

공기 유량의 시간 변화에 따른  $U_3O_8$  타원입자에 대한 거동 특성 해석

김영환, 정재후, 이효직, 박병석, 윤지섭  
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045  
 yhkim3@kaeri.re.kr

## Abstract

ACP(Advanced Spent Fuel Conditioning Process)의 금속전환로에  $U_3O_8$ 을 공급하기 위하여 20 kgHM/batch의  $UO_2$  펠릿(pellets)을 처리할 수 있는 건식분말화 장치가 개발되고 있다. 건식분말화 장치는 500 °C 온도에서 공기를 공급하여 일정한 입도범위의 균질한  $U_3O_8$ 을 만든다. 이런 건식 분말화 장치의 효율을 높이기 위해서는 반응로에 불어 넣어주는 공기의 유량을 증가시킬 필요가 있다. 하지만 공기와 반응하여 생성되는  $U_3O_8$  입자는 그 크기가 최소 3  $\mu m$  정도로 매우 미세하여, 반응로 출구를 통해 외부로 빠져나갈 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 분말화 장치 출구 바깥에는 필터가 설치되어 있으나 공기와 함께  $U_3O_8$  입자가 계속해서 빠져나갈 경우 입자로 인해 필터가 막혀 제 기능을 할 수 없게 된다. 따라서 건식 분말화 장치는 미세한  $U_3O_8$  입자가 반응로 밖으로 빠져나가지 않도록 입구에서의 공기 유량을 일정 수준 이하로 조절해주는 것이 필요하다. 이 연구의 목적은 초기 유량으로부터 유량을 점점 증가시키면서 시간변화에 따른 입자 거동 특성을 해석하며, 결과로부터 주어진 크기의 타원입자에 대해 최대 허용 공기 유량을 결정하고자한다. 이 해석을 위해 유동과 입자를 동시에 해석할 수 있는 ANSYS-CFX 5.7.1과 ANSYS-CFX 10.0 두 가지의 소프트웨어가 사용되었다. 해석 결과를 바탕으로 좀더 정확한 유량 한계치 계산을 위해 추가로 수행되어야 할 해석에 대해 제안하였다.

## 1. 구형이 아닌 입자에 대한 적용

입자가 연속체 속을 지난다고 생각할 때, 입자의 가속에 영향을 주는 외부에서 가해지는 힘은 입자와 유체의 속도 차이 그리고 입자에 의한 유체의 변형에 의해 발생한다. 그러한 입자의 거동 방정식은 Basset, Boussinesq, 그리고 Oseen에 의해 유도되었다. 구형이 아닌 입자에 대한 drag force는 입자의 거동 방정식의 첫 번째 항에 cross sectional area factor가 곱해진 값으로 표시된다. 이 factor는 열전달이나 물질전달 상관식에서 사용되는 surface area factor와 유사하다. 식 1은 구형이 아닌 입자에 적용되는 equivalent diameter 이다. 여기서  $m_p$ 는 입자의 질량,  $d$ 는 입자의 지름,  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 입자를 뜻한다.

$$d = \left( \frac{6m_p}{\pi\rho_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

2. 지름 3  $\mu m$  타원형 입자에 대한 transient 해석 결과

가장 크기가 작은 3  $\mu m$ 의 타원형 입자에 대한 transient 해석을 수행하였다. 해석은 초기 공기 유량을 0 kg/s에서 0.0018 kg/s까지 100초 동안 천천히 증가시키는 조건을 적용하였다. 이전 연구의 steady 해석에서와 마찬가지로 1초 동안 입구에서 공기와 함께 반응로 내로 삽입되는  $U_3O_8$  입자의 개수는 10개이다. 해석 결과는 1초마다 추출하여, 유량 허용치를 계산하는데 사용하였다. 그림 1~그림 6은 3  $\mu m$  타원형 입자에 대한 transient 해석 결과이다. 그림 1~그림 3에서 볼 수 있듯이, 입구에서의 공기 유량이 적은 해석 초기에는 입자들이 입구 근처에서 더 이상 상승하지 못한다. 하지만 유량을 증가시키기에 따라 입자는 점점 상승하여, 해석시간 91초(입구 공기 유량 = 0.001638 kg/s)에는 출구에 거의 다다르며, 해석시간 92초(입구 공기 유량 = 0.001656 kg/s)에는 입자가 반응로 출구 밖으로 빠져나가는 것을 그림에서 확인할 수 있다. 해석시간 91~92초에서 입자가 빠져나가기 시작했다고 해서, 그 시점을 한계유량으로 파악하긴 힘들다. 이유는 처음 빠져나가기 시작한 입자가 반응로 내를 이동해 온 시간을 고려해야 하기 때문이다. 처음 빠져나간 시점에서의 입자가 그 지점까지 이동하는데 걸린 시간은 10초 정도이다.

입자에 비해, 공기의 속도가 더 빠른 것을 고려할 때, 입자가 빠져나가는 시점에서 출구에서의 공기는 입자가 입구에서 삽입될 때와 같이 들어온 공기보다 더 이후에 반응로 내로 유입된 공기일 것이다. 여기서 입자가 출구로 빠져나가는 시점에 입자에 영향을 주는 공기는 입자가 삽입된 지 2초 후의 공기라고 결론지었다. 따라서 입자가 삽입된 후 2초 후의 공기유량이 이 입자에 대한 유량 한계치라고 볼 수 있다. 그 값은 해석시간 84초 일 때이며, 공기유량이 0.001512 kg/s 일 때이다. 이 값은 근사치이며, 공기의 유량이 시간에 따라 계속해서 증가하는 것을 고려할 때, 유량 한계치는 미세하게 더 큰 값을 가진다고 볼 수 있다.

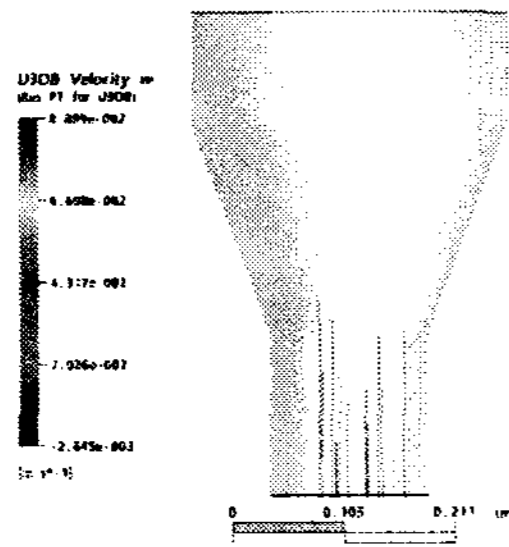


그림 1 해석시간 30초(입구 공기 유량 = 0.00054 kg/s) 때 입자의 거동특성

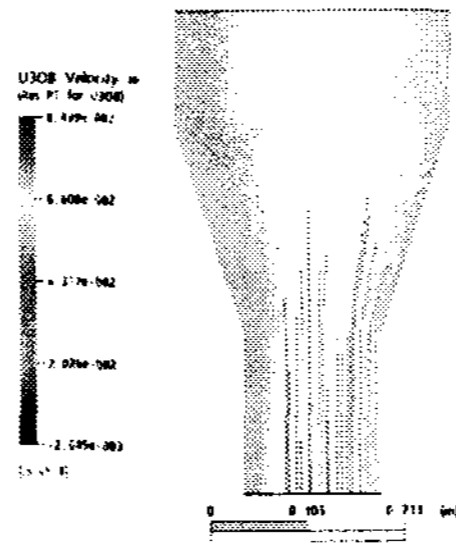


그림 2 해석시간 50초(입구 공기 유량 = 0.0009 kg/s) 때 입자의 거동특성

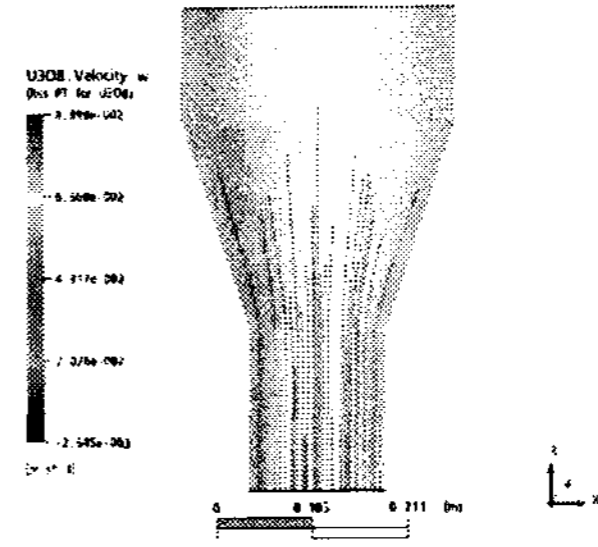


그림 3 해석시간 70초(입구 공기 유량 = 0.00126 kg/s) 때 입자의 거동특성

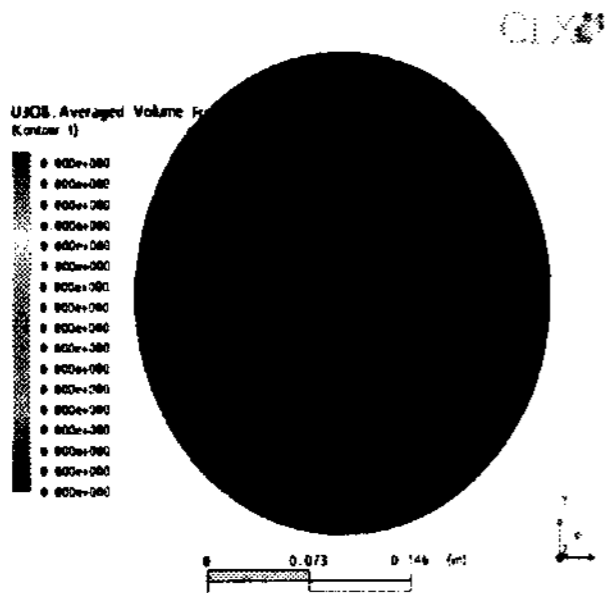


그림 4 해석시간 91초(입구 공기 유량 = 0.001638 kg/s) 때 출구에서의 입자 volume fraction

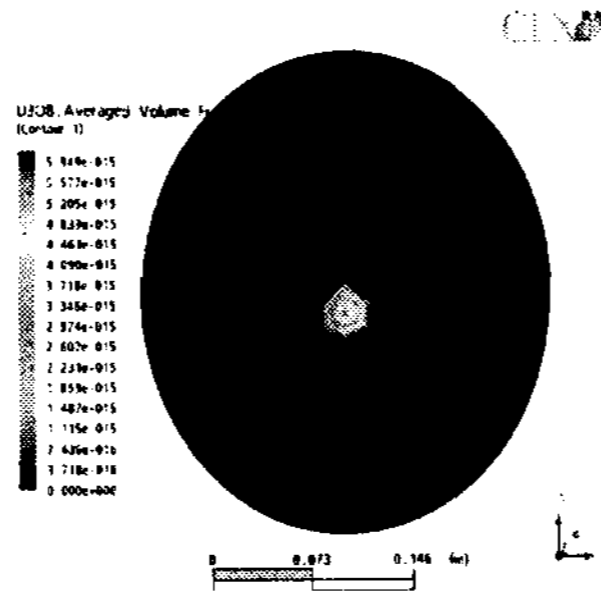


그림 5 해석시간 92초(입구 공기 유량 = 0.001656 kg/s) 때 출구에서의 입자 volume fraction

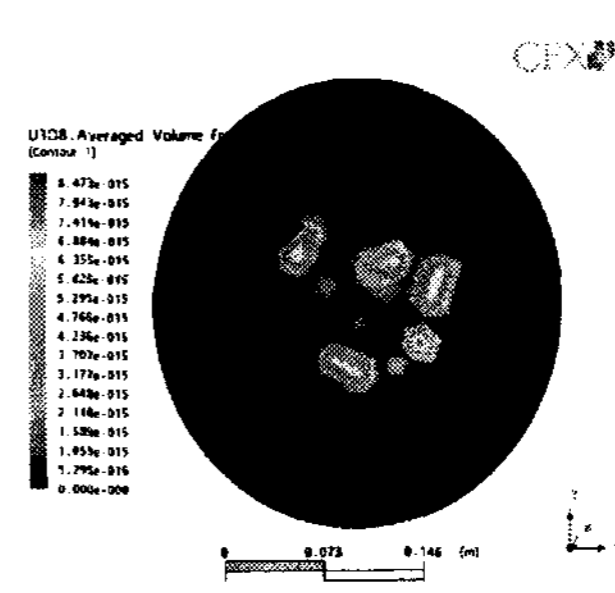


그림 6 해석시간 100초(입구 공기 유량 = 0.0018 kg/s) 때 출구에서의 입자 volume fraction

### 결 과

3  $\mu\text{m}$ 인 타원형  $\text{U}_3\text{O}_8$  입자의 시간변화에 대해 각각 transient 해석을 수행하였다. 해석결과 입자거동특성을 분석하여, 입자가 vol-oxidizer 반응로 바깥으로 빠져나가지 않을 유량 한계치의 범위를 도출하였다. 타원형 입자에 대한 이전의 steady state 해석 결과, 3  $\mu\text{m}$  입자에 대한 유량 허용치는 0.0015 kg/s 0.00155 kg/s 범위 안에 있는 것으로 예측되었다. transient 해석 결과, 유량 허용치는 0.001512 kg/s 이므로, 이 범위 안에 들며, steady 해석 결과와 잘 일치한다고 볼 수 있다. 시간에 따른 공기 유량 증가에 의한 약간의 증가분을 고려한다고 해도, steady 해석에서 예측된 결과에서 벗어나지 않을 것으로 보인다. 또한 그 값은 steady 해석에서 예측한 유량 한계치 범위 내에서 결정되었으며, 따라서 steady 해석과 transient 해석 사이의 결과 타당성이 존재한다고 볼 수 있다. 추가적으로 반응로 내에서의 유량 한계치를 좀 더 정확히 예측하기 위해서는 하나의 입자 크기에 대한 해석이 아닌 다양한 크기의 입자가 존재하고, 각 입자가 실제 실험 조건과 같은 개수 밀도 분포를 가지는 조건하에서의 해석이 수행되어야 할 것이다.