2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

칼리머 헬리컬코일 증기발생기의 다차원 열유체해석

Multi-dimensional thermal hydraulic analysis of the KALIMER helical coil steam generator

김의광, 김연식, 어재혁, 김성오

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로 KALIMER **헬리컬코일형 증기발생기 내부의 정상상태 운전시 온도 분포를 구하기 위해 다차원 열유체해석 프로그램** COMMIX-HSG **을 개발하고**, 100, 80, 40%**출력시의 온도분포를 구하였다**. shell **측의 열유체적 해석은** COMMIX **코드를 이용하고**, **원주방향으로는 열유체적 조건이 동일하다는 가정하에** 2 **차원으로 해석하였다**. **튜브측은** 1 **차원으로 해석하고**, **각 튜브별 압력손실은 동일한 경계조건을 적용하여 해석하였다**. shell **측의 해석영역은 증기발생기의 상하부** plenum **을 포함한 영역으로**, **상부는 정상 소듐** level **면까지이고 하부는 출구노즐까지이다**.

Abstract

A multi-dimensional thermal-hydraulic analysis model of the COMMIX-HSG was developed to generate the steady-state detailed temperature data of helical coil steam generator of the KALIMER. The COMMIX code was used to analyze thermal-hydraulics of shell side, and the one-dimensional steam generator sizing program was used for the analysis of the 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 pressure drop boundary condition. 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 during 100, 80, 40% power conditions. The top region of the model was sodium level between sodium and argon gas region. the lower boundary of the model was the exit nozzle.

1. 서 론

증기발생기 통(shell)측은 비교적 넓은 공간이여 이에 따라 온도의 불균일성이 존재하게 되며, KALIMER 의 경우 액체금속인 소듐을 이용하여 열을 교환하는 헬리컬 증기발생기를 이용한다. 따라서 소듐의 높은 작동온도, 큰 온도구배, 높은 열전도도를 갖는 소듐으로 인하여 증기발생기의 내부는 여러 운전조건에 따라 내부 구조물에 다양한 열적하중을 발생시키고, 특히 전열관 내부를 흐르는 유체, 즉 증기의 온도를 달리하여 정도에 따라 이들 유체가 모아지는 전열관 tube sheet 에 열적하중을 유발하게 된다. 따라서 이러한 불균일성 정도를 파악하고, 소듐으로 작동하는 증기발생기의 신뢰성과 안전성을 높이기 위해서는 증기발생기내부의 다차원해석을 통한 증기발생기 내부의 상세한 온도분포를 파악할 필요가 있다.

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 수정한다. shell 측은 원주방향으로는 열유체적 조건이 동일하다는 가정하에 2 차원으로 해석하고, tube 측은 각 튜브별 압력강하는 동일하다는 조건하에 1 차원으로 해석하였다. 해석범위는 정상상태 100, 80, 40%출력시 증기발생기의 상하부 plenum 을 포함한 열교환영역으로, 상부는 정상 소듐 level 면까지이다.

이 논문은 먼저 COMMIX-HSG 계산모델과 구조를 소개하고, 다음으로 칼리머 해석결과를 논의한 후, 마지막으로 결론에 대해 기술하기로 한다.

2. COMMIX-HSG 의 모델 및 구조

해석프로그램개발을 위한 접근방법으로 셀측의 2 차원 열유체적 해석은 COMMIX 코드를 이용하고, 튜브측은 1 차원 프로그램으로 해석한 후, 튜브벽면을 통한 양측간의 열전달을 계산하는 방법으로 이루어진다. 튜브를 통한 열전달량을 계산하기 위해서는 튜브내측의 온도와 열전달계수가 먼저 산정되어야 한다. 튜브측 유동은 입구의 과냉각수에서 포화상태의 2 상유동을 거쳐 출구의 과열증기 상태까지 유동특성이 변화하므로, 열전달계수는 튜브측 지배방정식의 해를 통한 튜브측 유동형태와 이에 따른 각각의 상관식[참고문헌 7]을 통하여 구한다.

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.

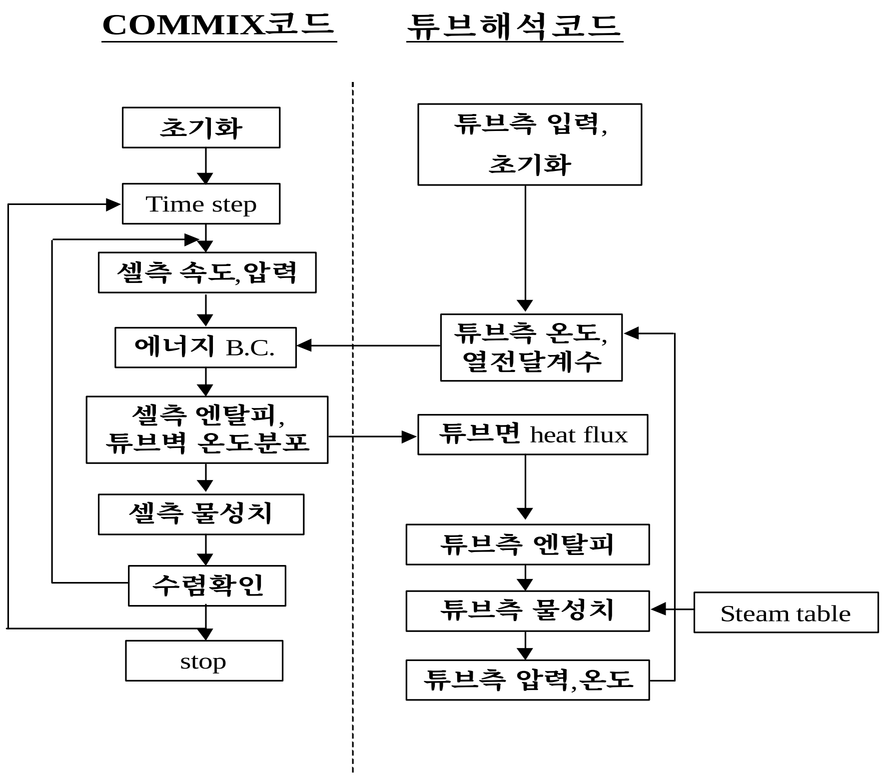

그림 1 COMMIX-HSG 프로그램의 구조

1) 튜브측 계산모델

튜브의 직경은 길이에 비해 매우 작기 때문에 1 차원해석으로 해석하고, 튜브측의 이상유동은 homogeneous, equilibrium model 을 채택한다. 튜브의 양끝은 상하부 플리넘에 연결되어 있으므로 모든 튜브의 압력강하는 동일하다. 정상상태시의 각 지배식과 경계조건은 참고문헌 7 에 설명되어 있다.

튜브측의 열전달계수는 단상냉각수, 포화상태의 2 상유동, 과열증기의 유동특성에 따라 크게 차이가 난다. 또한 헬리컬코일 형태의 튜브를 직관형태로 모의함으로 열전달 면적을 동일하게 고려하기 위해서는 헬리컬 코일튜브 길이 대비 직관의 높이 비율만큼 곱한 값이 열전달면적으로 산정된다. 따라서 상변화지점 노드의 열전

달계수에 의한 오차를 줄일 수 있도록 양 영역의 열전달 표면적을 가중치로 사용해서 아래의 수식과 같이 평균 열전달계수를 구한다.

$$\overline{h_i} = \frac{\Delta P_{2\Phi}\left(\frac{\Delta L}{\Delta P}\right)_{2\Phi} h_{2\Phi} + \Delta P_{1\Phi}\left(\frac{\Delta L}{\Delta P}\right)_{1\Phi} h_{1\Phi}}{\Delta P_{2\Phi}\left(\frac{\Delta L}{\Delta P}\right)_{2\Phi} + \Delta P_{1\Phi}\left(\frac{\Delta L}{\Delta P}\right)_{1\Phi}}$$

여기서 $\overline{h_i}$ 는 노드의 평균 열전달계수이다. $h_{1\Phi}$ 와 $h_{2\Phi}$ 는 노드 i 의 단상영역과 이상영역의 열전달계수이고, 인접노드의 값 즉 노드 i+1 와 i+2, i-1 와 i-2 의 열전달계수에서 extrapolation 으로 구한다. 또한 $\Delta P_{2\Phi}$ 와 $\Delta P_{1\Phi}$ 는 노드 i 의 경계면에서 포화압력과의 차이를 나타내고, $\left(\frac{\Delta L}{\Delta P}\right)_{2\Phi}$ 와 $\left(\frac{\Delta L}{\Delta P}\right)_{1\Phi}$ 는 인접노드 i-1 와 i+1 에서의 압력변화율의 역수이다. 노드 i 의 포화압력은 포화엔탈피가 압력에 크게 차이가 나지 않는다는 점을 이용해 노드 i 양쪽 경계면의 압력에 해당하는 포화액체엔탈피 (포화상태에서 과열증기로 변화는 노드의 경우는 포화기체 엔탈피)를 구한 후 인접노드의 엔탈피 대비 압력의 변화율을 기울기로 삼아 extrapolation 으로 구하였다.

전열관의 유동 경계조건으로 주어지는 변수는 다음과 같다.

- 입구온도
- 입구압력
- 유량

각 튜브의 유량은 shell 측의 열유동조건에 따라 튜브측의 유동변화에 차이가 나므로 각 튜브의 유량 또한 다르다. 각 튜브의 유량은 전체튜브유량의 합은 총튜브측유량과 같고, 튜브의 양단에 걸리는 압력강하치는 동일하다는 조건을 적용하여 결정하였다. 튜브측의 경계조건은 튜브측 해석프로그램의 서브루틴 TUBEMDOT, TUBEPTTT 에서 계산된다. 서브루틴 TUBEMDOT 에서는 먼저 가정으로 주어진 총압력강하치에 상응하는 각 튜브별 유량을 결정한 후, 튜브별 유량을 모두 합한 총튜브유량을 결정한다. 서브루틴 TUBEPTTT 에서는 서브루틴 TUBEMDOT 에서 구한 총튜브유량이 경계조건으로 주어진 유량과 같은 값이 되는 총압력강하치를 결정한다. 두 서브루틴에서 총압력강하치와 튜브별 유량을 결정하기위한 계산방법은 SHOOTING METHOD 를 이용하였다

2) 셸측 계산모델

셸측의 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 인자를 곱하는 형태로 조정한다. 그러나 이와같은 직관형태의 모델링은 열전달에 한한 것이며, 헬리컬 튜브의 위치와 진행방향에 따라 영향을 받는 유동저항은 별도의 압력손실 입력항에서 처리된다.

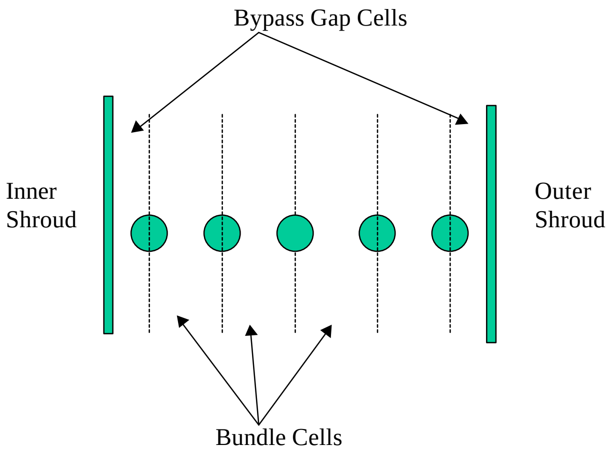

그림 2 Tube bundle modeling

shell 측 mesh 와 튜브의 상대위치는 두개의 shell 측 mesh 사이에 튜브가 위치하여 양쪽 shell mesh 에 튜브의 반쪽씩 포함되도록 하여, 각 튜브의 튜브벽을 통한 열전달량의 1/2 만큼 인접 shell 측 mesh 에너지보존식의 생성항으로 처리되도록 하였다. 그림 2 는 tube bundle 에 대한 shared tube row 모형에 관한 그림이다.

shell 측 압력손실 모형은 헬리컬 튜브의 기울기 각도가 약 6 도 이므로 튜브에 대한 소듐의 유동은 cross flow 형태로 가정할 수 있다. 상관식은 아래의 Gunter-Shaw 상관식을 적용한다. inner shroud 와 outer shroud wall 면에 의한 마찰저항은 무시하고, shroud 면 인접한 튜브에 의한 유동저항은 벽면 반대편에 가상의 튜브가 존재하는 것으로 가정하여 상관식을 적용하였다.

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

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

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

$$\mathrm{Re}_{Dv} = \frac{D_V\, r_{gap} v_{gap}}{m}$$ DV : volumetric hydraulic diameter

shell 측 난류모형은 증기발생기 내부열유동해석시 shell 측 유동장에 미치는 영향은 지배식에서 확산항에 의한 것보다는 tube 같은 내부구조물 때문에 발생하는 유동저항이나 heat source 에 의한 생성항이 보다 지배적이다. 따라서 확산계수와 관련한 정교한 난류모델은 필요치 않은 것으로 판단되며, 본 해석에서는 난류모델중에서 가장 간단한 constant turbulent viscosity and conductivity 모델을 적용하였고, 상관식은 다음과 같다.

$$m_t = 0.007\, C\, rU_{\max}\lambda$$

$$C = \begin{Bmatrix} 0 & \mathrm{Re} \le 1000 \\ 0.1(0.001\mathrm{Re} - 1) & 1000 \le \mathrm{Re} \le 2000 \\ 0.1 & \mathrm{Re} \ge 2000 \end{Bmatrix}$$

$$\lambda = 0.4 D_h$$

$$l_t = \frac{C_p m_t}{0.8 / \left[1 - \exp\left(-6 * 10^{-5}\,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}^{0.333}\right)\right]}$$

여기서 m_t 는 turbulent viscosity 이고, l_t 는 turbulent conductivity 이다. Cp 와 Pr 은 유체의 비열 및 프란틀수이다. Dh 는 지역에 따라 아래와 같이 적용하였다.

- tube bundle 지역 : Dh = 튜브사이 유로에 대한 수력직경
- tube bundle 의 윗지역 : Dh = inner shroud 와 outer shroud 사이의 반경거리
- tube bundle 의 아랫지역 Dh = outer shroud 의 반경

3. 칼리머 증기발생기 내부상세해석 결과

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.

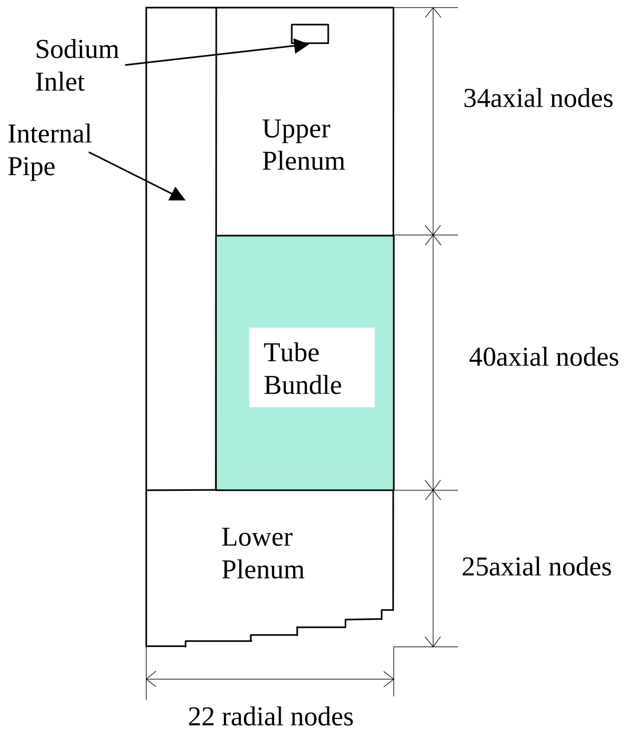

그림 3 COMMIX 모델 및 노드수

반경방향의 범위는 증기발생기 중심에서 outer shroud 사이이고, tube bundle 영역은 inner shroud 에서 outer shroud 까지이다. 총 22 개의 노드중에서 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.(그림 3 참조) 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

해석운전조건은 100%, 80%, 40% 출력운전조건이고, shell 및 튜브측 경계조건은 다음과 같다.

출력	소듐유량 kg/sec (SG 1 대당)	소듐 입구 온도 °C	물유량 kg/sec (SG 1 대당)	물입구온도 °C	물입구압력 MPa
100 %	901.8	511	87.7	230	16.2
80 %	769.93	501.3	68.2	223	16.2
40 %	603.19	447.3	33.6	183.1	16.2

출력별 튜브측 유량분포는 그림 4, 5, 6 과 같다. 그림 4 은 100%출력시의 유량분포로 가운데에 위치한 tube row 의 유량이 inner shroud 에 인접한 1 번째, outer shroud 에 인접한 15 번째 tube row 의 유량보다 높음을 볼 수 있다. 이는 tube bundle 의 중간부분 tube row 에 비하여 shroud 에 인접 gap 의 shell 측 온도가 더 높고, 단상액체에서 비등과 단상증기로의 변화가 상대적으로 빨리 일어나 압력강하 기울기가 큰 비등 및 증기영역의 면적이 많아지기 때문이다. 그림 5, 6 은 80%, 40% 출력에 대한 것이다. 출력이 낮아질수록 보다 균일한 유량분포를 보이고 있다.

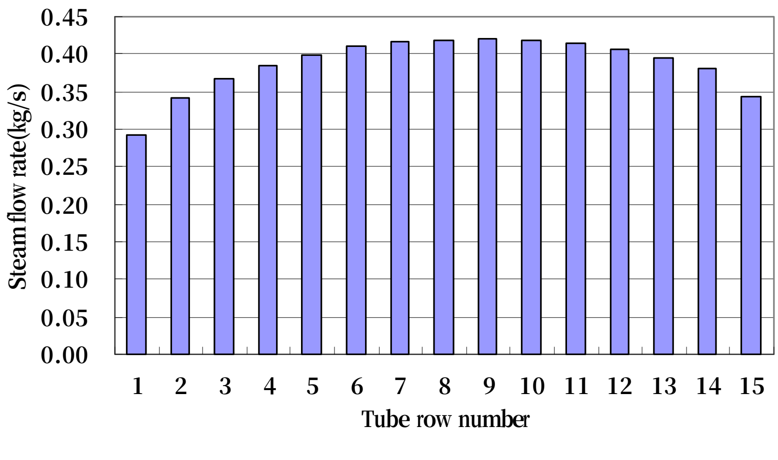

그림 4 튜브측 유량분포(100%)

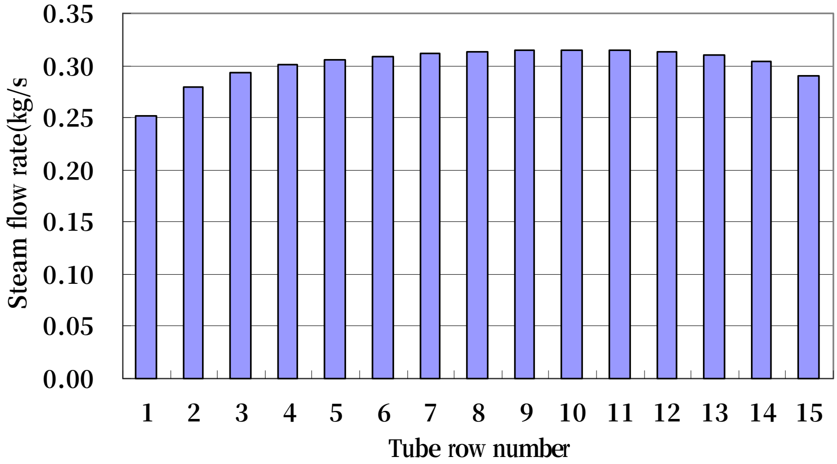

그림 5 튜브측 유량분포(80%)

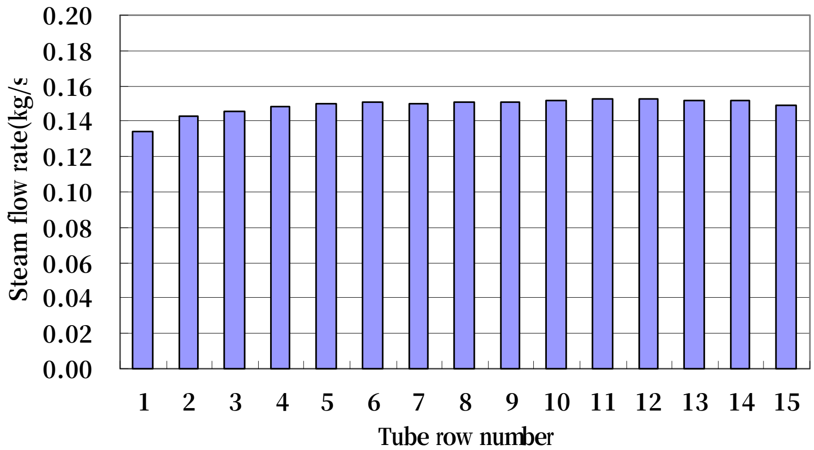

그림 6 튜브측 유량분포(40%)

출력별 튜브측 출구온도분포는 그림 7, 8, 9 과 같다. 그림 7 는 100%출력시의 출구증기의 온도분포로 가운데에 위치한 tube row 의 온도가 shroud 에 인접한 tube row 의 온도보다 약 30 °C 낮음을 볼 수 있다. 그림 8, 9 은 80%, 40% 출력에 대한 것이다. 출력이 낮아질수록 보다 균일한 분포를 보이고, 40% 출력에는 거의 동일한 분포를 보인다.

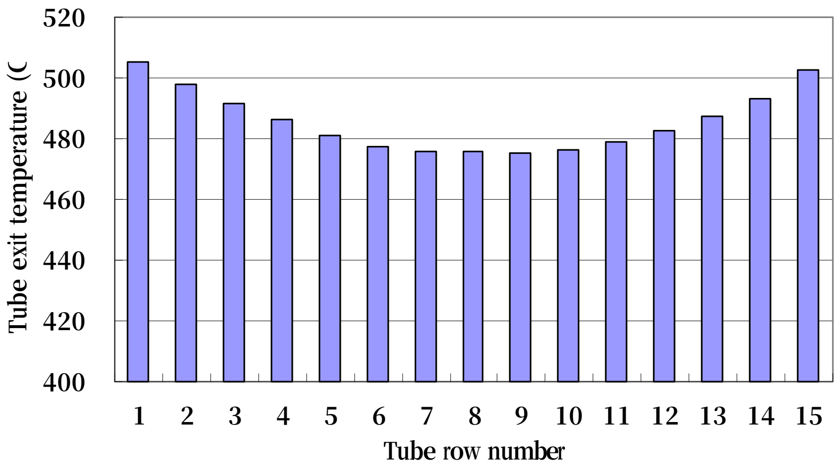

그림 7 튜브측 출구온도분포(100%)

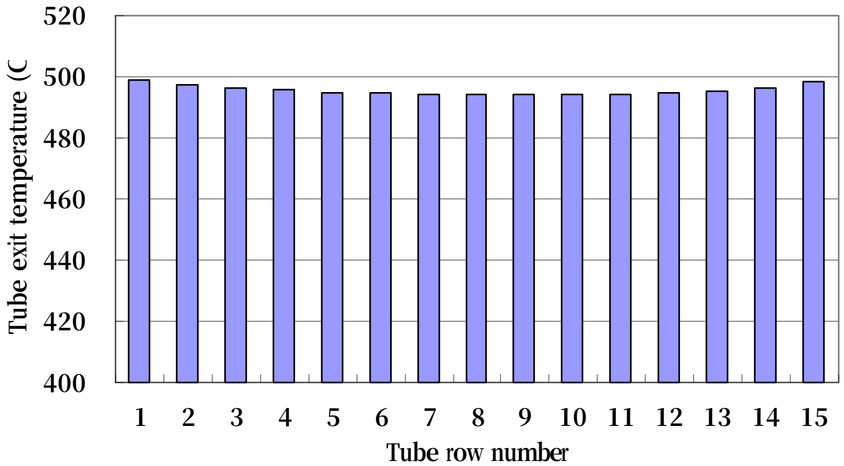

그림 8 튜브측 출구온도분포(80%)

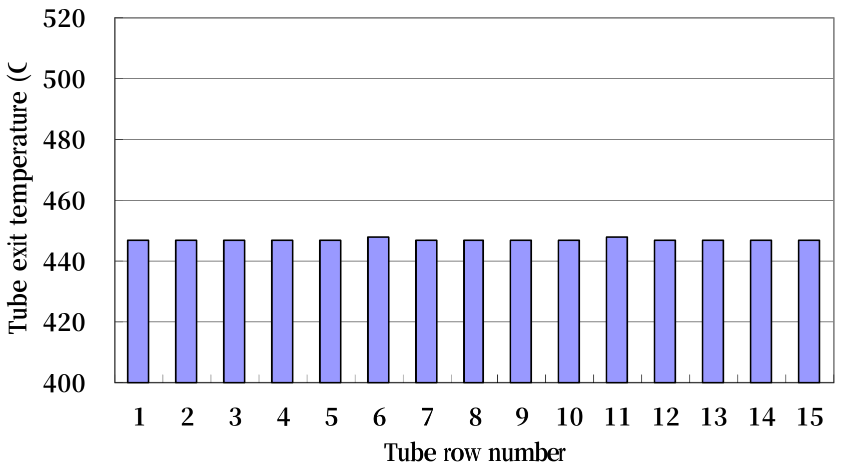

그림 9 **튜브측 출구온도분포**(40%)

그림 10 **는** 100% **출력시의 소듐 온도분포이다. 가운데 위치보다는** shroud **에 인접한 지역의 온도가 상대적으로 높은 온도를 보인다. 그림** 11, 12 **는** 80%, 40% **출력시의 소듐온도분포로** 100% **출력시와 비슷한 거동을 보이나** 40% **출력시의 경우는 튜브측 과열증기영역에 해당하는 지역의 비율이 상대적으로 크다. 이는 소듐대비 물의 유량비가** 40%**출력시는 약** 17.9 **인데 비해,** 100%**출력시는 약** 10.3 **이기 때문이다.**

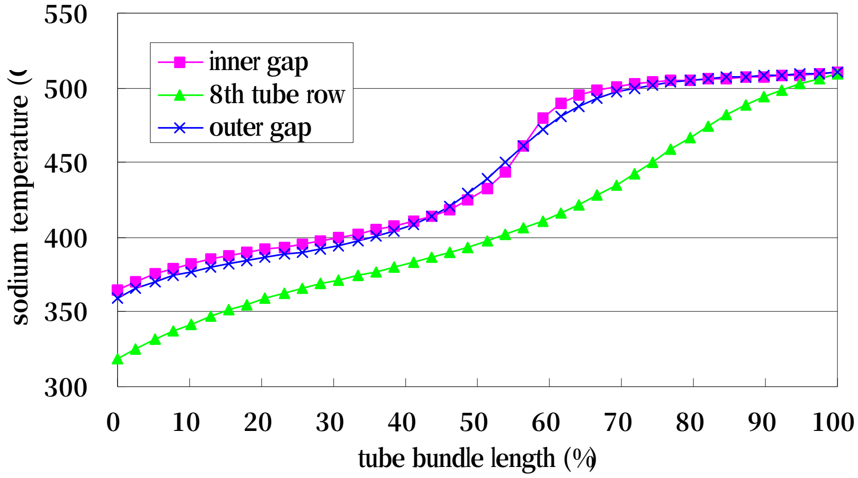

그림 10 **소듐측 온도분포**(100%)

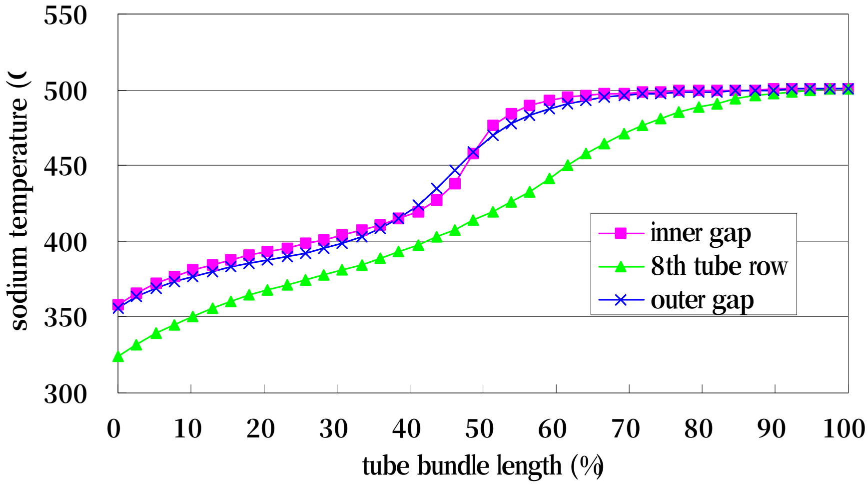

그림 11 **소듐측 온도분포**(80%)

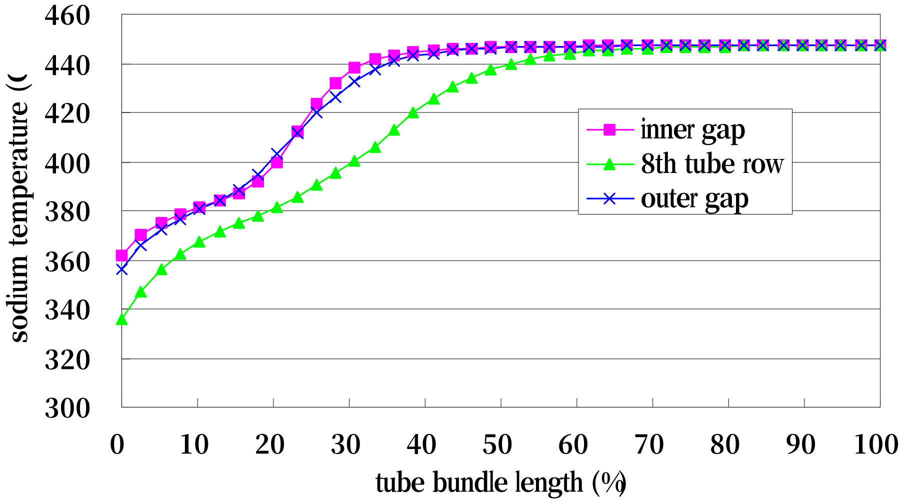

그림 12 **소듐측 온도분포**(40%)

그림 13 **는** 100%**출력시** upper plenum, tube bundle, lower plenum **의 속도분포와 온도분포를 나타낸다. 온도분포 그림에서 양쪽의** shroud **와** bundle **사이의** gap **을 통과하는 고온의 소듐으로 인하여** shell **측 소듐온도가 반경방향으로 불균일한 온도분포**

를 나타낸다.

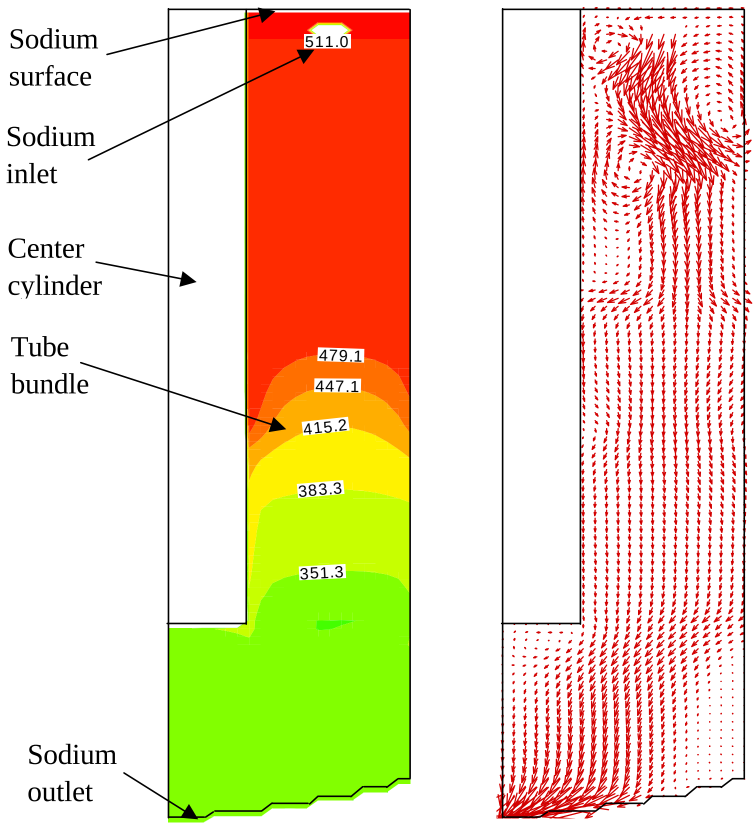

그림 13 Sodium temperature and velocity profiles (100% power)

4. 결론

1) 개념설계된 증기발생기 shell 측 온도 특성을 개발된 전산 해석체제를 이용하여 2D 해석을 100%, 80%, 40% 출력시에 대하여 수행하였으며,
2) shell 측의 열유체적 상세특성이 파악됐고, 전열관 출구측의 온도분포 균일성이 양호한 것으로 평가됐다.

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

[7] 김의광,”헬리컬 코일 증기발생기 다차원 열유체해석모델 개발”, 한국원자력학회 2000 춘계학술발표회