 설정한다.

(2) IHX 측 중간유체 입구온도 초기값 및 성능분석

IHX 측 중간유체 입구온도를 구하기 위해 필요한 반복계산용 초기치를 설정하고, IHX 측에 대한 성능분석을 수행하고 분석결과로 IHX 측 중간유체 출구온도를 구한다.

(3) SG 측 중간유체 입구온도 입력 및 성능분석

IHX 측 중간유체 출구온도를 SG 측 중간유체의 입구온도로 적용하여 성능분석계산을 하고 SG 측 중간유체의 출구온도를 계산한다.

(4) 수렴성 확인 및 결과물 출력

SG 측 중간유체측 출구유로는 IHX 측 중간유체측의 입구로 연결되므로, 이 온도를 앞서 설정한 IHX 측 중간유체측 입구온도와 비교하고 수렴조건을 만족할 때까지 또는 최대반복횟수동안 반복 계산(그림 5)하고 필요한 정보를 출력한다.

$$\left|T-T^{old}\right|<\varepsilon, \quad \varepsilon=0.001,$$

단일지역 집적형 일체형 열교환기의 성능분석 계산은 단일지역 중간유체측에 고온의 소듐과 저온의 물/증기와 열교환량을 계산하는 것으로 중간유체측 출구온도는 열교환기 내부유로를 순환하여 다시 중간유체측 입구온도로 유입되므로, 먼저 입구온도를 가정하고 계산된 출구온도를 다시 입구온도로 가정하는 반복계산을 수행하여 수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산한다.

복수지역 집적형 일체형 열교환기의 성능분석 계산은 안쪽지역과 바깥쪽지역에 성능분석계산으로 이루어지며, 안쪽지역의 중간유체측 입구온도를 가정하고 출구온도를 계산한 뒤, 이 온도를 바깥쪽지역의 중간유체측 입구온도로 적용하고 출구온도를 계산한 뒤 앞서의 가정값과 비교하고 수렴조건을 만족할 때까지 반복 계산한다.

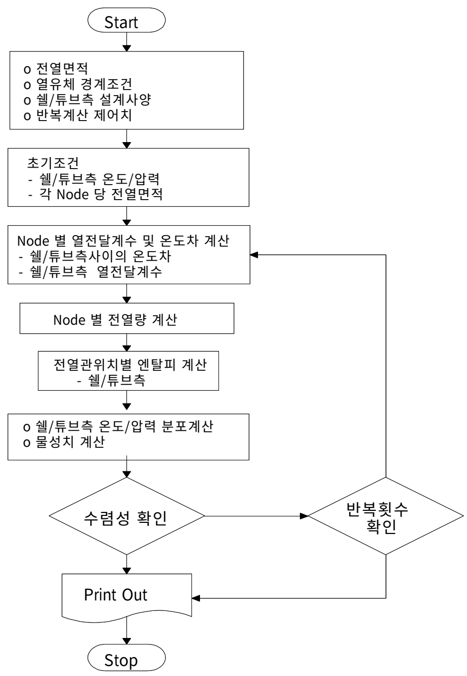

그림 4 일체형 열교환기의 SG 및 IHX 측 성능분석 계산 알고리즘

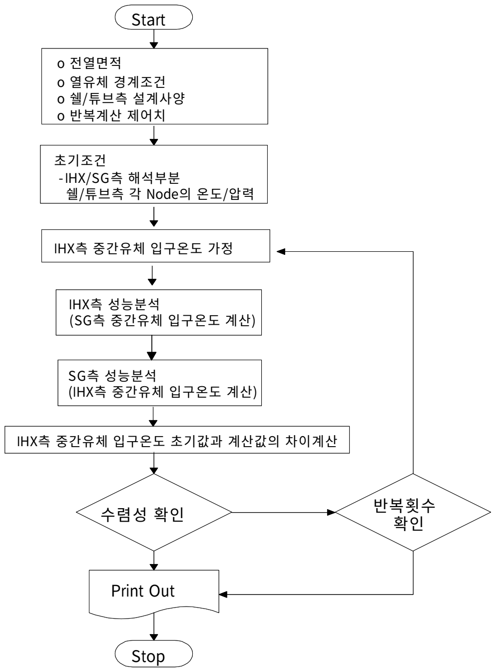

그림 5 일체형 열교환기의 성능분석 계산 알고리즘

4. 해석결과

200 MW 급 일체형 열교환기의 계통작동조건은 한국원자력연구소에서 개발된 액체금속로 칼리머의 개념설계 운전조건을 적용조건으로 하였다. [5]

표 3, 4 는 시산해석에 적용한 열교환기의 제원과 경계조건이다. 소듐과 급수의 온도조건과 유량은 칼리머 원자로 설계자료를 참조하였다. 증기출구압력은 칼리머 원자로 설계자료를 참조하여 15.5 MPa 를 적용하고, 전열관 재질은 증기발생기측은 2¼Cr-1Mo 를 적용하고, 중간열교환기측은 SS304 를 적용하였다

표 3 성능분석 시산해석에 사용된 열교환기 경계조건

hot fluid	fluid	sodium
	inlet temp. [℃]	530
	flow rate [kg/s]	1,071.5
cold fluid	fluid	water/steam
	inlet temp. [℃]	230
	flow rate [kg/s]	87.725
medium fluid	fluid	Pb-Bi
	flow rate [kg/s]	optimized condition

표 4 성능분석 시산해석에 사용된 열교환기 설계조건

Parameters	Single- Region Integrated Type	Double- Region Integrated Type
hot tube OD, m	0.025	0.025
cold tube OD, m	0.025	0.025
hot tube t, m	0.0008	0.0008
cold tube t, m	0.003	0.003
hot tube length, m	50.0	43.0
cold tube length, m	50.0	43.0
hot bundle height, m	8.9	13.1
cold bundle height, m	8.9	13.1
bundle region height, m	8.9	13.1
hot tube Pitch/OD, (R-plane)	1.5	1.5
cold tube Pitch/OD, (R-plane)	1.5	1.5
number of tube rows,inner	33	15
number of tube rows,outer	-	7
number of hot tubes	416	365
number of cold tubes	415	360
number of tubes	831	725
number of tubes.inner/number of tubes.outer	-	0.55
shell ID, m	2.96	2.34
Pb-Bi mass flow rate, kg/s	1,210	1,100
Q: heat transfer rate, MW	200.0	200.1

4.1 단일지역 집적형

집적형 열교환기에서 소듐과 급수의 유로방향은 서로 역방향이며, 중간유체의 방향은 소듐과 역방향(상향) 또는 순방향으로 흐르고 중간에 위치한 중간통로를 통하여 다시 전열지역으로 유입되고, 따라서 중간유체의 입출구온도는 동일하며, 중간유체의 방향이 상향일 때 유량은 최적조건인 1,200 kg/s 를 적용하였다. 표 5 는 단일지역 집적형 열교환기 경우에 대한 분석결과이다.

표 5 단일지역 집적형 열교환기에 대한 분석결과

heat transfer rate [MWt]	203.2
Pb-Bi mass flow rate [kg/s]	1200.
steam exit temp. [℃]	501.9
Pb-Bi inlet temp. [℃]	520.5
Pb-Bi outlet temp. [℃]	520.5
IHX side heat transfer area [m^2]	1,632.8

SG side heat transfer area [m^2]	1,628.9
shell side velocity [m/s]	0.05
sodium side pumping power [KW]	874.7
Pb-Bi side pumping power [KW]	1.5
water/steam side pumping power [KW]	11.9
shell diameter [m]	2.96
volume [m^3]	61.41
heat transfer rate per unit volume [MWt/m^3]	3.32

그림 6 은 열교환기의 전열관 위치별 물/증기, 납-비스무스, 소듐측의 온도분포에 대한 내용이다. 단일지역 집적형 열교환기의 특징은 전열지역출구를 통과한 중간유체가 열교환기의 가운데에 위치한 중간통로를 통하여 다시 전열지역의 입구로 유입되므로, 중간유체의 입구와 출구온도는 약 520.5 ℃로 동일하고, 입구지역에서 중간유체의 온도가 고온측 소듐의 온도보다 높은 비효율적인 온도분포를 보이기에 전열측면에서 전열효율을 떨어뜨린다. 이와 같은 온도분포 천이현상은 중간유체의 유량 또는 비열이 극단적으로 크거나 혹은 중간유체의 유량이 영이 아닌 한 항상 나타나며, 입구지역을 제외한 중간유체의 온도는 고온측과 저온측의 온도분포를 따라 중간 정도의 분포를 보인다. 이것은 중간유체인 납-비스무스의 유동열용량 즉, 질량유량과 비열의 곱이 소듐과 물/증기의 유동열용량에 비하여 적기 때문에 소듐과 물/증기의 온도분포를 따라가기 때문이다.

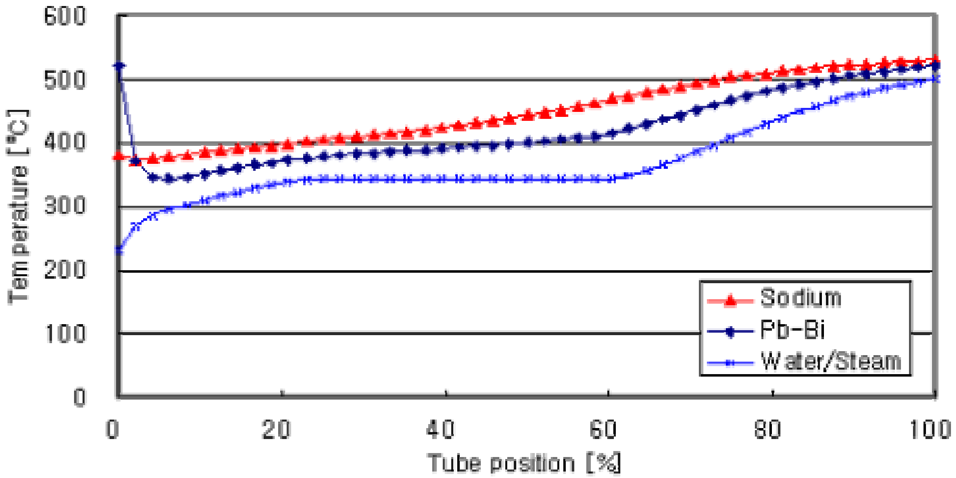

그림 6 단일지역 집적형 열교환기의 전열관 위치별 온도분포

4.2 복수지역 집적형

복수지역 집적형 열교환기는 단일지역 집적형 열교환기에서 나타나는 중간유체의 비효율적인 온도분포를 제거 또는 완화하여 전열효율을 높이고자 전열지역을 두 지역으로 나누는 형태로 제안된 개념이다. 표 6 은 복수지역 집적형 열교환기의 해석결과이다

표 6 복수지역 집적형 열교환기에 대한 분석결과

heat transfer rate [MWt]	197.3
Pb-Bi mass flow rate [kg/s]	400.
steam exit temp.(inner/outer) [℃]	453.9/517.5
steam flow rate(inner/outer) [kg/s]	51.52/36.205
inner region Pb-Bi inlet temp. [℃]	347.6
outer region Pb-Bi outlet temp. [℃]	504.2
IHX side heat transfer area [m^2]	1232.1
SG side heat transfer area [m^2]	1215.2
shell side velocity(inner/outer) [m/s]	0.07/0.09
sodium side pumping power [KW]	972.03
Pb-Bi side pumping power [KW]	0.36
water/steam side pumping power [KW]	12.63
shell diameter [m]	2.34
volume [m^3]	56.
heat transfer rate per unit volume [MWt/m^3]	3.52

그림 7, 8 은 중간유체의 유량이 400 kg/s 일 경우의 복수지역 집적형 안쪽과 바깥쪽 열교환기의 전열관 위치별 물/증기, 납-비스무스, 소듐측의 온도분포이다. 복수지역 집적형 열교환기의 특징은 안쪽 열교환기의 출구를 통과한 중간유체가 바깥쪽 열교환기의 입구를 통하여 바깥쪽 열교환기로 유입되므로, 중간유체의 유량값에 따라 중간유체의 온도분포 천이현상을 제거 또는 완화시킬 수 있다. 그림 7 에서 안쪽 열교환기의 출구를 통과한 중간유체의 출구온도는 약 504.2 ℃이고, 동일한 온도의 중간유체가 그림 8 의 바깥쪽 열교환기의 상부입구지역으로 유입된다. 바깥쪽 열교환기의 하부출구지역을 빠져나가는 중간유체의 온도는 347.6℃이고 이는 다시 안쪽 지역으로 유입된다. 안쪽 열교환기의 각 유체의 방향을 살펴보면 소듐과 중간유체는 역방향이고, 중간유체와 물/증기는 동일한 순방향 형태이다. 그러나 바깥쪽 열교환기의 중간유체의 방향이 반대로 됨에 따라 중간유체에 대한 소듐과 물/증기의 열교환 유로방향이 각각 순방향, 역방향으로 바뀐다. 따라서 고온유체인 소듐의 온도분포를 보면 중간유체와 역방향 열교환이 이루어지는 안쪽 지역의 변화폭 (160.7℃)이 바깥쪽 지역(123.8℃)보다 크고, 저온유체인 물/증기의 온도변화는 중간유체와 역방향 열교환이 이루어지는 바깥쪽 지역의 상승폭(287.5℃)이 안쪽 지역의 상승폭(223.9℃)보다 크다. 따라서 지역내에서 고온유체로부터 유입열량과 저온유체로의 유출전열량은 차이를 보이게 되며, 안쪽 지역의 경우 소듐측 전열량은 121. MW 이고, 물/증기측 전열량은 111.9 MW 이므로 안쪽지역에서 바깥쪽 지역으

로 약 9.1 MW 의 열량이 전달된다.

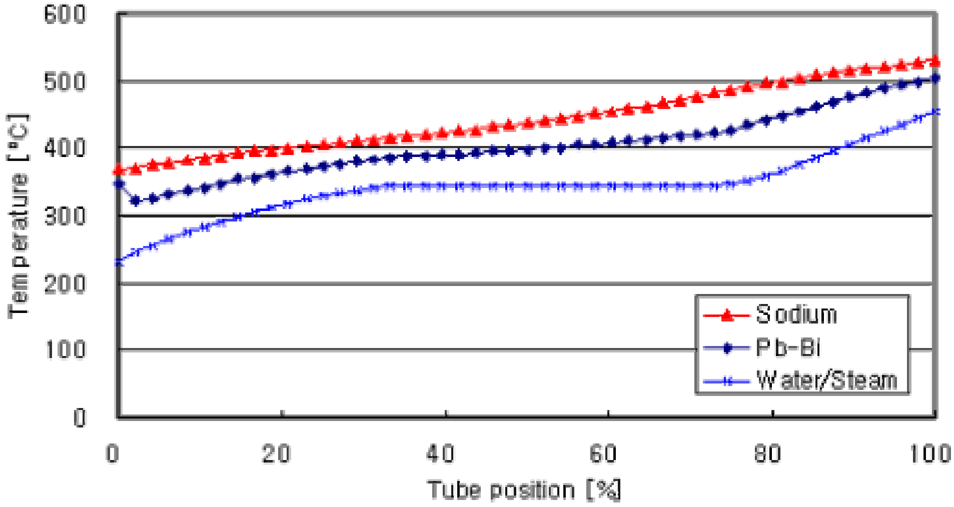

그림 7 복수지역 집적형 열교환기(안쪽)의 전열관 위치별 온도분포

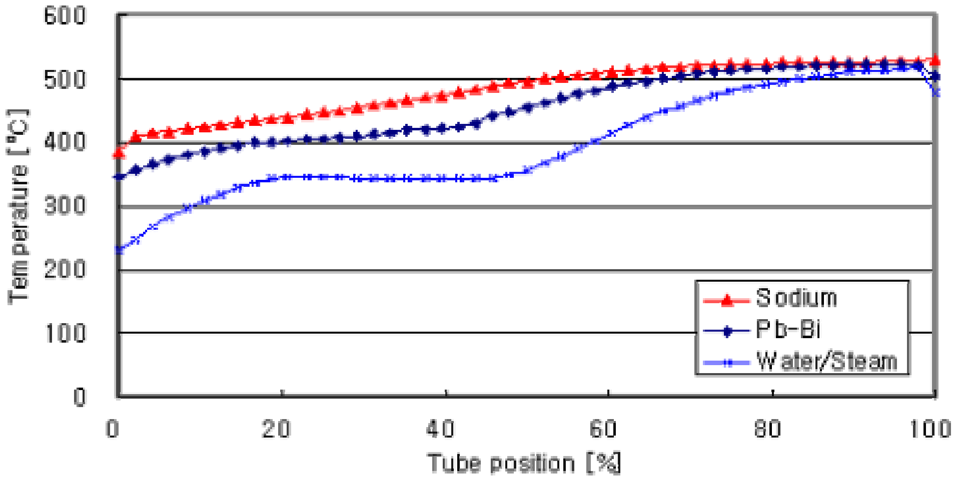

그림 8 복수지역 집적형 열교환기(바깥쪽)의 전열관 위치별 온도분포

5. 결론

1차원 열수력해석 방법을 이용하여 집적형 일체형 열교환기의 열수력적 설계 및

성능분석용 전산프로그램을 개발하였다.
이를 이용하여 일체형 열교환기의 열수력적 성능분석이 가능하다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] K. Miyazaki, H. Horiike, T. Umeoka, J. Orita, K. Hamada and T. Sano, 1996, “Advanced IHX-SG combined FBR System Designs and Basic Experiments”, 10th Pacific Basic Nuclear Conf., Kobe, Japan, pp.769-778.

[2] H. Horiike, S. Inoue, S. Miyamoto, K. Miyazaki, No. Yamaoka, K. Fujimori, T. Iitsuka, M. Morimoto, J. Orita, N. Sawa and M. Tamaki, 2003, “Advanced intermediate heat exchanger for FBR”, 11th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan.

[3] I. Kinoshita, Y. Nishi and M. Furuya, 1995, “Fundamental Heat Transfer Characteristics of a Direct Contact Steam Generator for Fast Breeder Reactor”, 3rd JSME/ASME Joint Int. Conf. on Nuclear Eng., Kyoto, Japan, Vol.1, pp.11-16.

[4] I. Kinoshita and Y. Nishi, 2000, “Innovative Heat Exchanger”, 10th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, Petten, NRG.

[5] Hahn D.H. et al, 2002, “KALIMER Conceptual Design Report”, KAERI/TR-2204/2002, KAERI.