

## 방사성 금속폐기물 용융반응기의 모사

강석환\*, 강 용\*, 송평섭, 최왕규, 정종현, 오원진

\*충남대학교, 대전광역시 유성구 궁동 220번지

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

kangyong@cnu.ac.kr

방사성 금속폐기물 용융반응기는 고온에서 조작되며, 용융반응이 진행되는 동안 용융상 내부에서 방사성 물질의 기포가 발생하게 되는데, 이 발생된 기포는 분산상으로 용융상의 상부로 상승하게 되므로 용융상 내부에서 분산상의 흐름 거동을 유발하게 된다. 이와 같은 고온의 용융반응기 내부에서 생성되는 방사성 물질의 기포는 분산상의 형태로 상승하므로, 흐름 거동은 용융상인 액체 상태의 단상(one phase)인 균일 반응기(homogeneous reactor)와 비교하여 비균일상 반응기(heterogeneous reactor, multiphase reactor)가 되므로 그 특성이 매우 달라지게 된다. 또한, 방사성 물질이 기포로의 유출이 일어나므로 고온의 방사성 금속 폐기물 용융반응기 내부의 수력학적 특성의 규명은 반응 특성 해석 및 반응기 설계에 필수적인 요소가 된다고 할 수 있다.

하지만, 방사성 금속폐기물 용융반응기를 해석하기 위해서는 고온이며, 특수한 조건의 다상, 불균일 반응기의 해석을 위한 열역학적 해석과 반응 조건, 조작변수, 조작범위 등에 적합한 가정의 도입, 그리고 이와 같은 특성들을 적절히 반영할 수 있는 해석방법의 선정 및 도출이 필수적이며, 우선 되어야만 하는데, 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고온에서 형성되는 반응시스템의 해석에 분산상으로 존재하는 기포의 흐름거동을 고찰한 수력학적 특성을 접목하여 용융제염 반응 특성에 적합한 모사를 할 수 있는 모델 선정과 용융반응기 내부의 열수지(heat balance), 물질수지(mass balance) 및 운동량수지(momentum balance)의 특성을 도입하여 선정된 모델의 안정성과 신뢰성을 검토함으로써 선정된 모델의 검증에 하고자 하였다.

### 열수지

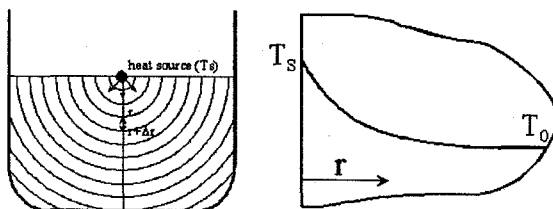


그림 1. 방사성 금속폐기물 용융반응기의 열 흐름

방사성 폐기물 용융반응기에 대한 열수지의 가정은 반구의 중앙에  $T_s$ 의 열원으로 인해  $T_0$ 의 반응 온도가 변하며, 전도에 의한 열전달 방향은  $r$ 로만 전달된다. 또한,  $t=0$ 에서, 온도  $T$ 는 위치  $r$ 만의 함수이다.

위의 가정들을 적용한 용융반응기내에서의 열 흐름을 그림 1에 나타내었다.

구에서의 편미분방정식(partial differential equation)은 아래와 같이 나타낼 수 있으며.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T &= T_0 & \text{at } t=0, & \text{ for all } r \\ T &= T_S & \text{at } r=0, & \text{ for all } t \\ T &\rightarrow T_0 & \text{at } r \rightarrow \infty, & \text{ for all } t \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)의 방정식을 다음과 같이 가정하여 정리하면, 초기조건과 경계조건도 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\begin{aligned} Y &= \frac{T - T_0}{T_S - T_0} & ; \text{ dependent valuable} \\ \eta &= \alpha t / r^2 & ; \text{ independent valuable} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $n$ 는 Fourier 수이다.

$$\frac{d^2 Y}{d\eta^2} - \left( \frac{1}{\eta} + \frac{2}{3} \right) \frac{dY}{d\eta} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} Y &= 0 & \text{at } \eta = 0, & ; r = \infty \\ Y &\rightarrow 0 & \text{at } \eta \rightarrow 0, & ; r \rightarrow \infty \\ Y &= 1 & \text{at } \eta \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)를 초기조건과 경계조건에 대입하여 적분하면 식 (6)의 결과를 얻을 수 있으며, 이로써 시간(t)과 위치(r)의 변화에 따른 온도분포를 얻을 수 있다.

$$\frac{T - T_0}{T_S - T_0} = \frac{\eta}{3\eta^3 + 2} \exp\left(-\frac{1}{2\eta^2} + \frac{2}{3}\eta\right) \quad (6)$$

**물질수지**

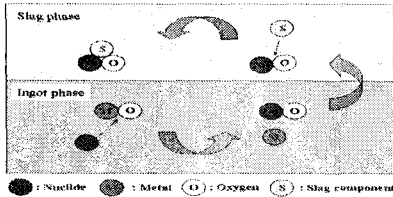


그림 2. 핵종의 슬래그 상으로의 전이

용융반응기에서 핵종의 일부는 그림 2에서의 같이 ingot상에서 slag상으로 전이된다. Ingot상에서의 핵종의 분율( $\epsilon$ )과 무한한 시간에서 핵종의 평형농도( $C_L^*$ ), 그리고 ingot상에서의 물질전달계수( $k_{La}$ ) 등을 이용한 기본 방정식과 초기조건은 식 (7)과 (8)으로 나타낼 수 있다.

$$(1 - \epsilon) \frac{dC_L}{dt} = k_{La} (C_L^* - C_L) \quad (7)$$

$$t = 0, \quad C_L = C_{L0} \quad (8)$$

$$t = \infty, \quad C_L = C_L^*$$

위의 식을 적분하면 식 (9)를 얻을 수 있는데, 이 식으로부터 ingot상에서 시간의 변화에 따라 핵종의 농도 변화의 양상을 얻을 수 있다.

$$\frac{C_L}{C_L^*} = 1 - \exp\left(-\frac{k_{La}}{1 - \epsilon} t\right) \quad (9)$$