2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

축방향 열전도를 고려한 칼리머 원자로용기 온도분포해석

Temperature Distribution of KALIMER Reactor Vessel with Axial Heat Conduction

김의광, 김연식, 어재혁, 위명환

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

정상상태 전출력시의 원자로용기 온도분포 해석결과를 얻기 위해서 원자로용기를 대상으로 2 차원 열전도해석을 수행하였다. 원자로용기 내부에 가해지는 열전달 경계조건은 저온 소듐면 아래영역은 COMMIX 결과를 이용하고, 그 위의 헬륨공간영역은 복사열전달 해석결과를 적용하였다. 원자로용기의 외면에서 방출되는 열전달 경계조건은 PSDRS 간이모형을 이용하였다. 온도구배가 크게 발생하는 고온소듐면과 저온소듐면의 온도가 COMMIX 에 의한 결과보다 매끄럽고, reactor baffle 에 의해 복사열전달 차폐가 이루어지는 영역의 원자로용기온도는 COMMIX 에 의한 결과보다 높다.

Abstract

A 2-dimensional heat conduction analysis for KALIMER reactor vessel in steady state at full power was performed. For the boundary conditions of inner surface of reactor vessel, the results of COMMIX analysis for the region below cold sodium level and the results of radiation heat transfer analysis for the helium space above the cold level were used. A simplified PSDRS heat transfer model was used for the outer boundary condition of the reactor vessel. The temperature profiles of the reactor vessel at both sodium levels were smoother than that of COMMIX results. And the temperature of the reactor vessel at the region which radiation shield is placed by reactor baffle was higher than that of COMMIX results.

1. 서 론

KALIMER 는 POOL 형태의 액체금속로이다. POOL 형 액체금속로의 PHTS (Primary Heat Transport System)는 POOL 내부에서 형성되고, 내부구조물과 소듐, COVER GAS 등을 담고

있는 원자로용기는 풀내부의 3차원 유동특성에 따라 불균일한 온도분포를 보인다. 또한 원자로의 높은 작동온도, 큰 온도구배, 높은 열전도도를 갖는 소듐으로 인한 급격한 과도상태시 열적 거동으로 인하여 풀 내부는 여러 운전조건에 따라 내부구조물에 다양한 열적하중을 발생시킨다. 따라서 원자로 내부구조물의 건전성 평가를 위해서는 보다 정확한 온도분포를 파악할 필요가 있다.

원자로풀의 열유체적 해석은 다차원 열유체해석코드인 COMMIX 코드가 이용된다. 유동장 내부구조물에 대한 COMMIX의 온도계산은 유체와 인접한 구조물면사이의 두께방향 열전도만 해석이 이루어지기 때문에 이에 수직한 축방향 열전도해석은 고려되지 않는다. 또한 참고문헌[1]에서 언급한 것과 같이 baffle로 인한 복사열 차폐영역과 저온풀 정상액위면 위치에서 원자로용기온도는 온도가 급격히 변하고 있다. 그러나 축방향 전도가 함께 고려되면 급격한 온도변화가 보다 완화될 소지가 있으므로, COMMIX의 해석결과를 바탕으로 축방향 전도까지 고려한 2차원 열전도해석을 원자로용기에 적용할 필요가 있다. 따라서 보다 신뢰성있는 원자로용기 온도분포 해석결과를 얻기 위해서 COMMIX 코드에 의한 해석결과를 바탕으로 원자로용기 내부열전도해석을 수행하였다. 원자로용기 내부에 가해지는 열전달 경계조건은 COMMIX 결과를 이용하고, 원자로용기의 외부에서 방출되는 열전달 경계조건은 PSDRS(Passive Decay Heat Removal System) 간이모형을 이용하였다. 이 논문에서는 먼저 열저항개념을 이용한 열전도해석프로그램과 해석대상을 소개하고, 다음으로 헬륨공간의 복사열전달과 PSDRS 간이모형를 설명한 후, 마지막으로 계산결과에 대해 기술하기로 한다.

2. 열저항개념을 이용한 열전도해석 프로그램

해석대상에 관한 그림은 아래 그림 1에 있다. 그림에서 오른쪽 점선은 원자로용기의 중심이고, 원자로용기는 소듐을 담고있고, 소듐 고온면과 Insulation Plate 사이에는 헬륨으로 채워져 있다. 격납용기는 원자로용기의 파손에 대비하여 원자로용기 외부에 설치되어 있고 그 사이에는 알곤가스로 채워져 있다. 격납용기와 Air Separator 사이에는 공기가 흐르며 원자로용기에서 방출되는 열을 제거하며, 사고시에는 피동안전잔열제거(PSDRS) 기능을 수행한다. 그림에서 원자로용기의 아래에서 저온면까지는 소듐과 직접 접촉하여 대류열전달이 이루어지고, 그 위로는 복사에 의한 복사열전달이 형성된다.

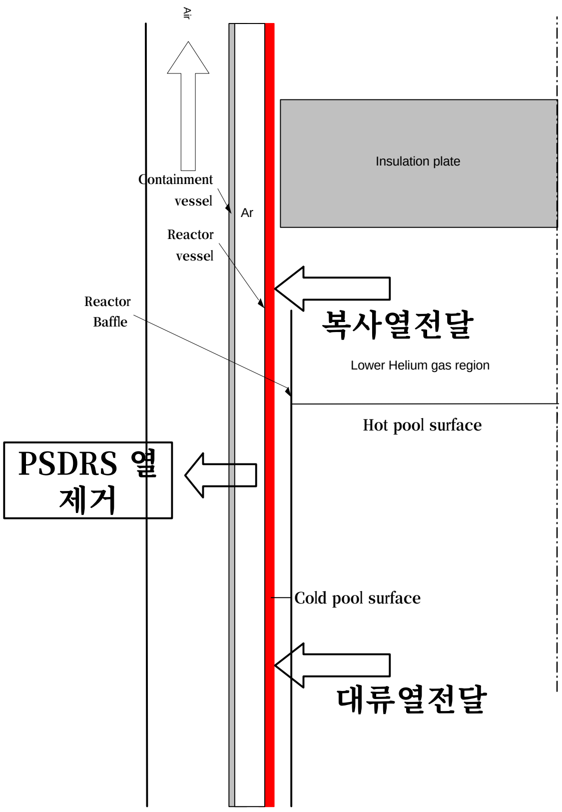

그림 1. 2 차원 열전도해석영역

원자로용기의 온도분포를 구하기 위하여 주어진 교점과 인접교점사이의 열전달에 대해 열저항개념을 적용하였다. 주어진 교점에 대한 에너지평형에서 정상상태시에 주어진 교점 i 로 들어가는 열전달은 0 이 되어야 한다. 즉

$$q_i + \sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} = 0$$

윗 식에서 q_i 는 열원이나 복사열 등으로 인하여 교점 i 로 들어가는 열량이고, R_{ij} 는 대류경계조건이나 물체의 내부에서 일어나는 열전도 등의 열저항을 나타낸다. 복사열전달에 의한 열전달은 복사포텐셜차를 표면저항과 공간저항의 합으로 나눈 값이다. 즉 표면 1 에서 표면 2 에 도달하는 에너지양은

$$q_{radiation} = \frac{s\,(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(1-e_1)}{e_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{(1-e_2)}{e_2 A_2}}$$

이다. 무한평판의 경우 $F_{12}=1$, $A_1=A_2$, $\varepsilon_1=\varepsilon_2$ 이면, 이 식은

$$q_{radiation} = \frac{s\,(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(2-e\ )}{e\ \ A}}$$

대류경계조건에 의한 열전달은

$$q_{convection} = \frac{(T_1 - T_2)}{h\ \Delta y}$$

물체의 내부에서 일어나는 열전도에 의한 열전달은

$$q_{conduction} = \frac{k\,\Delta y (T_1 - T_2)}{\Delta x}$$

원자로용기에 주어지는 열유입측 경계조건은 COMMIX 해석결과에서 생산된 원자로용기 인접유체의 온도와 대류열전달계수로 주어지는 대류경계조건과 헬륨공간의 복사열전달결과로 주어지는 Heat Flux 를 적용하고, 열제거측 경계조건은 PSDRS 간이모형을 적용하였다.

3. 헬륨공간의 복사열전달

고온면과 Insulation Plate 사이에서 이루어지는 복사열전달은 소듐 고온면, Insulation Plate, Reactor Baffle, 원자로용기 등 4 면 사이의 복사열교환이 이루어진다.

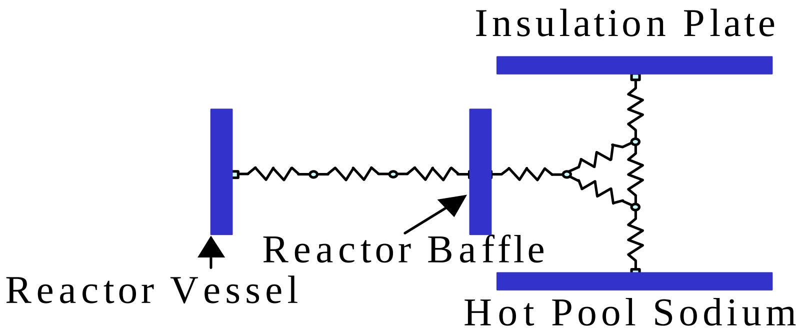

그림 2. **헬륨공간의 복사에너지 전달 경로**

고온면과 Insulation Plate **사이에서 이루어지는 복사열전달은 소듐 고온면**, Insulation Plate, Reactor Baffle, **원자로용기 등** 4 **면 사이의 복사열교환이 이루어진다**. **그림** 2 **의 헬륨공간 상에서 이루어지는 복사열전달 현상의 복사열전달 에너지평형식은 다음과 같다.**

$$q''_{bottom} = \frac{e_b}{1-e_b}\left(s T_b^4 - J_b\right) = J_b - F_{bb}J_b - F_{bt}J_t - F_{b1}J_1 - F_{b2}J_2$$

$$-q''_{air} = \frac{e_t}{1-e_t}\left(s T_t^4 - J_t\right) = J_t - F_{tt}J_t - F_{tb}J_b - F_{t1}J_1 - F_{t2}J_2$$

$$-q''_1 = \frac{e_1}{1-e_1}\left(s T_1^4 - J_1\right) = J_1 - F_{11}J_1 - F_{1t}J_t - F_{1b}J_b - F_{12}J_2$$

$$-q''_2 = \frac{e_2}{1-e_2}\left(s T_2^4 - J_2\right) = J_2 - F_{22}J_2 - F_{2t}J_t - F_{2b}J_b - F_{21}J_1$$

$$q''_{air} = U_T\left(T_t - T_{air}\right)$$

$$q''_1 \ or \ q''_R = Q_{PSDRS} = f(\overline{T}_{RVe}, \overline{T}_{air})$$

$$q''_2 = q''_R$$

$$-q_R^{"} = \frac{e_2}{2-e_2}\left(sT_R^4 - sT_2^4\right)$$

여기서 첨자 b는 소듐 고온풀 표면을, 첨자 t는 Insulation Plate를, 첨자 1은 Reactor Baffle 위의 원자로용기를, 첨자 2는 Reactor Baffle과 인접한 원자로용기를 나타낸다. 첨자 R은 Reactor Baffle을 나타낸다. U_T는 Insulation Plate에서 상부로 방출되는 열전달경로의 Overall heat transfer coefficient이다. F는 네 면사이에서 이루어지는 View Factor이고, J는 각 복사면의 Radiosity이다.

4. PSDRS 간이모형

PSDRS 간이모형은 원자로용기의 평균온도에 의해 결정되며, 공기측 평균온도와 공기측 입구온도의 함수로 제안된 식이다. PSDRS의 열제거량에 관한 상관식은 원자로용기 외벽의 평균온도 $\overline{T}_{RV}$와 계통의 열이 최종적으로 제거되는 공기유로의 온도 T_{air}에 좌우되므로 $Q_{PSDRS} = f\left(\overline{T}_{RV}, T_{air,in}\right)$ 혹은 $Q_{PSDRS} = f\left(\overline{T}_{RV}, \overline{T}_{air}\right)$의 형태로 표시될 수 있다. 공기 유로의 온도 $T_{air,in}$, $\overline{T}_{air}$는 각각 공기유로의 입구 온도인 40°C와 공기유로의 평균온도를 뜻한다. 상관식 개발을 위해 본 분석에서는 원자로 정지후의 노심 붕괴열의 값을 0.5MW에서 5.0MW까지 증가시키며 계산을 수행하였으며, 각각의 경우에 대하여 $\overline{T}_{RV}$와 공기유로 입구온도 온도차를 ΔT_1로, $\overline{T}_{RV}$와 공기유로의 평균온도 온도차를 ΔT_2로 정의하였다. 전열저항은 $R = \Delta T / Q_{PSDRS}$가 되므로 PSDRS에 의한 열제거량은 $Q_{PSDRS} = \Delta T / R$로 표현된다. 계통의 작동 온도범위인 원자로 외벽온도범위인 (300°C < $\overline{T}_{RV}$ < 600°C)사이의 값에 대하여 열제거량 상관식은 선형 Fitting과 3차 Fitting에 의한 상관식으로 나타낼 수 있다. 상관식은 공기측 입구온도를 사용한 경우와 평균온도를 사용한 경우 모두 1차식에서는 계통 온도범위(300°C< $\overline{T}_{RV}$ < 600°C)내에서 ±5%의 오차를 나타내며, 3차식의 경우에는 ±0.5% 이내의 결과를 가진다. 상관식은 다음과 같다.

1) 공기측 입구온도를 사용한 경우: $\Delta T_1 = \overline{T}_{RV} - T_{air,in}$

1차 Fitting :

$$Q = \frac{(\overline{T}_{Rve} - T_{air,in})}{429.2562 - 0.48697 \cdot (\overline{T}_{Rve} - T_{air,in})}$$

3 차 Fitting :

$$Q = \frac{(\overline{T}_{Rve} - T_{air,in})}{794.4495 - 2.64228 \cdot (\overline{T}_{Rve} - T_{air,in}) + 0.00388 \cdot (\overline{T}_{Rve} - T_{air,in})^2 - 2.08 \times 10^{-6} \cdot (\overline{T}_{Rve} - T_{air,in})^3}$$

2) **공기측 평균온도를 사용한 경우**: $\Delta T_2 = \overline{T}_{RV} - \overline{T}_{air}$

1 차 Fitting :

$$Q = \frac{(\overline{T}_{Rve} - \overline{T}_{air})}{402.0099 - 0.54609 \cdot (\overline{T}_{Rve} - \overline{T}_{air})}$$

3 차 Fitting :

$$Q = \frac{(\overline{T}_{Rve} - \overline{T}_{air})}{759.2037 - 2.92107 \cdot (\overline{T}_{Rve} - \overline{T}_{air}) + 0.00482 \cdot (\overline{T}_{Rve} - \overline{T}_{air})^2 - 2.91 \times 10^{-6} \cdot (\overline{T}_{Rve} - \overline{T}_{air})^3}$$

5. 계산결과

정상상태 전출력시의 원자로용기 온도분포 해석결과를 얻기 위해서 원자로용기를 대상으로 2 차원 열전도해석을 수행하였다. 원자로용기 내부에 가해지는 열전달 경계조건은 저온 소듐면 아래영역은 COMMIX 결과를 이용하고, 그 위의 헬륨공간영역은 복사열전달 해석결과를 적용하였다. 원자로용기의 외면에서 방출되는 열전달 경계조건은 PSDRS (Passive Decay Heat Removal System) 간이모형을 이용하였다.

공기측 평균온도를 적용하였을 때 원자로용기 온도분포에 대한 COMMIX 코드의 해석결과와 본 해석의 결과는 그림 3 에 있다. 그림에서 온도구배가 크게 발생하는 고온소듐면과 저온소듐면의 온도가 COMMIX 에 의한 결과보다 매끄러운 것과, reactor baffle 에 의해 복사열전달 차폐가 이루어져 COMMIX 에의한 결과에서는 낮은 온도를 보이는 고온액위면 상단부분의 원자로 용기온도가 COMMIX 에 의한 결과보다 약 40 °C 높은 것을 볼

수 있다

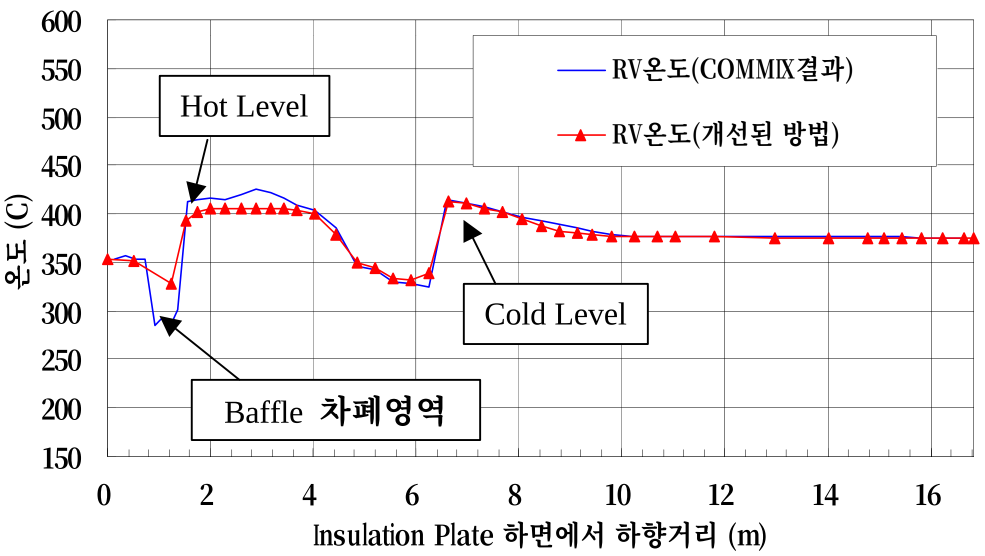

그림 3. 원자로용기 온도분포

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 주관한 원자력 중장기 연구계획의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김의광 외, "TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE REACTOR VESSEL OF KALIMER", ICONE-8, USA, April, 2000

[2] 김의광 외, "Steady-state thermal hydraulic analysis of KALIMER pool," 1998 한국원자력학회 추계학술발표회

[3] 김영균 외, "Flow distribution analysis results of breeder core", KAERI KALIMER 개발팀 내부문서, IOC-CD-005-1999