

다성분계 금속진공증류 모델링

정홍석, 심명화, 권상운, 심준보, 김시형, 백승우, 김광락, 안도희
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045 (덕진동150-1)
hschung1@kaeri.kr

세계적으로 에너지 수요는 점차 증대되고 있는 반면에 기후변화를 초래하는 이산화탄소의 배출 저감화에 대한 요구는 점차 강화되고 있는 실정이다. 현재 원자력에너지는 이산화탄소를 배출하지 않고, 경제적으로 에너지를 생산할 수 있는 대안이며, 미래에도 국가에너지원으로 주요 역할을 담당할 것으로 전망된다. 그러나 원자력 발전의 확대에 따라 부산물로 발생하는 사용후핵연료 양의 기하급수적 증가와 수십만 년 동안의 높은 방사능은 원자력에너지 이용확대에 가장 큰 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 따라서 사용후핵연료를 포함한 처분대상 고준위폐기물의 부피를 획기적으로 감축시켜 처분의 안전성 및 경제성 향상은 물론, 우라늄 자원의 활용 극대화를 통한 환경친화성 및 에너지 자립도 제고에 기여할 수 있는 차세대 핵연료주기 기술의 확립이 시급히 요망된다. 차세대 핵연료주기 기술은 Gen IV 원자로 시스템과 연계하여 사용후핵연료에 함유된 장수명 핵종군을 회수함으로써 고준위 처분장의 처분 부담 과 환경감시 기간을 획기적으로 줄여 주고, 사용후핵연료의 관리 비용 등 원자력에너지 이용 경제성을 크게 향상시킨다. Pyroprocess를 이용하여 사용후핵연료로부터 TRU를 회수하여 GEN-IV 원자로에 순환시키는 경우 처분장 관리기간이 획기적으로 감축된다. 전해제련과 관련하여 용융염중의 U와 Pu를 액체Cd 음극으로 전착시키는 연구와 제조된 U-Pu-Cd alloy로부터 Cd를 증발시켜 U-Pu alloy를 얻는 연구는 TRU를 회수하여 GEN-IV 원자로에 순환시킬 때 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 다성분계 금속진공증류 모델을 설정하고 다성분계 금속증류 자료를 입력하여 모델의 유용성을 분석하였다. 향후 본 연구는 정밀한 다성분계 열역학적 물성을 보완하고 실험 검증을 거쳐, 궁극적으로는 GEN-IV 원자로급 금속연료공정에 활용될 것이 기대된다.

- 모델식 및 적용

본 연구에서는 다음과 같이 금속진공증류공정의 금속증류속도 산출에 유용한 Langmuir 식을 사용하였다.[2-5]

$$dw/dt = 0.0583 (1-a) P_i \text{ SQRT}(M_i/T)$$

여기서, a 는 재용결계수, M_i 는 금속원자량, T 는 온도(K)이다.

금속증기의 분압 $P_i = Y_i x_i P_i^0 / \phi$ 이며, ϕ 는 fugacity계수, Y_i 는 활성도계수, x_i 는 액상물분율이다. 순수금속의 증기압 P_i^0 는 van Laar 식에서 계산한다.

본 연구에서는 Akaoka 등[1]이 사용한 5성분계 (Zn, Mg, Al, Cu, Cr) 두랄류민 합금 자료 중, 특히 Zn, Mg의 증류 거동을 모델식으로 모사하여 프로그램의 유용성을 확인하였다. 그림1은 단계적으로 증발조를 승온 시켰을 때, 온도 500K-1000K에서의 누적 증발량을 나타낸다. Zn는 606K에서 증발을 시작하여 764K 정도에서 99.5% 이상 증발이 종료됨을 알 수 있다. Mg은 729K에서 증발을 시작하여 906K 정도에서 99.5% 이상 증발이 종료됨을 알 수 있다. 730K에서는 99.9% 순도의 Zn를 회수할 수 있음을 알 수 있다. 고순도의 Mg을 얻을 수 있는 온도는 예로 730K 이상의 온도에서 시작하여 906K의 온도까지의 응축 금속은 순도가 99.95%가 될 것이다.

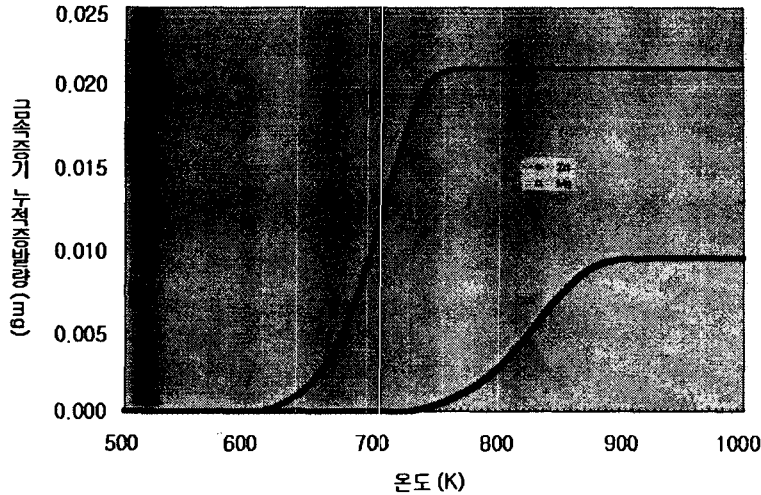


그림1. 가열 온도에 따른 금속증기(Zn, Mg)의 누적 증발량

- 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 Akaoka 등[1]이 사용한 5성분계(Zn, Mg, Al, Cu, Cr) 두랄류민 합금 자료 중, 특히 Zn, Mg의 증류 거동을 모델식으로 모사하여 프로그램의 유용성을 확인하였으며, 그 내용은 다음에 기술한 바와 같다.

. Langmuir 금속진공증류공정을 이용하여 다성분계 금속을 시차적으로 증류함으로써 불순금속 정제가 가능함을 확인하였다.

. 본 연구는 향후 Cd를 증발시켜 U-Pu alloy를 얻는 TRU를 회수 및 GEN-IV 원자로에 순환 응용하는 후속 연구에 사용될 것이다.

. 그러나 본 연구에서 제시한 결과는 Akaoka 등[1]의 실험에서 발견된 Zn 증류 이중 피크현상을 모사하지는 못하고 있다. 따라서 향후 정밀한 다성분계 열역학적 물성을 보완한 본격적 모델링과 실험적 연구가 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

References

[1] Katsuaki Akaoka and Yoicro Maruyama, "Research of Vacuum Distillation for Metals - Experimental Separation of Duralium", JAERI-Research 2003-022, 2003.
 [2] Erich Krell, "Handbook of Laboratory Distillation", Elsevier Publishing Company, 1963
 [3] Matthew Van Winkle, "Distillation", McGraw-Hill Book Company, 1967
 [4] E.A. Coulson and E.F.G. Herington, "Laboratory Distillation Practice", Interscience Publishers, Inc., 1958
 [5] Clark Shove Robinson and Edwin Richard Gilliland, "Elements of Fractional Distillation", McGraw-Hill Book Company, 1950