

아르곤 분위기에서 카드뮴 상변화 모사

김광락, 김경량, 정재후, 김택진, 김가영, 심준보, 김시형, 백승우, 김지용, 윤달성, 박대엽, 안도희
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
krkiml@kaeri.re.kr

1. 서론

사용후핵연료의 부피감용기술의 대안으로 부각되는 건식화학공정에서는 용융염 전해공정이 주목을 이루고 있다. 악티늄족 원소들의 효율적인 전해 구분리를 위해 용융카드뮴 음극의 사용이 우수한 전해 특성을 나타낸다. 음극 전극체로써의 카드뮴은 열역학적으로 미소한 활성도 계수의 환경을 제공하여 환원상태의 활성도를 낮게 한다. 따라서 공융염에 존재하는 사용후핵연료 금속염의 환원전위가 비슷하게 되어 공전착회수의 가능성이 매우 높아지게 되므로 핵확산저항성을 나타낸다.

이러한 전극물질로써 장점이 있는 용융카드뮴 음극체는 대기압에서 용점이 320℃ 정도로, 상대적으로 사용후핵연료 구성성분의 증금속보다 낮기 때문에 감압 증류조작에 의해 쉽게 전착물을 분리시킬 수 있다 [1]. 액체음극 후처리 장치는 용융염 전기화학 반응기에서 음극체로 사용된 용융카드뮴중 금속간화합물로 혼재하는 전착물을 분리하기 위한 목적으로 카드뮴과 일부 잔류 공융염(LiCl-KCl)을 휘발시켜 용융점이 높은 전착물로부터 분리하고, 휘발된 카드뮴과 공융염은 응축시켜 재활용이 가능한 형태로 회수하기 위한 장치이다.

증류기 내에서 열용량과 용융열이 작은 열적 물성을 갖는 카드뮴은 증발 및 응축거동이 주변 온도에 민감하게 작용하여 장치 내부에 쉽게 침적되는 특성을 나타낸다. 따라서 최적의 회수조건을 나타내는 온도환경을 예측하는 것이 중요하다 [2].

본 연구에서는 증류기내 증발부 및 응축부가 상하로 배치된 직립형카드뮴 증류장치 구성에서, 외부와의 단열조건을 가정하고 다상 물질전달 모델에 의한 증발 및 응축현상을 모사하였다.

2. 본론

2.1 이론

비균질 다상(Multiphase) 유동모델을 사용하고, 경계면 전달모델로는 입자모델을 사용하였다. 모멘텀 전달항에서 항력을 구하기 위한 모델로는

Schiller-Naumann 상관식을 사용하였다.

$$C_W = \frac{24}{Re_{cd}} (1 + 0.150 Re_{cd}^{0.687}) \quad (1)$$

이 상관식은 낮은 입자 Reynolds 수의 조건에서 구형 액적모형에 적용될 수 있다. 계산을 위한 모델로 Thermal phase change 모델을 적용하였다.

기상과 액적간의 열 및 물질전달 현상은 기체 확산율은 정체유동 조건을 가정하여 Schdmit 수와 Reynolds 수에 의존하는 Ranz-Marshall 상관식을 사용하였다.

$$Nu = 2 + 0.6 Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (2)$$

여기에서, 액적은 동일한 밀도, 반경, 속도, 온도를 가지는 액체입자들의 군으로 모사된다. 액적은 구의 형상이며, 액적내부의 온도는 균일하다고 가정하였다. 액적은 주위의 증기와 에너지 교환을 하게 된다. 분산된 액적은 주위의 증기 상태로 있는 증발물질의 온도와 압력에 따라 상변화가 발생하게 된다.

2.2 모델링

카드뮴 증류기내 증발부 및 응축부가 상하로 배치된 직립형 카드뮴 증류장치 구성을 대상으로 하였다. 유동 도메인은 전단력에 민감한 연속체를 가정하여 k-ε 난류모델을 사용하고, 증류기 내부에 비응축성의 아르곤 기체 및 카드뮴 증기 2성분계 영역에다 카드뮴 액적이 분산되는 모델을 설정하였다. 아르곤의 정체유동 분위기에서 카드뮴 증기 확산의 영향이 물질전달에 영향을 미치게 되므로 전달방정식을 사용하였다.

2.3 경계조건

본 해석에서 유동장은 고온의 증기가 상변화를 수반하기 때문에, 압력과 온도에 의해 물질의 상태를 결정할 수 있는 Redlich-Kwong 상태방정식 물질그룹을 가정하여 사용하였다. 이 상태방정식

은 유체의 임계압력과 온도만으로 물질의 상태를 정의할 수 있기 때문에 본 연구의 유동해석을 수행하는데 적합하게 사용될 수 있다.

2.4 결과 및 토론

본 연구의 해석대상으로 증발부 및 응축부로 구성된 직립형 카드뮴 증류기를 선택하였다. 카드뮴 증류시스템은 Fig. 1과같이 구성되었으며, 100 Torr 및 500°C의 분위기에서 카드뮴의 증기상 물분율을 도식화하였다. 이것은 상부 증발부 경계면에서 일정한 속도로 액적이 생성되는 질량속을 부여하고 그리고 하부 응축부 경계면에서는 액적이 싱크되어 소멸되는 동일한 질량속을 가정하였다. 본 연구에서는 증류기 내부에서 비응축성 아르곤 기체 분위기에서 카드뮴 증기가 확산되어 이동되는 거동을 수치해석을 통하여 고찰하였다.

본 연구에서는 카드뮴 증기의 열적 및 유동학적 물성자료를 가정하여 사용했기 때문에 신뢰성 있는 시스템 해석을 위해 정확한 자료기반이 뒷받침되어야 할 것이다.

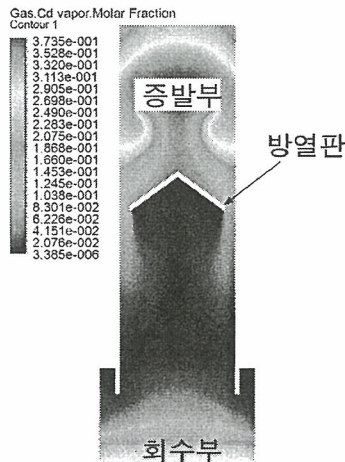


Fig. 1. Cadmium vapor distribution (molar fraction).

3. 결론

아르곤 분위기에서 카드뮴의 상변화가 일어나는 고온 증류기 모형을 대상으로 CFD 기반에서 다상 물질전달 모델을 커플링하는 방법을 제시하고, 카드뮴의 증기-액적 상변화거동의 전산모형을 마련하였다. 수립된 모델로써 카드뮴 상변화 거동을 해석할 수 있었다.

4. 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

5. 참고문헌

- [1] T. Kato et. al., "Distillation of cadmium from uranium-plutonium-cadmium alloy," Journal of Nuclear Materials, Vol.340, pp.259 - 265 (2005).
- [2] B. R. Westphal et. al., "Engineering-scale distillation of cadmium for actinide recovery," Journal of Alloys and Compounds, Vol.444-445, pp.561-564 (2007).