

## 산소분산공정에서 산소-공용염 이상흐름특성

조용준, 이한수, 김인태

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

[chovi@kaeri.re.kr](mailto:chovi@kaeri.re.kr)

### 1. 서론

고온의 용융염을 액상으로 이용하는 공정 중의 하나로 사용 후 핵연료의 pyroprocessing 공정에서 발생하는 공용염(LiCl-KCl) 폐기물 처리공정이 있다. Pyroprocessing 공정은 고온의 용융염내에서 수행되어지며 전기적인 방법을 이용하여 사용 후 핵연료 내에 포함되어 있는 U 및 TRU 핵종을 회수하는 기술이다. Pyroprocessing공정에서는 희토류핵종 등을 포함하고 있는 공용염 폐기물이 발생하는데 이러한 폐기물들은 모두 안정한 형태로 고화 처리된 후 최종 처분되어야 한다. 따라서 pyroprocessing에서 발생하는 공용염 폐기물 내에 포함되어 있는 핵종들만을 분리/회수하여 최종처분하고 정제된 염은 재활용한다면 전체적인 pyroprocessing 공정의 운전성을 크게 향상 시킬 수 있게 된다. 공용염폐기물내 존재하는 핵종은 주로 희토류염화물로 이러한 희토류염화물 제거를 위해 산소분산 공정이 이용되고 있다. 산소분산공정은 공용염폐기물내 산소를 주입하여 희토류염화물을 공용염에 불용성인 산화물로 전환시킨 후 침전에 의하여 분리하는 기술이다. 산소분산 방법에 의한 희토류 산화/침전반응은 기상(산소)-액상(공용염)의 이상(two-phase)흐름(그림-1)에서 이루어지는데 이러한 이상공정에서 최적분산유량을 구하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 기상유속이 증가함에 따라서 전체적인 흐름형태는 균일흐름영역에서 불균일 흐름영역(slug 또는 plug flow)으로 변하게 되는데 만약 본 산화반응이 이러한 slow flow에서 운전된다면 산화공정의 효율이 떨어질 뿐만 아니라 산화 공정중에 반응으로 생성된 희토류 침전물과 염이 slug와 함께 공용염층에서 유출되어 가스 배출관에 침적되어 공정이 중단될 수 있으므로 산화/침전 반응은 반드시 dispersed bubble flow 영역에서 수행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 산소-공용염계의 흐름특성을 파악하여 최적 산소유량을 실험적으로 도출하고자 하였다.

### 2. 실험 및 결과

일반적으로 다상흐름공정에서 흐름영역은 기체체류량을 통해서 파악할 수 있는데 본 연구에서는 lab-scale 산화/침전 장치에서 산소유량에 따른 흐름특성을 파악하여 최적 산소분산유량을 도출하기 위하여 압력강하법(pressure drop method)를 이용하여 기체체류량을 구하고 이를 drift flux model을 이용하여 해석하였다. 압력강하법은 일정한 축방향 높이(ΔL)에서 발생하는 압력차(ΔP)를 측정하고 이를 다음의 식에 넣어 기상의 체류량을 구한다. 여기서 ρ는 공용염의 점도, g는 기체상수 이다.

$$\text{기체체류량} = \frac{\Delta P}{\Delta L g} - \rho_L \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho_G - \rho_L$$

산소유량 및 공용염온도에 따른 압력은 공용염층내에 15cm 간격으로 두 개의 수직 SUS관을 삽입한 후 끝부분을 차압센서(CP2000, -2,000~+2,000 mBar)에 연결하였으며 차압센서에서 나오는 압력의 volt 신호는 data acquisition system(Daq/3000, DasyLab)을 이용하여 컴퓨터에 저장한 후 해석하였다. 이때 압력신호는 200 Hz의 속도로 15초간 측정하였다. 그림-2에 얻어진 압력신호와 이를 식(1)에 적용하여 유도된 산소체류량 요동을 나타내었다. 특정 조건에서 산소체류량은 산소체류량 요동의 평균값을 구하여 사용하였다.

실험결과 얻어진 기체체류량 값을 그림-3에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 기체체류량은 산소유량이 증가함에 따라서 증가하였고 온도가 증가함에 따라서 약간 증가하는것을 알 수 있는데 이는 온도가 증가함에 따라서 공용염의 물성(표면장력, 점도등)이 변하기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 기체체류량의 기울기를 가지고 흐름영역이 변하는 유속을 판별하게 되는데 본 연구에서는 좀더 정밀한 흐름영역을 파악하고자 기체체류량 값을 drift flux model에 적용하였다. Drift flux는 식(2)를 이용해서 구할 수 있으며 구해진 drift flux를 기체체류량과 X-Y 좌표에 plot하면 기울기가 변하는 기체체류

량에서 흐름영역의 전이점을 찾을 수 있다.

$$\text{Drift flux}(J)=Ug(1-\epsilon_g) \quad \dots \dots \dots (2)$$

그림-4에 산소체류량과 식(22)를 이용하여 계산한 drift flux를 도시한 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 산소체류량이 증가함에 따라서 전 온도범위에서 drift flux의 기울기가 0.1이하와 0.12이상에서 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이러한 기울기 증가율의 변화로부터 0.1이하의 체류량 조건에서는 균일흐름영역이 형성되고 0.12 이상의 산소체류량 범위에서는 불균일 흐름영역이 형성된다는 것을 예측할 수 있다. 그림-4를 통해 약 4-5 l/min의 산소유량 범위에서 0.12이하의 산소체류량이 나타나므로 lab-scale 산화/침전 장치에서 균일흐름이 형성되는 산소유량 범위는 5 l/min 이하임을 알 수 있고 이러한 유속범위를 산화공정의 적정 산소유량 조건을 설정할 수 있었다.

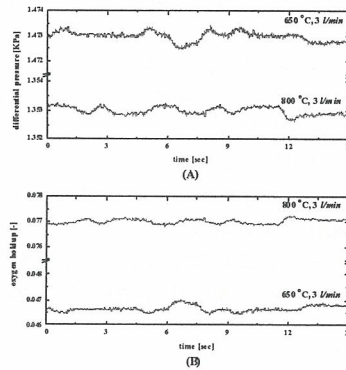
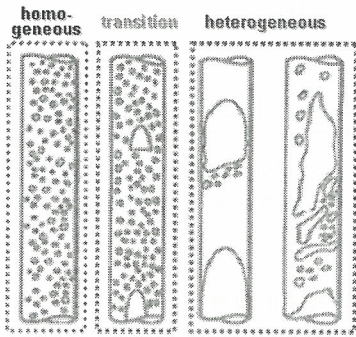


그림 1. 이상계(two-phase system)에서 기상유속에 따른 흐름특성

그림 2. 압력요동 및 산소체류량요동의 예

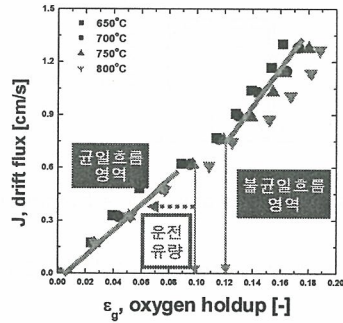
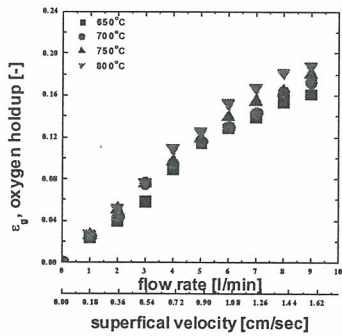


그림 3. 산소유량 및 공융염온도가 산소 체류량에 미치는 영향

그림 4. Lab-scale 산화/침전 장치에서 흐름영역특성