2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

헬리컬 코일 증기발생기 다차원 열유체해석모델 개발

Development of multi-dimensional analysis model for helical coil steam generator

김의광, 김연식, 심윤섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)의 정상상태 운전시 헬리컬 코일형 증기발생기 내부의 온도분포를 구하기 위해 다차원 열유체해석 프로그램 COMMIX-HSG 의 모형을 개발하였다. 작업의 접근방법으로 shell 측의 열유체적 해석은 COMMIX 코드를 이용하고, 튜브측은 증기발생기 1 차원 sizing 코드의 일부 서브루틴을 수정한 후 셀측과 튜브측의 필요한 정보를 서로 교환하도록 COMMIX 코드를 수정하였다. shell 측은 원주방향으로는 열유체적 조건이 동일하다는 가정하에 2 차원으로 해석하고, tube 측은 각 튜브별 유량은 동일하다고 가정하에 1 차원으로 해석하였다. 시산해석범위는 정상상태시 증기발생기의 상하부 plenum 을 포함한 열교환영역으로, 상부는 정상 소듐 level 면까지이다.

Abstract

A multi-dimensional thermal-hydraulic analysis model of the COMMIX-HSG was developed to generate the detailed temperature data of helical coil steam generator of the KALIMER (Korea Advanced LIquid MEtal Reactor). The COMMIX code was used to analyze thermal-hydraulics of shell side, and the modified version of one-dimensional steam generator sizing program was used for the analysis of the tube side. The several subroutines of the COMMIX were modified for some information to be exchanged between the shell side and tube side. It was assumed that the thermal-hydraulic conditions of shell side are symmetric in the circumferential direction, and each tube row has same mass flow rate. Under the assumed conditions two-dimensional analysis of the regions including the upper head, the tube bundle and the lower head was performed in the steady state. The top region of the model is sodium level between sodium and argon gas region.

1. 서 론

KALIMER는 액체금속인 소듐으로 노심에서 발생한 열을 교환하는 헬리컬 증기발생기를 이용한다. 따라서 소듐의 높은 작동온도, 큰 온도구배, 과도상태시 높은 열전도도를 갖는 소듐으로 인한 급격한 열적 거동으로 인하여 증기발생기의 내부는 여러 운전조건에 따라 내부구조물에 다양한 열적하중을 발생시킨다. 또한 소듐으로 작동하는 증기발생기는 소듐과 물이 접촉할 경우 폭발적인 화학적 반응이 일어나므로 신뢰성과 안전성이 높은 설계가 요구된다. 따라서 증기발생기내부의 구조물 건전성 평가를 위해서는 다차원해석을 통한 증기발생기 내부의 상세한 온도분포를 파악할 필요가 있다.

작업의 접근방법으로 shell측의 열유체적 해석은 COMMIX 코드를 이용하고, 튜브측은 증기발생기 1차원 sizing 코드의 일부 서브루틴을 수정한 후 셸측과 튜브측의 필요한 정보를 서로 교환하도록 COMMIX 코드를 수정한다. shell측은 원주방향으로는 열유체적 조건이 동일하다는 가정하에 2차원으로 해석하고, tube측은 각 튜브별 유량은 동일하다고 가정하에 1 차원으로 해석하였다. 시산해석범위는 정상상태시 증기발생기의 상하부 plenum을 포함한 열교환영역으로, 상부는 정상 소듐 level 면까지이다.

이 논문은 먼저 COMMIX-HSG 계산모델과 구조를 소개하고, 다음으로 칼리머 시산해석결과를 논의한 후, 마지막으로 결론과 향후계획에 대해 기술하기로 한다.

2. COMMIX-HSG의 모델 및 구조

본 작업의 접근방법은 셀측의 2차원 열유체적 해석은 COMMIX 코드를 이용하고, 튜브측은 증기발생기 1차원코드로 해석한 후, 양측간의 연결은 튜브벽면을 통한 열전달로 이루어진다. 튜브를 통한 열전달량을 계산하기 위해서는 튜브내측의 온도와 열전달계수가 먼저 산정되어야 한다. 튜브측 유동은 입구의 과냉각수에서 포화상태의 2상유동을 거쳐 출구의 과열증기 상태까지 유동특성이 변화하므로, 열전달계수는 튜브측 지배방정식의 해를 통한 튜브측 유동형태와 이에 따른 각각의 상관식을 통하여 구한다.

작업을 위한 기본방침은 기존의 코드가 갖고있는 모델과 변수를 가능한 유지하도록 하고, 수정이 필요할 때는 가능한 적은 부분을 수정하도록 한다. 따라서 셀측 유동장과 튜

브벽의 열전도 해석은 COMMIX 를 이용하고, 튜브측 1 차원해석은 증기발생기의 열적 크기산정용 1 차원 코드인 HSGSA 에서 필요한 서브루틴과 변수를 이용한다. 그러나 셀측 유동장해석시 본 작업의 목적에 적합한 튜브형 열적 구조물모델은 없으므로 가장 유사한 실린더형 열적 구조물모델을 채택한다. 그러나 이 모델은 COMMIX 코드의 입력지침에 따르면 내부면이 단열조건이 주어지므로 본해석에 필요한 튜브내부면에 주어져야 할 경계조건은 튜브측 해석에서 구한 결과를 COMMIX 프로그램을 수정하여 입력되도록 한다. 또한 튜브측 1 차원해석은 반경방향의 각 튜브별로 유동특성이 다르므로 각 변수가 2 차원 배열을 갖도록 수정한 후, Marching Procedure 방법으로 해를 구한다.

1) 튜브측 계산모델

튜브의 직경은 길이에 비해 매우 작기 때문에 1 차원해석이 타당하다. 튜브의 양끝은 상하부 플리넘에 연결되어 있고, 모든 튜브의 유량은 동일하다고 가정한다. 이상유동은 homogeneous, equilibrium model 을 채택한다. 정상상태시의 각 지배식은 다음과 같다.

(1) 지배식

<u>질량보존식</u>:

$$\frac{\partial G}{\partial Z} = 0$$

<u>운동량보존식</u>:

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{acceleration} + \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{friction} + \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{gravity}$$

<u>에너지보존식</u>:

$$\frac{\partial Gh}{\partial Z} = \frac{T_w - T_t}{R_{Wi}}$$

위식에서

$G = r\ v$

$G =$ mass flow rate per unit cross section area

$r =$ fluid density

$P =$ pressure

h = specific enthalpy

T_w = tube side fluid temperature

T_t = tube temperature

R_{wi} = heat transfer resistance

(2) 경계조건

- 입구온도
- 입구압력
- 유량

(3) 계산방법

지배식의 해를 구하기 위해 튜브의 길이방향으로 유한차분화하여 해를 구한다. mesh 의 크기는 셀측의 z 방향 mesh 크기와 같게 취한다. 유한차분화된 식은 다음과 같다.

$$\frac{P_{i+1/2} - P_{i-1/2}}{\Delta Z_i} = R_i$$

$$\frac{h_{i+1/2} - h_{i-1/2}}{\Delta Z_i} = \frac{1}{G} \frac{T_w - T_t}{R_{Wi}}$$

여기서 G 는 질량보존식의 결과에서 일정한 상수값을 갖고, R_i 은 아래의 각 압력강하항을 더한 값이다.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{acceleration} = -\frac{\partial}{\partial Z}\left(r\, v^2\right) = \frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{G^2}{r}\right)_i - \frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{G^2}{r}\right)_{i+1}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{friction} = -\frac{1}{2}\frac{G|G|}{r} f \frac{1}{d}$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{gravity} = -rg$$

첨자 i 는 mesh 의 중앙위치를 나타내고, i±½ 는 mesh 가 연결되는 junction 을 나타낸다. mesh 의 중앙에서 정의되는 변수는 열전달량, mesh 크기 ΔZ, 튜브벽면온도 등이 있고, junction 에서는 온도, 압력, 엔탈피 등이 있다. 각 미지수는 입구에서

주어진 온도, 압력, 유량을 적용하여 marching solution 방법으로 구한다.

(4) 튜브에너지식

셀측과 튜브측의 유체는 정상상태 튜브에너지평형식에 따라 다음과 같이 열적으로 연결되어 있다. R_{wo} 은 튜브와 셀측 유체사이의 열전달저항이고, T_S 는 셀측 유체온도이다.

$$\frac{T_S - T_t}{R_{Wo}} - \frac{T_t - T_w}{R_{Wi}} = 0$$

튜브측 유체온도 T_w 는 mesh 의 중앙에서의 값이므로 i mesh 의 T_w 는 다음과 같이 정의한다.

$$T_w = \frac{T_{w,i-1/2} + T_{w,i+1/2}}{2}$$

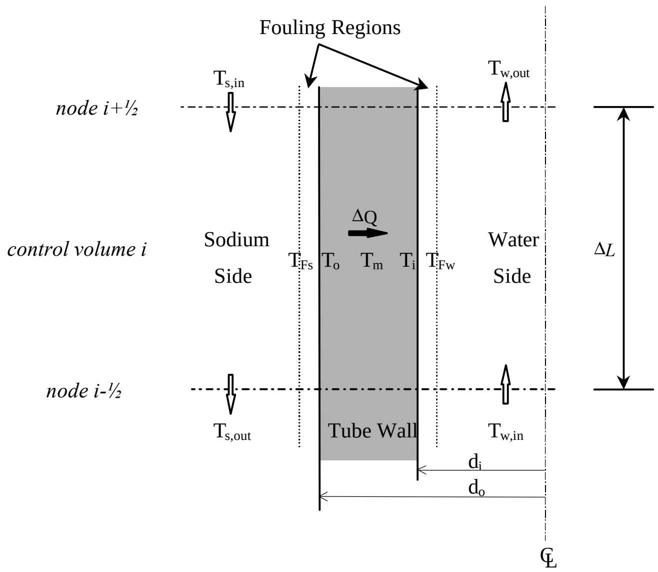

그림 1 Theoretical model of a control volume for heat transfer

2) 셀측 계산모델

셀측의 열유체적 해석과 튜브벽의 열전도 해석은 COMMIX 코드에서 이루어진다. 튜브를 통한 열전달량은 에너지보존식의 생성항으로 처리된다. 본 해석에서 헬리컬코일 튜브는 직관형태로 모의되며, 주어진 노드 높이에서 동일한 열전달면적을 갖도록 직관의 개수를 조정한다. 그러나 직관형태의 모델링은 열전달에 한한 것이며, 헬리컬 튜브의 위치와 진행방향에 따라 영향을 받는 유동저항은 별도의 입력항에서 처리된다.
셀측 mesh 와 튜브의 상대위치는 셀측 mesh 안에 튜브가 온전히 포함되거나, 튜브의 반쪽씩 포함될 수 있다. 후자의 경우는 튜브가 양쪽 mesh 에 걸쳐있어, mesh 의 가운데가 실험측정이 이루어지는 위치이고, bypass gap 의 유동저항이 보다 쉽게 모델링될 수 있는 장점이 있다. 그러나 현 단계에서는 셀측 mesh 안에 튜브가 온전히 포함되어있는 형태이다.

3) 열전달계수 및 압력강하 상관식

헬리컬코일 관류형의 증기발생기인 경우 튜브측의 회전류로 인하여 이차류가 발생하거나 원심력에 의한 영향 등으로 열전달 특성이나 유동특성에 있어서 직관형인 경우와는 다르며 특히, DNB 발생이 좀 더 높은 증기질에서 일어나는 등 전반적으로 향상된 열전달 특성을 가진다. 헬리컬코일 관류형 증기발생기의 쉘/튜브 측의 열전달 및 압력강하 상관식을 표 1 에 요약하였다.

Table 1. Heat transfer and pressure drop correlations

(Water side – Heat transfer)
Preheat

Seban-McLaughlin: $Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.85}\,\mathrm{Pr}^{0.4}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{0.1}$

Mori-Nakayama: for Pr>1

$$Nu = \frac{\mathrm{Pr}^{0.4}\,\mathrm{Re}^{5/6}}{41.0}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{1/12}\left\{1 + \frac{0.061}{\left[\mathrm{Re}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{2.5}\right]^{1/6}}\right\}$$

Nucleate Boiling

Chen(modified for h_c): $h_B = S\,h_b + F\,h_c$

Where, F: Martinelli parameter

S: suppression factor

$$h_c = 0.023\left(\frac{k}{d_i}\right)(1-x)^{0.8}\,\mathrm{Re}^{0.85}\,\mathrm{Pr}^{0.4}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{0.1}$$

$$h_b = 0.00122\left[\frac{k_l^{0.79}\,Cp_l^{0.45}\,r_l^{0.49}}{s^{0.5}\,m_l^{0.29}\,h_{fg}^{0.24}\,r_g^{0.24}}\right]\Delta t_{sat}^{0.24}\,\Delta p_{sat}^{0.75}$$

: modified Forster-Zuber equation

Owhadi:

$$h_{TPF} = h_c A e^{4.436-29.722\,X_{tt}+141.237\,X_{tt}^2-325.34\,X_{tt}^3+272.58\,X_{tt}^4}$$

where, $h_c = 0.023\left(\frac{k}{d_i}\right)\mathrm{Re}^{0.85}\,\mathrm{Pr}^{0.4}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{0.1}$

A=1 when $X_{tt} \rangle 0.05$

A= $\left(\frac{D_c}{20d_i}\right)^{0.25}$ when $X_{tt} \langle 0.05$

Film Boiling

Bishop et al.:

$$Nu_f = 0.0193\,\mathrm{Re}_f^{0.8}\,\mathrm{Pr}_f^{1.23}\left[x+(1-x)\frac{r_g}{r_f}\right]^{0.68}\left(\frac{r_g}{r_f}\right)^{0.68}$$ Superheat

modified Bishop:

$$Nu = 0.073\,\mathrm{Re}^{0.936}\,\mathrm{Pr}^{0614}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{0.1}$$

Mori-Nakayama: same as Preheat region

Fouling : 25,000 W/m²-°C

(Water side – Critical Quality)

Duchatelle et al.:

$$x = 1.69\times10^{-4}\,q^{0.719}\,G^{-0.212}\,e^{2.5\times10^{-8}\,p}$$

(Water side – Pressure Drop)

Preheat/Superheat

Mori-Nakayama:

$$f = \left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{0.5} \left\{ \frac{0.192}{\left[\mathrm{Re}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{2.5}\right]^{1/6}} \right\} \left\{ 1 + \frac{0.068}{\left[\mathrm{Re}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{2.5}\right]^{1/6}} \right\}$$

Duchatelle:

$$f = \left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{0.5} \left\{ \frac{0.1614}{\left[\mathrm{Re}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{2.815}\right]^{1/6.63}} \right\} \left\{ 1 + \frac{0.002}{\left[\mathrm{Re}\left(\frac{d_i}{D_c}\right)^{2.815}\right]^{1/6.63}} \right\}$$

Two-Phase

Homogeneous equilibrium model
Modified Martinelli-Nelson or Jones model
Chiholm model

(Sodium side – Heat transfer)

Kalish-Dwyer:

$$Nu = j\left(\frac{d}{p}\right)\left(5.44 + 0.228 Pe^{0.614}\right)\left(\frac{\sin q + \sin^2 q}{1 + \sin^2 q}\right)^{1/2}$$

where, $j\left(\frac{d}{p}\right)$: geometric factor using Hsu

(cross flow model)

Lubarsky-Kaufman:

$$Nu = 0.625 \mathrm{Re}^{0.4} \mathrm{Pr}^{0.4}$$ (in-line flow model)

Fouling : 25,000 W/m²-°C

(Sodium side – Pressure Drop)

Gunter-Shaw:

$$\Delta p = \frac{f_c}{2} \frac{G^2 L}{r_b D_V} \left(\frac{m_b}{m_w}\right)^{-0.14} \left(\frac{D_v}{S_T}\right)^{0.4} \left(\frac{S_L}{S_T}\right)^{0.6}$$

where, $\frac{f_c}{2} = 0.96 \left(\frac{D_V G}{m_b}\right)^{-0.145}$ for $\mathrm{Re}_{Dv} > 200$

$$\frac{f_c}{2} = 90\left(\frac{D_V G}{m_b}\right)^{-1} \quad \text{for Re}_{Dv} < 200$$

Zukauskas:

$$\Delta p = f\,\frac{NG_{\max}^2}{2r}Z$$

4) COMMIX-HSG 프로그램의 구조

COMMIX-HSG 프로그램의 주요구조는 아래 그림과 같다. 프로그램은 COMMIX 의 main program 과 main program 을 제외한 COMMIX 프로그램, 튜브해석 프로그램, steam table 등 3 개 library 로 구성된다.

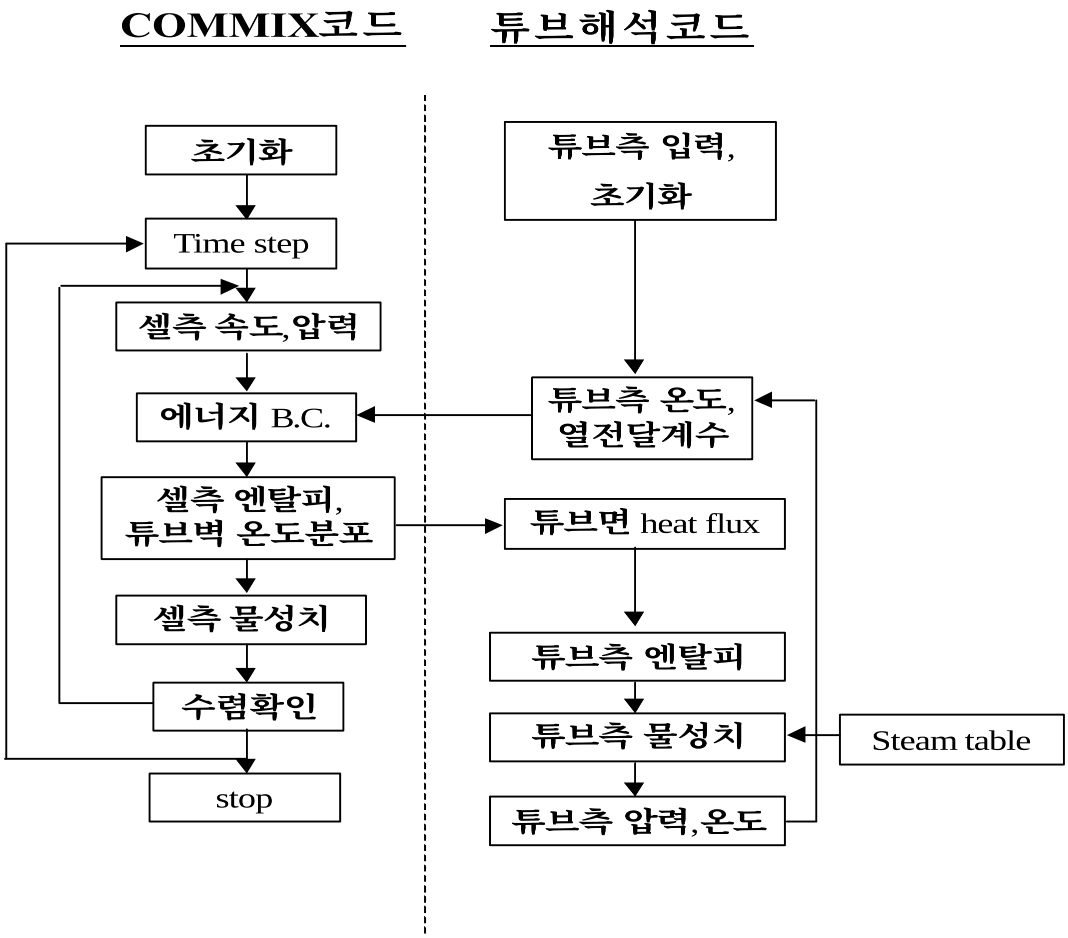

그림 2 COMMIX-HSG 프로그램의 구조

3. 칼리머 증기발생기 내부해석 시산 및 평가

소듐은 증기발생기의 상부에서 sodium distributor 를 통하여 유입되고, tube bundle 영역에서 튜브측으로 열교환이 이루어진 후 아래의 출구노즐로 빠져나간다. sodium distributor 는 argon cover gas 가 소듐으로 유입되지않도록 소듐 level 면 아래에 위치하고 있다. 반경방향의 범위는 inner shroud 와 outer shroud 사이이고, 총 22 개의 노드중 inner shroud 까지 7 개, outer shroud 까지 tube bundle 영역에 15 개가 주어졌다. 높이방향의 범위는 소듐 level 면과 출구노즐사이이며, upper pool 에 34 개, tube bundle 에 40 개, lower pool 에 25 개의 노드가 주어져, 총 99 개의 계산노드가 사용된다. 원주방향은 2 차원 해석이므로 1 개의 노드가 적용된다. 각 노드의 크기는 다음과 같고, DX, DZ 의 단위는 m 이고, DY 는 radian 이다.

- DX=0.05716, 6*0.05714, 0.09007, 13*0.05714, 0.11711
- DY=1.5708
- DZ=0.1, 24*0.1625, 40*0.1625, 33*0.17, 0.19

경계조건은 다음과 같다.

- 소듐 유량 : 901.8 kg/sec (증기발생기 1 대당)
- 소듐 입구온도 : 511 °C
- 물 유량 : 87.725 kg/sec (증기발생기 1 대당)
- 물 입구온도 : 230 °C
- 물 입구압력 : 17.5 MPa

프로그램의 작동성을 알아보기 위해 overall performance 평가인자로 열교환량, 튜브출구 평균온도, 소듐출구온도를 1 차원해석 결과와 비교하면, 열교환량은 49.18 MWt 으로 49.58 MWt 와 상대적으로 0.8%의 오차를 보이고, 튜브출구 평균온도는 487.3 °C 로 483.2 °C 와 일치한다. 소듐출구온도 또한 339.2 °C 로 339 °C 와 일치한다.
튜브위치에 대한 튜브측 온도변화는 다음과 같다. 그림에서 shroud 에 인접한 1 번째, 15 번째 tube row 는 tube bundle 의 중간부분 tube row 보다 상대적으로 온도가 높으며, 비등과 단상증기로 변환이 빠름을 볼 수 있다.

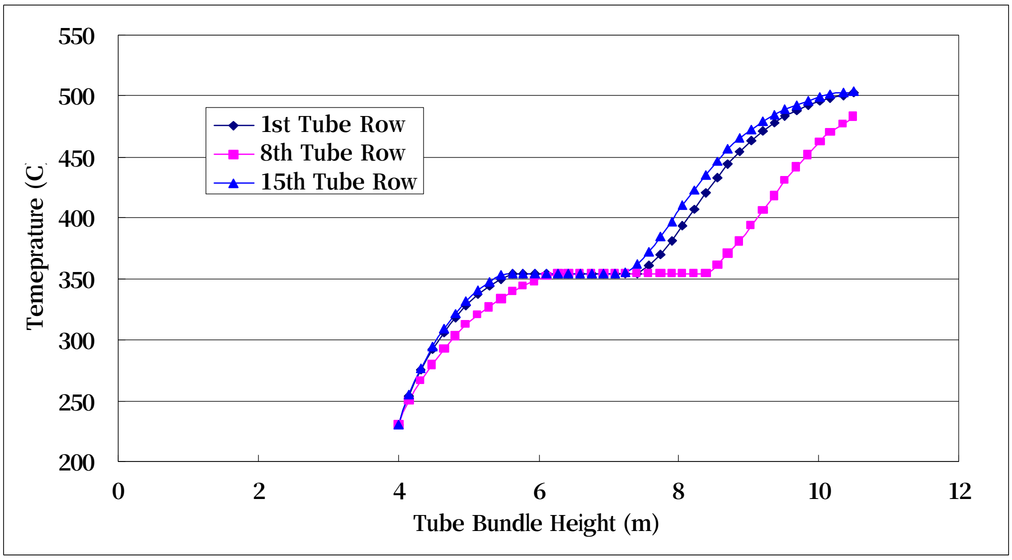

그림 3　Temperature distribution of tube side flow

아래 그림은 8 **번째** tube row **의** tube bundle **높이에 대한 소듐, 튜브내외면, 물/증기의 온도 분포이다. 튜브내면의 온도분포선에서 약** 8.5 m **지점의 온도상승기울기가 약간 빠른 것은** 2 **상유동이 단상증기로 변하므로 열전달계수가 순간 급격히 떨어지기 때문이다.**

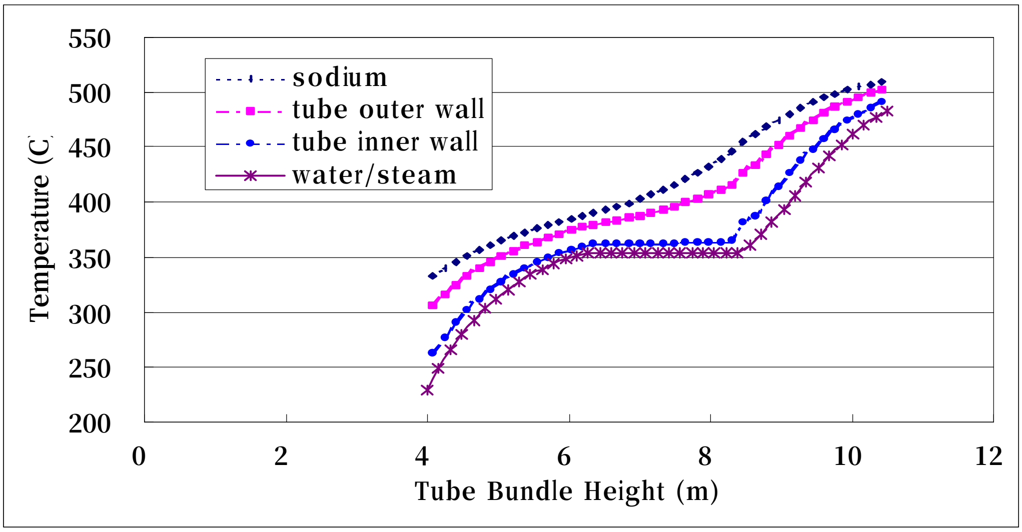

그림 4　Temperature distribution of interior tube row

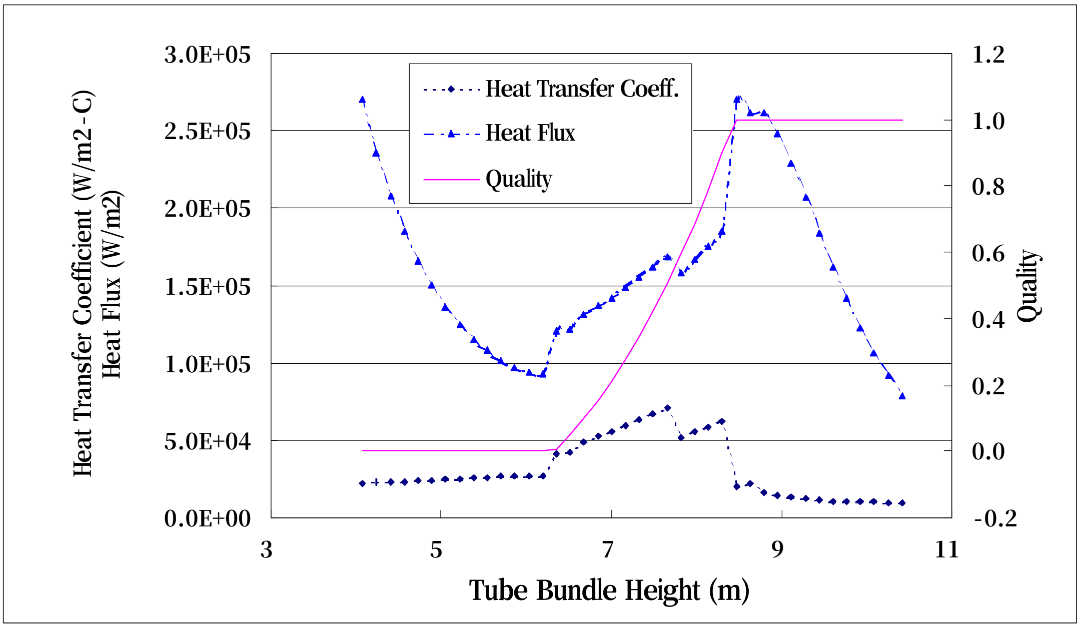

그림 5 Heat transfer coefficient, heat flux and quality of interior tube row

위 그림은 8 **번째** tube row **의** tube bundle **높이에 대한 물**/**증기의** quality, **열전달계수**, heat flux **분포이다**. **열전달계수는** 2 **상유동 시작과 함께 서서히 증가하다** DNB **가 발생하는 약** 8 m **지점과 단상증기로 변하는 약** 8.5 m **지점에서 급격히 떨어짐을 볼 수 있다**.

아래 그림은 upper plenum, tube bundle, lower plenum **의 속도분포와 온도분포를 나타낸다**. **온도분포 그림에서 양쪽** gap **을 통한 소듐으로 인하여 셀측 소듐온도의 불균일한 온도분포를 볼 수 있다**.

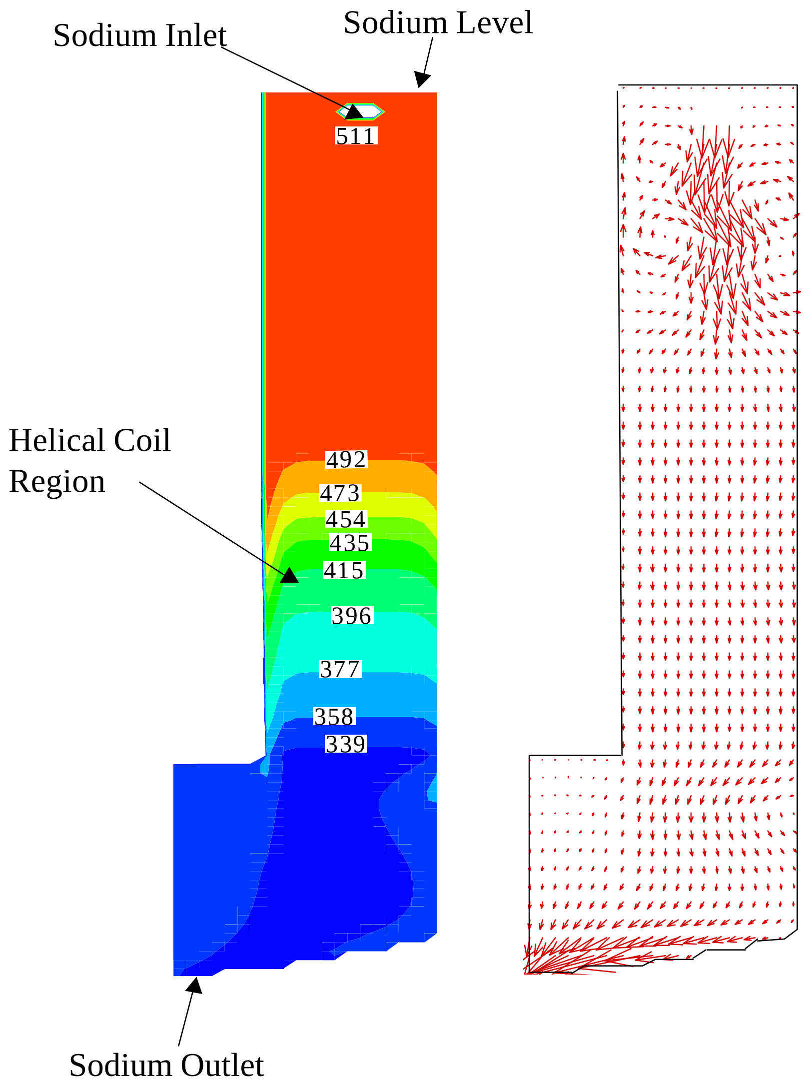

그림 6 Sodium temperature and velocity profiles

4. 결론 및 향후 계획

1) 헬리컬코일형 증기발생기의 다차원내부해석체제를 구축하기 위하여 COMMIX-1AR/P 코드에 증기발생기 튜브측 1 차원 해석프로그램을 결합한 COMMIX-HSG 의 모형을 개발하였다.

2) 향후 개선하여야 할 항목은 다음과 같다.

- 튜브별 동일압력강하 경계조건
- 튜브단면 1/2 씩을 포함하는 shared tube row modeling
- bundle 과 shroud 사이 gap 의 유동저항 상관식
- 난류모델
- 실험자료를 이용한 코드검증

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김연식, “User Manual for HSGSA Computer Code (HSGSA 전산코드 사용자 지침서) ”, KALIMER 개발팀 내부문서, KALIMER/FS-4CM-98-001, 한국원자력연구소, 1998

[2] C.R. Kakarala, S.W. Burge, and W.T. Sha, “COMMIX analysis of the sodium heated helical coil steam generator”, 87-WA/NE-15, ASME winter meeting, Dec.,1987

[3] W.T. Sha, C.I. Yang, T.T. Kao, and S.M. Cho, “Multidimensional numerical modeling of heat exchangers”, Journal of Heat Transfer, Vol.104, Aug. 1982

[4] D.C. Smith, P.M. Gerhart, and C.R. Kakarala, “Preliminary multidimensional thermal-hydraulic analysis of a helical coil LMFBR steam generator”, ANS Transaction, Vol.44, Jun. 1983

[5] COMMIX-1AR/P Volume 1; Equations and Numerics, ANL-90/45, Jul.,1991

[6] COMMIX-1AR/P Volume 2; User’ s Guide, ANL-92/34, Sep.,1992