

Study of the Formation of Eutectic Melt of Uranium and Thermal Analysis for the Salt Distillation of Uranium Deposits

우라늄 전착물의 염증류에 대한 우라늄 공정(共晶) 형성 및 열해석 연구

Sung Bin Park¹⁾, Dong Wook Cho*, Sung Chan Hwang, Young Ho Kang, Ki Min Park,
Wan Gi Jun, Jeong Guk Kim and Hansoo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon

*Korea Research Institute of Chemical Technology, P.O Box 107, Sinseongno 19, Yuseong-gu, Daejeon

박성빈¹⁾, 조동욱*, 황성찬, 강영호, 박기민, 전완기, 김정국, 이한수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

*한국화학연구원, 대전광역시 유성구 신성로 19

(Received December 23, 2009 / Revised February 23, 2010 / Approved March 05, 2010)

Abstract

Uranium deposits from an electrorefining process contain about 30% salt. In order to recover pure uranium and transform it into an ingot, the salts have to be removed from the uranium deposits. Major process variables for the salt distillation process of the uranium deposits are hold temperature and vacuum pressure. Effects of the variables on the salt removal efficiency were studied in the previous study[1]. By applying the Hertz-Langmuir relation to the salt evaporation of the uranium deposits, the evaporation coefficients were obtained at the various conditions. The operational conditions for achieving above 99% salt removal were deduced. The salt distilled uranium deposits tend to form the eutectic melt with iron, nickel, chromium for structural material of salt evaporator. In this study, we investigated the hold temperature limitation in order to prevent the formation of the eutectic melt between uranium and other metals. The reactions between the uranium metal and stainless steel were tested at various conditions. And for enhancing the evaporation rate of the salt and the efficient recovery of the distilled salt, the thermal analysis of the salt distiller was conducted by using commercial CFX software. From the thermal analysis, the effect of Ar gas flow on the evaporation of the salt was studied.

Key words : Uranium deposit, salt distillation, eutectic melt, thermal analysis, commercial CFX software, salt removal efficiency

요 약

전해정련공정을 통해 생산된 우라늄 전착물은 약 30%의 용융염을 포함하고 있으므로, 순수한 우라늄을 회수하여 금속 잉곳으로 용이하게 제조하기 위해서는 용융염을 먼저 제거하는 공정이 필요하다. 우라늄 전착

1) Corresponding Author. E-mail : sbpark@kaeri.re.kr

물의 염증류 거동을 고찰하기 위해서는 염증류의 주요 공정변수인 유지온도와 진공압의 염제거율에 대한 영향을 고찰해야 한다. 이전 연구에서 우라늄전착물에 대한 염증류 거동에 대해 Hertz-Langmuir 관계식을 적용하여 각 용융염의 휘발 조건에 대해 염휘발계수를 얻을 수 있었으며 이로부터 우라늄 전착물에 대해 99% 이상의 염제거율을 나타내는 염증류공정의 조업조건을 도출하였다[1]. 한편, 염증류 장치에서 사용되는 재질인 스테인리스강에 대해 우라늄 전착물에서 염휘발된 우라늄 금속이 스테인리스강의 주성분인 철, 니켈, 크롬 등과 공정(eutectic melt)을 형성하지 않는 온도에서 염증류공정을 수행해야 하는 제한 조건이 따른다. 이번 연구에서는 우라늄 금속과 스테인리스강과의 반응성을 검토함으로써 우라늄 전착물의 염을 99% 이상 제거할 수 있는 조건을 확인하였다. 그리고 염증류 속도를 증진시키며 휘발된 염을 더 효율적으로 회수하기 위해 공급되는 알곤 흐름에 의한 염증류 장치의 열해석을 수행함으로써 알곤 흐름에 의한 우라늄 전착물에 대한 염증류 거동을 고찰하였다.

중심단어 : 우라늄 전착물, 염증류, 공정(共晶), 열해석, 상용 열유체 해석 소프트웨어, 염제거율

1. 서론

파이로 공정(Pyroprocess)은 사용후핵연료를 처리하는 대안으로 주목을 받고 있는 공정이다. 미국 Argonne National Laboratory(ANL)에서 금속핵연료를 사용하는 Experimental Breeder Reactor II (EBR-II) 원자로의 사용후핵연료를 처리하는 기술로 파이로 공정을 제안하였고 이에 대한 기술개발이 이루어졌다[2]. 일본에서 선진핵연료주기기술로써 파이로 공정에 꾸준한 관심을 기울이며 기술개발을 수행하고 있다. 한국원자력연구원에서는 PWR 산화물 사용후핵연료를 처리하여 부피를 감용시키는 기술로써 파이로 공정을 채택하여 상용화를 목표로 연구를 진행하고 있다. 한국원자력연구원에서 수행되고 있는 파이로 공정은 산화물 사용후핵연료를 금속으로 환원시키는 전해 환원공정, 우라늄만 선택적으로 회수하는 전해정련공정, 잔류 우라늄과 초우란 원소를 함께 회수하는 전해제련공정, 공정 내에서 발생된 용융염을 처리하는 염폐기물 공정으로 이루어져 있다. 파이로 공정 중 전해정련(electrorefining)공정은 용융염을 매질로 사용하여 전해환원공정에서 금속으로 환원된 사용후핵연료로부터 순수한 우라늄을 전기화학적으로 회수하는 중요한 공정이다[3-5]. 전해정련공정에서 우라늄이 고체전극에 전착되는데, 고체전극에 전착된 우라늄 전착물은 약 30~40%의 용융염을 포함하고 있다. 이 전착물로부터 염을 제거하여 금속 잉곳으로 회수하는 공정을 cathode processing라고 부른다[6]. Cathode processor를 통해 전해정련 공정에서 생산된 우라늄 전착물을 처리하여 순수한 우라늄을 회수한다. 미국 Idaho National Laboratory (INL)에서는 EBR-II 사용후핵

연료를 처리하기 위하여 Fuel Conditioning Facility (FCF) hot cell에 유도도가 장착된 bottom-loading cathode processor를 설치하고 전해정련을 거친 드라이버 연료와 블랭킷 연료를 우라늄 잉곳으로 제조하는 cathode processing을 수행하고 있다. 엔지니어링 규모(15L)의 회분식 Cathode Processor를 통해 1,400℃, 1.30×10^{-3} Pa의 운전조건에서 약 38 kg의 음극 전착물(우라늄 77%, 용융염 23%)을 증류시켜 약 29.4 kg의 우라늄 잉곳을 회수하는 실험을 수행하였다[7-9].

일본에서는 염증류에 대한 연구로는 CRIEPI에서 주도적인 역할을 수행하고 있다. 최근 JAEA (구 JAERI 및 JNC)와의 공동연구를 통해 작은 규모의 염 및 카드뮴 증류에 대한 실증 실험을 진행시켰으며 엔지니어링 규모의 반 연속식 전해정련 장치 구축에 대한 개념을 계획하면서 염 및 카드뮴 증류 장치에 대한 연구도 진행하고 있다[10]. 염증류 장치는 상향식 염증류 장치이며 732 K 및 1,235 K의 온도에서 일정시간 동안 온도를 유지시키며 온도를 상승시키는 2단 증류법을 사용하였다. 그 결과 염 및 카드뮴을 효과적으로 회수하여 수 g의 금속을 회수하였다. 회분식의 cathode processor를 이용할 경우 INL의 연구결과에서 보는 바와 같이 전해정련 공정에서 회수된 우라늄이 염에 함유된 플루토늄에 의해 오염되어 저준위 우라늄으로 회수되기 어려운 단점이 있으며 cathode processor를 통해 제조된 우라늄 잉곳의 내부에 일부의 염이 휘발되지 않고 잔존하게 되는 단점이 있다.

한국원자력연구원에서는 전해정련공정에서 회수된 우라늄 전착물로부터 순수한 우라늄을 회수하기 위해 cathode processing을 염증류공정과 잉곳 주조공정으로 나누어 연

구를 수행하였다. 염증류공정을 통해 용융염을 먼저 제거함으로써 저준위 우라늄 금속 잉곳으로 용이하게 제조할 수 있는 장점이 있다. 우라늄 전착물에 함유된 염을 효율적으로 제거하기 위해서는 염증류공정에 대한 진공압과 유지온도 및 유지시간의 영향을 고찰할 필요가 있다. 이전 연구에서 Hertz-Langmuir 관계식을 적용하여 염증류공정에 대한 진공압과 유지온도 및 유지시간의 영향을 알아보았다 [1]. 이번 연구에서는 이전 연구의 결과를 바탕으로 염증류공정에 제한 요소로 작용하고 있는 우라늄 금속과 염증류 장치의 재질로 사용되는 스테인리스강과의 반응성 검토하여 염증류공정의 운전조건을 개선할 수 있는 방안을 고찰하고자 한다. 염증류 장치의 안정성을 고려하여 염증류 장치에서 염증류된 우라늄 전착물이 스테인리스강의 주요 조성성분인 철, 니켈, 크롬 등과 각각의 임계온도조건에서 공정을 형성할 수 있다는 제한이 있다. 따라서 99% 이상의 염제거율을 달성할 수 있는 염증류공정에 대한 조업조건을 토대로 우라늄 전착물과 스테인리스강 간의 공정 형성 여부를 알아볼 필요가 있다.

또한, 염증류장치를 통해 증류된 염은 Carrier 가스인 알곤 가스의 흐름을 따라 염회수 장치로 이송되어진다. 증류된 염은 온도가 낮아질 경우 응고되어 낮은 온도의 관벽 등에 응축될 수 있으며 염회수 효율은 떨어지게 된다. 따라서 우라늄 전착물의 염증류 조업조건 중 온도의 영향이 크므로 염증류 장치 내의 온도분포를 이해하는 것이 중요하다. 또한 알곤 가스가 흐르기 때문에 알곤 흐름에 의한 영향도 고려해야 한다. 이와 같이 염증류 거동에 영향을 미치는 공정변수에 대한 고찰이 필요하다. 염증류 장치 내의 온도분포는 외부 히터의 가열 그리고 염증류 장치 내로 흐르는 알곤 흐름 등에 영향을 받는다. 따라서 이런 영향 등을 고려한 염증류장치 내의 온도분포를, ANSYS CFX 상용 코드를 활용하여 염증류 장치에 대한 열해석을 수행함으로써 전산 모사할 수 있다. 이번 연구에서는 ANSYS CFX를 이용하여 실험실 규모의 염증류 장치에 대한 열해석을 수행하여 염증류 장치 내 온도분포에 대한 알곤 흐름의 영향을 고찰하고자 한다.

II. 실험방법

우라늄 전착물에 대한 염증류 거동을 고찰하기 위해 Fig. 1 과 같은 실험실 규모의 염증류 장치를 이용하여 염증류 실험을 수행하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 염증류 장치는 알루미늄 증류관, 증류관 내 우라늄 전착물을 담은 알루미늄 도가

니, 저항로를 이용한 증류관 가열시스템, 증류된 염을 아래로 포집하기 위한 알곤 가스 흐름 제어시스템, 진공펌프, 휘발된 염을 포집하는 응축시스템 그리고 우라늄 전착물의 염증류로 인한 무게 변화를 측정할 수 있는 로드셀 등으로 구성되어 있다. 우라늄 전착물에 대한 염증류 실험을 수행하기 위해서 먼저 용융염을 포함하고 있는 일정량의 우라늄 전착물을 알루미늄 도가니에 넣은 후 이 도가니를 로드셀에 연결한 후 염증류 장치의 증류관에 장입한다. 저항가열로를 이용하여 상온에서 각 설정 유지온도까지 5℃/min 가열속도로 증류관을 가열하며 진공펌프로 증류관 내 진공압을 조절하여 회분식 조업으로 일정 시간동안 염회발 과정을 수행하게 된다. 염증류 과정에서 도가니에 장입된 우라늄 전착물에 대한 무게 변화를 모니터링하여 휘발된 염의 양을 측정한다. 염증류 실험에 사용된 우라늄 전착물은 전해정련실험으로부터 생산된 것이다. 전해정련실험에서 사용된 시료는 감손우라늄으로, 전해정련 반응기의 양극에 감손 우라늄을 장입한 후 전해 실험을 통해 고체 음극에 수지상 결정형태의 우라늄을 석출한 것이다. 그리고 우라늄 전착물에 대한 염증류 실험 후, 우라늄 전착물을 물로 세척하여 염증류 후 우라늄 전착물 내에 잔존하는 염의 무게를 측정함으로써 염증류공정의 염제거율을 분석하였다. 한편 우라늄과 스테인리스강과의 반응성 실험을 위해 표면이 연마된 우라늄 금속과 스테인리스강을 밀착 고정시킨 상태로 알루미늄 도가니에 넣어 염증류 장치에서 6.49×10^{-4} Pa 또는 대기압에서 700 ~ 800℃의 유지온도로 2, 4, 6 시간동안 유지하여 금속 우라늄과 스테인리스강 사이의 반응성 실험을 수행하

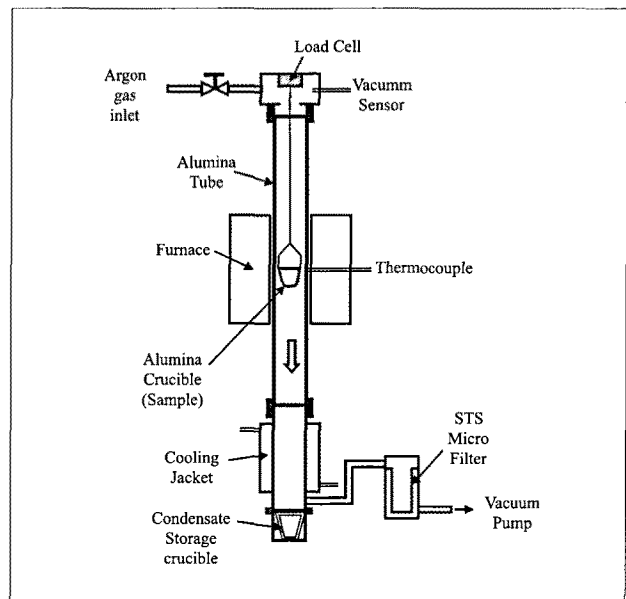


Fig. 1. Schematic diagram of a salt distiller.

였다. 실험 후 스테인리스강 시편을 SEM-EDS로 그 수직단면상을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

가. 우라늄 금속과 스테인리스강 반응성

전해정련공정에서 나오는 우라늄 전착물에서 용융염을 제거하여 회수하는 염증류공정에 대해 이전 연구에서[1] Hertz-Lagmuir 관계식을 적용함으로써 염증류 모델로부터 우라늄 전착물의 염증류 거동을 예측할 수 있었다. 그리고 염제거율 99% 이상 달성할 수 있는 운전조건을 도출하였다.

이번 연구에서는 우라늄 금속과 스테인리스강과의 반응성을 검토함으로써 염증류공정의 운전 조건을 개선할 수 있는지를 확인하고자 하였다. 염증류 장치의 재질을 스테인리스강으로 이용할 경우 우라늄 금속과 스테인리스강의 반응성을 고려해야 한다. 전해정련 공정을 통해 생산된 우라늄 전착물에는 염이 함유되어 있으므로 스테인리스강과 잘 반응하지 않지만 염이 휘발된 우라늄 전착물은 스테인리스강과 반응할 수 있다[11]. 스테인리스강의 주요 성분인 철, 니켈 그리고 크롬은 우라늄과 임계온도에서 공정을 형성한다. 우라늄과 철의 공정 형성온도는 725℃이며 우라늄과 니켈의 경우는 740℃ 그리고 우라늄과 크롬의 경우는 860℃이다 [12-14]. 따라서 이론적으로 우라늄 전착물의 염증류공정에서 공정을 형성하지 않고 염을 제거하면서 염휘발된 우라늄 전착물을 안정적으로 회수하기 위해서는 이들의 공정(共晶) 온도보다 낮은 온도에서 염증류공정을 진행하여야 한다. 하지만 실제 공정에서 우라늄 금속과 스테인리스강과의 반응성을 검토하여 그 결과로부터 염증류공정 운전에 반영하여야 한다. 이를 위해 Fig. 2에서와 같이 각각 표면이 연마된 우라늄 금속과 스테인리스강 시편을 텅스텐 와이어로 밀착 고정시킨 상태로 알루미늄 도가니에 넣어 염증류 장치에서 반응성 실험을 수행하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 반응성 실험에 사용된 우라늄 금속 시편은 스테인리스강과 접촉하는 표면적이 넓은 편으로 강제적으로 밀착 고정하여 반응을 진행시켰다. 한편 실제 우라늄 전착물은 염증류공정을

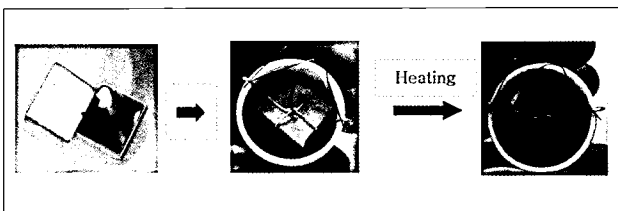


Fig. 2. Experimental procedure on the eutectic reaction test between uranium and the stainless steel.

거치면서 덴드라이트(dendrite) 형태로 염이 휘발된 후 스테인리스강과 접촉할 수 있는 접촉면이 작기 때문에 위 반응성 실험 결과보다는 염휘발된 우라늄 전착물이 스테인리스강과는 반응이 덜 할 것으로 예상된다.

우라늄 금속과 스테인리스강과의 반응성 실험은 각각 700℃, 750℃의 유지온도 조건에서 유지시간을 각각 2, 4, 6시간으로 설정하였으며, 사용된 시편은 STS 304이다. 또한 800℃의 유지온도 조건에서 유지시간을 2시간으로 설정하여 실험을 수행하였다. 이 때 상온에서 각 설정 유지온도까지 5℃/min의 가열속도로 승온시켰다. 각 반응성 실험 후 각 스테인리스강 시편의 단면을 절단하여 SEM-EDS로 그 수직단면상을 분석하였다. Fig. 3은 700℃ 유지온도에서 우라늄 금속과 스테인리스강의 반응성 실험을 유지시간에 따라 실험한 결과를 나타낸다. 700℃는 우라늄이 철, 니켈 그리고 크롬과 공정을 형성하는 온도보다 낮은 온도이므로, 각 유지온도에서의 실험결과 모두 공정이 형성되지 않았음을 알 수 있었다. Fig. 4는 750℃ 유지온도에서 우라늄 금속과 스테인리스강의 반응성 실험을 유지시간에 따라 실험한 결과를 나타낸다. 750℃는 우라늄과 철 그리고 우라늄과 니켈과

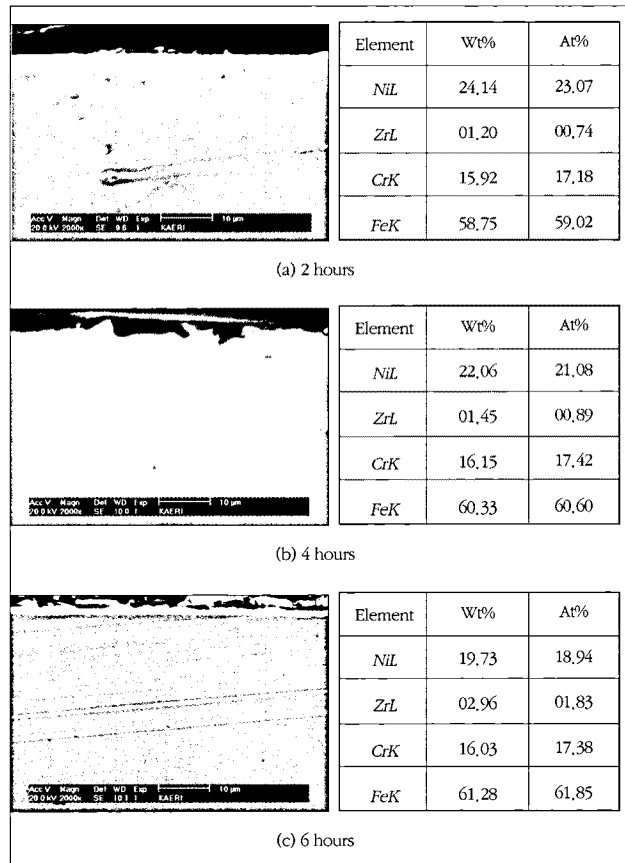


Fig. 3. SEM-EDS analysis of the reaction between the uranium and stainless steel with regard to the hold time at 700℃

의 공정 형성온도보다 높은 온도이지만 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각 유지온도에서 공정이 형성되지 않음을 확인하였다. 다만 Fig. 4 (b)의 SEM 사진에서 보는 바와 같이 스테인리스강의 단면에 열은 회색 부분이 보이지만 이곳에 대한 EDS 분석 결과 공정이 발견되지 않았다. 그리고 800℃에서 우라늄 금속과 스테인리스강의 반응성 실험을 한 결과 Fig. 5의 결과에서 보는 바와 같이 마찬가지로 우라늄금속이 스테인리스강과 공정을 형성하지 않음을 알 수 있었다.

염증류 공정을 6.49×10^{-4} Pa의 진공압을 유지하면서 800℃ 유지온도로 진행할 경우 이전 연구의 염증류 모델로부터

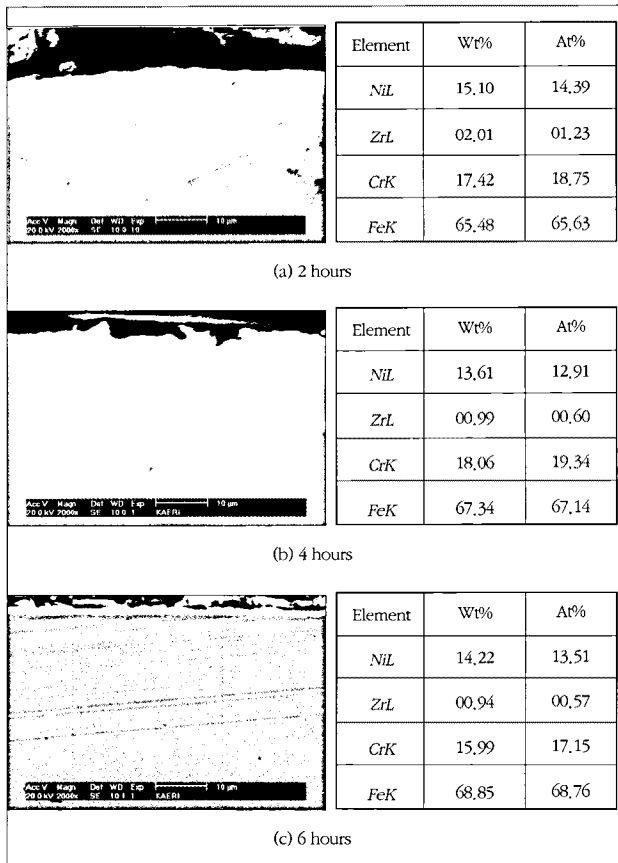


Fig. 4. SEM-EDS analysis of the reaction between the uranium and stainless steel with regard to the hold time at 750 °C

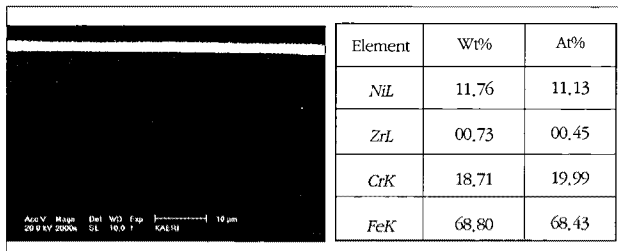


Fig. 5. SEM-EDS analysis of the reaction between the uranium and stainless steel for 2 hours hold time at 800 °C

99%이상 염제거율을 나타내는 유지시간을 계산해보면 약 1 시간 정도이다. 위 반응성 실험에서 800℃ 유지온도에서 2 시간 동안 공정을 형성하지 않으므로 위 조건에서 충분히 99% 이상 염제거율을 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 유지온도를 700℃에서 800℃로 올릴 경우 유지시간이 거의 4 배 이상 감소하기 때문에 공정의 효율을 증대시킬 수 있다.

나. 염증류 장치에 대한 열해석

실험실 규모의 염증류장치는 약 10 g 우라늄전착물의 염취발거동을 연구하는데 이용되었다. 염증류장치에 취발된 염이 증류관 위로 올라와 염이 회수관으로 회수되지 않고 상부에 응축될 수 있으므로 이를 방지할 뿐아니라 염이 염취수 도가니에 잘 회수되며 염취발 속도를 증대시키기 위해 Fig. 1에서 보는 바와 같이 알곤 가스를 아래로 흐르도록 하였다. 이 때 알곤 흐름은 증류관 내 진공압을 유지할 수 있도록 조절하였다. 알곤 가스가 증류관 내로 유입될 때 증류관 내의 온도분포가 중요하다. 700℃ 보다 낮은 알곤 가스가 증류관으로 유입됨으로써 증류관 내에 온도 편차가 발생되며 이로 인해 염취발 거동에 영향을 미치므로 증류관 내의 온도분포를 균일하게 유지하는 것이 중요하다. 이를 위해 염취류장치에 대해 ANSYS CFX 상용 코드를 이용하여 열해석

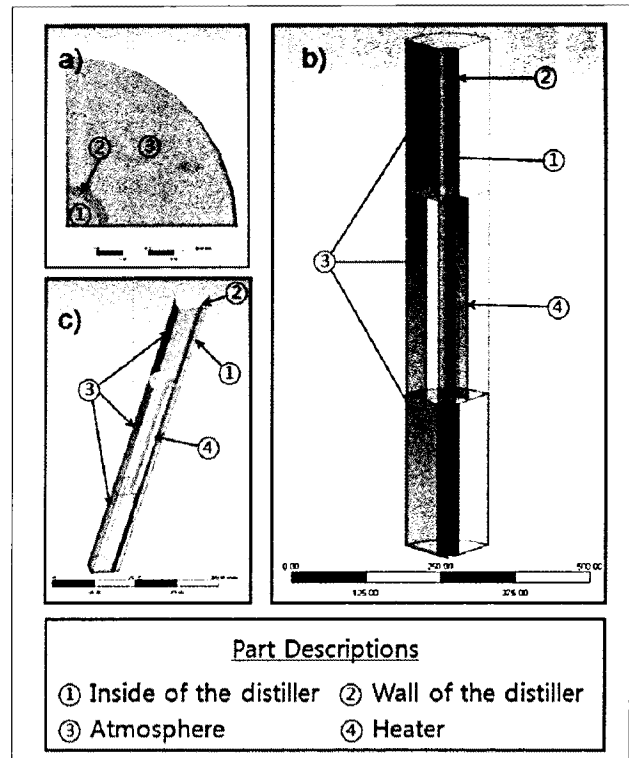


Fig. 6. Geometry of the bench-scale salt distiller and part descriptions. a) Top view b) Front view c) Side view

을 수행하였다.

Fig. 6은 CFX를 이용하여 열해석을 수행하기 위해 Fig. 1의 염증류 장치에 대해 염증류가 일어나는 증류관 그리고 증류관과 접해 있는 대기를 간략하게 형상화한 그림이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 우라늄 전착물을 장입된 도가니가 증류관의 중앙 안쪽에 위치하며 증류관 중앙 외벽에 히터를 설치하여 증류관을 가열하고 있다. 그리고 알곤 가스는 증류관의 윗부분에서 주입되어 아랫방향으로 흘러 도가니에서 증류되어 나온 염을 증류관 아래로 이송되도록 한다. 염이 함유된 우라늄 전착물의 염증류공정에서 온도가 염제거율에 미치는 중요한 인자이므로 증류관 중앙의 온도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 또한 증류관의 온도는 알곤 흐름에 영향을 받으므로 알곤 흐름에 따른 증류관 중앙의 가열 부분(Heating zone)에서의 온도분포를 고찰해야 한다. 한편 증류관의 윗부분과 아래부분은 공기 중에 노출되어 있으므로 대기와의 열전달로 인한 온도변화를 고려해야 한다. 따라서 CFX 코드를 이용하여 알곤 흐름에 의한 증류관의 온도분포를 전산모사하기 위해서 Fig. 6과 같이 알곤 가스가 흐르는 증류관 내부, 증류관 벽, 증류관 중앙을 가열하는 히터 그리고 외부 대기로 나누어 형상을 나타내었고 증류관의 재질은 스테인리스강이다. 우라늄 전착물의 염의 휘발거동에 대해 CFX 코드로 정확하게 계산하기 위해서는 염의 물성치가 확보되어야 하는데 염의 물성치에 대한 데이터를 얻기 어렵다. 따라서 이번 연구에서는 알곤 흐름에 대한 증류관의 온도분포에 대해 해석을 수행하였다. CFX 코드의 계산을 효율적으로 하기 위해 형상을 1/4만 고려하여 대칭으로 전산모사를 수행하였다. Fig. 7은 염증류 장치에 대해 CFX 코드로 계산한 결과를 나타낸다.

Fig. 7의 결과는 알곤 가스를 예열하지 않고 상온의 알곤 가스의 흐름에 따른 증류관의 온도분포를 해석한 결과로 상

온의 알곤 가스의 선속도가 각각 1 mm/s, 10 mm/s, 100 mm/s 일 때의 결과이다. 상온의 알곤 가스로 인해 알곤 가스의 유량이 증가할수록 증류관의 내부는 온도가 내려감을 알 수 있다. Fig. 7 (c)에서 보는 것처럼 알곤 흐름 선속도가 100 mm/s 일 때, 증류관의 가열부분에서 증류관의 벽에 가까이 위치하는 부분만 온도가 700 ℃로 가열되고 증류관 내부는 알곤 가스에 의해 온도가 내려감을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 7 (a)에서 보는 바와 같이 알곤 흐름의 선속도가 1 mm/s로 낮은 유속일 때 증류관의 내부온도가 700℃로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. CFX 코드를 이용하여 계산한 결과로부터 상온의 알곤 흐름의 유속에 따라 증류관 내부의 온도분포가 상이함을 확인할 수 있었다. 우라늄 전착물의 염증류를 원활하게 진행시키기 위해서는 증류관 내부의 온도를 700℃를 유지해야 하므로 상온의 알곤 가스를 공급할 경우 선속도를 1 mm/s 이하로 유지해야 함을 알 수 있었다. 상온의 알곤 가스가 증류관의 온도 분포에 미치는 영향이 크므로 미리 알곤 가스를 예열하여 공급해야 증류관 내부의 온도를 더 안정적으로 700℃로 유지할 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 8은 공급되는 알곤 가스의 유속이 100 mm/s일 때, 알곤 가스의 예열 온도에 따른 증류관 내의 온도분포를 해석한 결과이다. 알곤 가스의 예열온도가 증가할수록 증류관의 온도가 상승함을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 알곤 가스 유속을 20 mm/s로 하고 예열 온도를 400℃로 했을 경우, 증류관의 온도분포에 대한 해석결과를 나타낸다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 증류관 내 가열구간 중 상부의 내부를 제외하고는 가열 구간에서 700℃로 유지됨을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 우라늄 금속과 염증류 장치의 재질로 사용

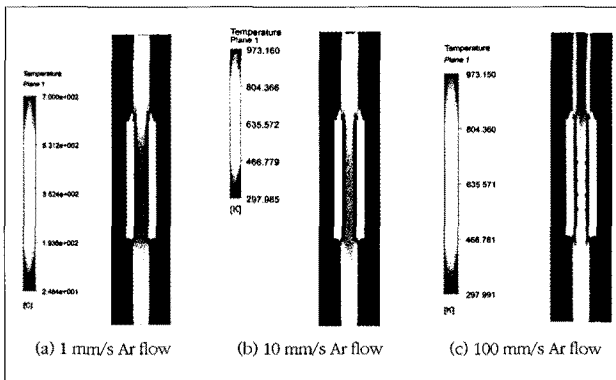


Fig. 7 Thermal analysis of the salt distiller with respect to the Ar gas flow rate (Initial temperature of the inlet Ar gas = 25°C).

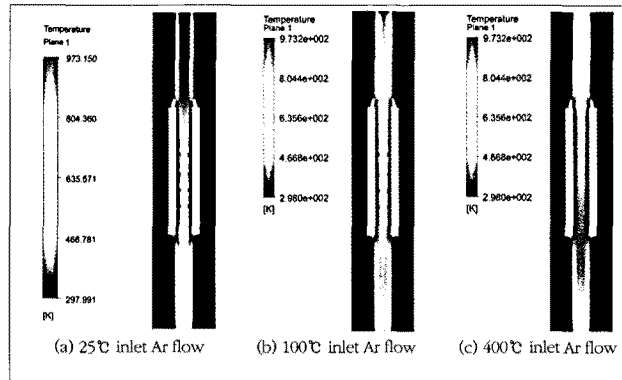


Fig. 8 Thermal analysis of the bench-scale salt distiller with respect to the initial temperature of the inlet Ar gas at 100 mm/s Ar flow.

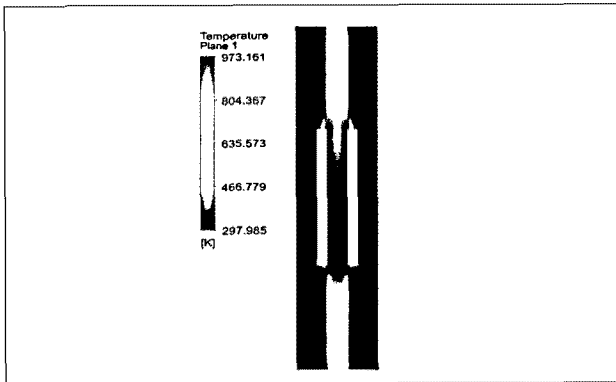


Fig. 9 Thermal analysis of the bench-scale salt distiller with 20 mm/s and 400°C inlet Ar flow.

되는 스테인리스강과의 반응성 실험을 여러 온도에서 수행하여 염증류 공정의 공정 조건을 개선하였다. 이론적으로 우라늄과 스테인리스강의 주 구성성분인 철, 니켈, 크롬 등과 공정(eutectic melt)을 형성하는 온도보다 낮은 온도인 700°C 뿐 아니라 공정 형성 온도보다 높은 800°C 까지 반응성 실험을 수행한 결과, 우라늄 금속이 스테인리스강과 공정을 형성하지 않음을 실험적으로 확인하였다. 이로부터 유지온도를 800°C로 증가시킬 경우 6.49×10^{-4} Pa에서 99% 이상 염제거율을 달성하기 위해서는 700°C 유지온도의 경우보다 유지시간을 4배가량 단축시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 알곤 흐름에 의한 염증류 장치 내 온도분포의 영향을 CFX 상용 코드를 활용하여 열해석을 수행함으로써 확인할 수 있었다. 이로부터 우라늄 전착물의 염증류공정에 대한 유지온도 상승과 알곤 흐름에 대한 유속 조절 및 예열에 대한 영향을 고찰할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] S. Park, D. Cho, G. Oh, J. Lee, S. Hwang, Y. Kang, H. Lee, E. Kim and S. Park, "Salt Evaporation Behaviors of Uranium Deposits from an Electrorefiner," *J. Radioanalytical & Nuclear Chemistry*, 283, pp.171-176 (2010).
 [2] Y. I. Chang, "The Integral Fast Reactor," *Nucl. Technol.*, 88 (11), pp. 129-138 (1989).

[3] 강영호, 이종현, 황성찬, 심준보, 김응호, "흑연 전극을 이용한 우라늄 전해정련 특성," *방사성폐기물학회지*, 5(1), pp.1-7 (2007).
 [4] 유재형, 홍권표, 이한수, "사용후핵연료 파이로 처리공정 실증시설의 개념설계 연구," *방사성폐기물학회지*, 6(3), pp.233-244 (2008).
 [5] J. J. Laidler, J. E. Battles, W. E. Miller, J. P. Ackerman and E. L. Carls, "Development of Pyroprocessing Technology," *Progress in Nuclear Energy*, 31(1), pp. 131-140 (1997).
 [6] B. R. Westphal and D. V. Laug, "Initial Cathode Processing Experiences and Results," Argonne National Laboratory Report, ANL/TD/CP-89650 (1996).
 [7] A. R. Brunsvold, P. D. Roach and B. R. Westphal, "Design and development of a cathode processor for electrometallurgical treatment of spent nuclear fuel", *Proceedings of ICONE 8: 8th International Conference on Nuclear Engineering*, April 2-6, USA, Baltimore (2000).
 [8] B. R. Westphal, D. Vaden, T. Q. Hua, J. L. Willit and D. V. Lang, "Recent developments at the cathode processor for spent fuel treatment" *American Nuclear Society Fifth Topical Meeting DOE Spent Nuclear/Fuels and Fissile Materials Management*, Sep. 17-20, USA, Charleston, South Carolina (2002).
 [9] B. R. Westphal, J. R. Krsul and D. W. Maddison, "Molten salt separation from uranium during the processing of spent nuclear fuel", Argonne National Laboratory Report, ANL/ENT/CP-105428 (2001).
 [10] T. Kato, M. Iizuka, T. Inoue, T. Iwai and Y. Arai, "Distillation of Cadmium from Uranium-Plutonium-Cadmium Alloy," *J. Nuclear Materials*, 340, pp.259-265 (2005)
 [11] C. M. Walter, "Interdiffusion between uranium-5 w/o fissium alloy and type 304 stainless steel," Argonne National Laboratory Report, ANL-6816 (1964)
 [12] P. Gordon and A. R. Kaufmann, *Trans. AIME*, 188, pp.182-194 (1950).

- [13] J. D. Grogan, R. J. Pleasance and R. E. Williams,
J. Inst. Met., 82, pp.141-147 (1953-1954).
- [14] A. H. Daane and A. S. Wilson, Trans. AIME, 203,
pp.1219-1220 (1955).