

Recovery of Residual LiCl-KCl Eutectic Salts in Radioactive Rare Earth Precipitates

방사성 희토류 침전물내 잔류하는 LiCl-KCl 공융염의 회수

Hee-Chul Eun¹⁾, Hee-Chul Yang, In-Tae Kim, Han-Soo Lee and Yung-Zun Cho

Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon

은희철¹⁾, 양희철, 김인태, 이한수, 조용준

한국원자력연구원, 대전시 유성구 덕진동 대덕대로 1045

(Received Jun 11, 2010 / Revised August 02, 2010 / Approved September 09, 2010)

Abstract

For the pyrochemical process of spent nuclear fuels, recovery of LiCl-KCl eutectic salts is needed to reduce radioactive waste volume and to recycle resource materials. This paper is about recovery of residual LiCl-KCl eutectic salts in radioactive rare earth precipitates (rare earth oxychlorides or oxides) by using a vacuum distillation process. In the vacuum distillation test apparatus, the salts in the rare earth precipitates were vaporized and were separated effectively. The separated salts were deposited in three positions of the vacuum distillation test apparatus or were collected in the filter and it is difficult to recover them. To resolve the problem, a vacuum distillation and condensation system, which is subjected to the force of a temperature gradient at a reduced pressure, was developed. In a preliminary test of the vacuum distillation/condensation recovery system, it was confirmed that it was possible to condense the vaporized salts only in the salt collector and to recover the condensed salts from the salt collector easily.

Key words : LiCl-KCl eutectic salt, Rare earth precipitates, Vacuum distillation, Temperature gradient, Reduced pressure

요 약

사용후핵연료 건식처리공정(pyrochemical process)에서 LiCl-KCl 공융염의 회수는 방사성폐기물 부피 감량과 원료물질 회수를 위해 반드시 필요하다. 본 논문은 진공증류공정을 이용하여 희토류 침전물(희토류 산염화물 또는 산화물)내 잔류하는 LiCl-KCl 공융염 회수에 관한 것이다. 진공증류시험장치에서 희토류 침전물내 공융염은 효과적으로 휘발 및 분리되었다. 분리된 공융염은 감압증류시험장내 세 지점에서 침적되거나 필터에 포집되며, 침적되거나 포집된 공융염을 회수하는 것은 쉽지 않았다. 이 문제점을 해결하기 위해 감압조건에서 온도구배를 이용하여 공융염 거동을 제어할 수 있는 공융염 진공증류/응축회수 시스템을 개발하였으며, 이 장치를 이용하여 휘발된 공융염을 회수용기에서만 응축시켜 쉽게 회수할

1) Corresponding Author. E-mail : ehc2004@kaeri.re.kr

수 있음을 확인하였다.

중심단어 : LiCl-KCl 공융염, 희토류 침전물, 진공증류, 온도구배, 감압

I. 서론

혁신적인 핵연료주기를 위한 유망기술 중 하나인 사용후핵연료 건식처리공정(pyrochemical process)은 고온의 용융염 내에서 전기화학적 방법을 이용하여 U과 TRU 금속을 회수하는 공정으로서 현재 원자력기술을 보유한 많은 국가에서 연구가 활발하게 진행되고 있다[1,2]. 이러한 건식처리공정에서는 희토류 염화물을 함유한 LiCl-KCl 공융염 폐기물이 상당량 발생하며, 이 희토류 염화물은 높은 방사열과 방사능을 가지고 있어 이를 함유한 공융염 폐기물이 고준위폐기물로 분류된다[3]. 따라서 사용후핵연료 건식처리공정의 경쟁력을 높이기 위해서는 이러한 고준위 폐기물의 부피를 최소화할 수 있는 기술이 뒷받침되어야 할 것이다. 현재 공융염 폐기물의 부피를 최소화하기 위해 공융염내에 용해되어 있는 희토류 염화물을 불용성 화합물인 산화물로 전환하고자 Li_2O 와 V_2O_5 와 같은 산화침전제를 이용하는 방법들이 연구되었으나 용융염내 희토류 염화물의 산화물로의 전환율이 높지 않고 공융염내 불순물을 발생시켜 공융염의 조성이 변화됨으로서 공융염 재생이 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다[4]. 그러나 한국원자력연구원에서 개발한 산소분산법에 의한 희토류염화물의 산화침전공정은 희토류 염화물의 산화물로의 전환율이 상당히 높으며, 이 공정을 통해 약 70%의 순수 공융염을 회수하여 재사용할 수 있다[5]. 그러나 나머지 공융염은 희토류 침전물과 함께 배출되어 추가적인 분리공정이 필요하다. 공융염과 희토류 침전물은 큰 증기압차로 인해 진공증류법을 이용하여 불순물 발생 없이 희토류 침전물로부터 잔류 공융염을 분리할 수 있으며, 감압조건(0.5-5 Torr)에서 분리효율이 우수한 것으로 보고되고 있다[6,7]. 하지만 휘발된 공융염의 응축거동에 대한 연구가 부족한 상황이며, 휘발된 공융염을 효과적으로 회수하기 위해서는 공융염 증기 응축거동에 대한 연구가 부가되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 공융염 진공증류시험장치를 이용하여 희토류 침전물내 잔류 공융염의 응축특성을 살펴보았으며, 이 결과를 바탕으로 공융염 진공증류/응축회수 시스템을 개발하여 공융염의 진공증류 및 응축회수에 대한 기초시험을 실시함으로써 희토류 침전물내 잔류하는 공융염을 효과적으로 분리 및 회수할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

II. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 공융염 진공증류시험장치는 크게 휘발챔버, 염증기 이송관, 응축챔버, 필터, 진공펌프 등으로 구성되어 있으며, 그 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다[6]. 이 장치는 전기히터를 이용하여 1,200 °C까지 가열할 수 있고, 진공펌프를 이용하여 0.1 Torr까지 감압할 수 있다. 휘발챔버 하부에 전기히터의 열선이 분포하지 않는 것을 고려하여 내화벽돌을 휘발용기의 받침대 용도로 장입하였고, 휘발용기는 공융염에 대한 부식성을 고려하여 알루미늄 재질의 도가니를 사용하였다. 휘발챔버의 견고한 밀폐를 위해 상부 덮개는 고무링이 설치된 플랜지를 이용하였고, 고온에서 고무링의 형태 유지를 위해 플랜지 내부에 냉각수를 순환시켰으며, 응축챔버는 사각관형으로 제작하여 내부에 냉각수가 아래에서부터 쌓여 위에서 배출되는 형태로 제작하여 항상 사각관형내 냉각수가 가득 차 있는 상태를 유지할 수 있도록 하였다.

LiCl-KCl 공융염을 함유하고 있는 희토류 침전물은 공융염 폐기물내 희토류 핵종 분리 및 공융염 재생을 위한 연계공정인 희토류 염화물 산화침전공정에서 발생된 것이다[8]. 공융염은 이 침전물내 80 wt% 이상 함유되어 있었다. 희토류 침전물내 잔류하는 공융염 증류시험은 이전의 연구결과를 통해 얻어진 감압조건에서의 공융염 휘발속도결과를 바탕으로 휘발챔버 내부 온도기준 900과 950 °C의 운전온도와 50 Torr 이

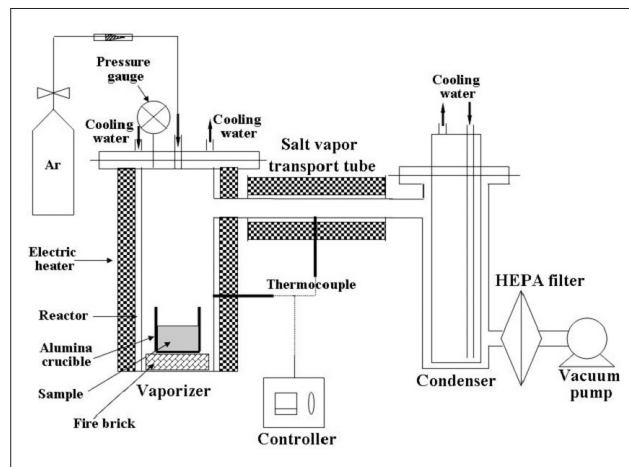


Fig. 1. A schematic diagram of the vacuum distillation test apparatus of the residual LiCl-KCl eutectic salts in the rare earth precipitates.

하의 압력에서 수행되었고, 염증기 이송관의 온도는 가스흐름의 방향인 응축챔버를 향하여 공용염 증기가 원활하게 이동할 수 있도록 1000 °C로 고정하였으며, 운전중 장치내 비활성 분위기를 유지하기 위해 고순도 아르곤 가스를 주입하였다.

III. 실험결과 및 고찰

가. 회토류 침전물내 잔류 공용염 휘발 및 응축

진공증류시험장치를 이용한 회토류 침전물내 잔류 공용염 증류시험 결과 50 Torr의 감압조건과 900 °C의 온도에서 약 99 wt%의 공용염이 휘발되었고, 950 °C에서는 약 99.2 wt%의 공용염을 분리할 수 있었으며, 이 결과는 이전의 연구결과와 유사한 것으로 900 °C 이상의 온도에서 50 Torr 이하의 압력을 유지한다면 회토류 침전물내 잔류하는 공용염을 효과적으로 분리할 수 있음을 확인할 수 있었다[6].

방사성폐기물 부피감량을 위해 회토류 침전물내 잔류하는 공용염을 휘발하는 것이 중요한 만큼 휘발된 공용염을 응축 및 회수하는 것도 장치의 운전상 문제와 장치 부식문제에 큰 영향을 미치기 때문에 그 중요성이 매우 크며[9,10], 휘발된 공용염의 응축거동 파악을 통한 재활용 가능한 공용염의 회수는 사용후핵연료 건식처리공정의 방사성폐기물 부피 저감뿐만 아니라 경제성 향상에 큰 도움이 될 수 있다. 이전의 연구결과에 따르면 LiCl-KCl 공용염은 각각의 염화물 형태로 휘발하여 응축되기 때문에 회수된 공용염의 조성은 달라질 수 있다[7,11]. 따라서 휘발된 공용염을 소실과 조성변화 없이 효과적으로 회수하기 위해서는 증류장치내 공용염 증기의 응축거동이 체계적으로 분석되어야 한다. 본 연구에서 사용된 진공증류시험장치는 내부를 일정압력으로 유지하기 위해 진공펌프가 연속적으로 가동되며, 이로 인해 내부의 가스흐름이 휘발챔버에서 염증기 이송관과 응축챔버를 거쳐 필터 및 진공펌프의 배출구 방향으로 진행되고 주입되는 아르곤 가스는 이 가스흐름을 따라 장치내에서 체류한 후 배출된다. 따라서 공용염 증기는 가스의 흐름에 따라 대부분 응축챔버와 필터에서 침적 및 포집될 것으로 예상되었다. 그러나 실제 시험에서 상이한 결과를 보였으며, 그 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. Fig. 2는 진공증류시험장치에서 회토류 침전물내 잔류하는 공용염의 증류시험 후 장치내 침적된 공용염의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 2에 따르면, 공용염 증기는 휘발챔버 상부 덮개(a), 응축챔버 전단부(b), 응축챔버 상단부(c) 등에서 필름형태로 침적되었고, 필터(d)에서 미세한 입자형태로 포집되었으며, 이외에 휘발챔버와 염증기 이송

관의 연결부에 적은 양의 염이 필름형태로 침적된 것으로 확인되었다. 이 결과를 통해 본 연구에서 사용된 진공증류시험장에서는 상당량의 공용염 증기가 불필요하게 침적됨으로서 Fig. 2(a) 및 (b)와 같이 회수가 용이하지 않은 형태로 응축거동이 발생되어 염의 소실은 물론 장치 부식과 운전상 문제를 야기할 것으로 사료되었다. 또한 필터에 포집된 미세한 입자의 염들도 회수가 쉽지 않았고, 미세한 입자들이 날릴 수 있어 취급하는데 어려움이 있어 응축형태로서 피해야 할 것으로 판단되었으며, 실제 회수가 용이한 형태로 응축된 염은 40 wt%이하였다.

이러한 진공증류시험장치에서 공용염 증기의 응축을 보다 상세하게 살펴보기 위해 ANSYS CFX(Ver. 12.0) 상용코드를 이용하여 회토류 침전물내 잔류 공용염 증류시험 운전조건에서 진공증류시험장치내 온도분포 및 가스흐름을 모사하였다. 이를 위해 아르곤 가스를 주입하는 진공증류시험장치의 내부는 아르곤 가스가 존재하는 것으로 가정하고 공용염 증기와 아르곤 가스의 거동이 발생하는 증류시험장치 내부를 모델영역으로 결정하여 Fig. 3과 같이 mesh를 완성하였으며, 이 mesh는 62,307개의 node와 322,807개의 element로 구성되어 있다. 운전조건에서의 온도분포와 가스흐름의 모사는 휘발챔버 900 °C, 염증기 이송관 1,000 °C, 휘발챔버 상부커버와 응축챔버 냉각온도 5 °C 그리고 아르곤 가스 0.2 m/s로 주입한 조건에서 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 아르곤 가스 주입이 없을 때 운전조건에서의 장치 내부 온도분포를 모사한 것이고, Fig. 4(b)는 운전조건에서 아르곤 가스를 주입할 때 장치 내부 온도분포와 가스흐름을 모사한 것이다. Fig. 4에서 나타난 모사결과는 실제 시험에서 측정된 휘발챔버 내부의 온도(880-900 °C), 염증기 이송관 내부온도 (990-1,000 °C), 응축챔버 벽면온도 (4.6-5.8 °C)와 유사한 것으로 확인되었다. 이전의 연구에 따르면, 공용염 증기는 냉각된 벽면에 접촉하거나 냉각된 부분

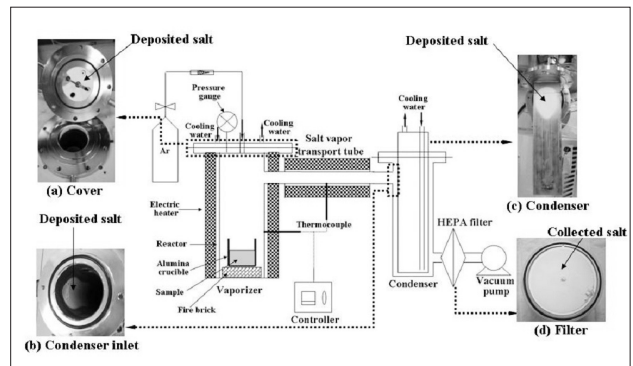


Fig. 2. Photos of the deposited salts in the vacuum distillation test apparatus after the salt distillation test.

을 기체흐름에 따라 통과할 때 응축되어 벽면에 침적되거나 필터에 포집되었다[12]. Fig. 4(a)에 따르면, 아르곤 가스의 주입이 없을 때 진공증류시험장치내 공용염 증기가 응축될 수 있는 곳은 휘발챔버 상부 덮개, 휘발챔버와 염증기 이송관 연결부, 응축챔버 전단부 그리고 응축챔버 등으로 이들은 전기히터가 가열되지 않는 부분이거나 냉각수가 순환되는 부분이며, 이들과 가열부 사이에는 온도구배가 뚜렷하게 조성됨을 알 수 있었다. 그러나 이 상태에서 아르곤 가스가 주입되면 Fig. 4(b)에서와 같이 휘발챔버 상부에서 응축챔버 전단부까지의 온도분포가 가스의 흐름방향을 따라 역동적인 형태로 변화되어 휘발챔버와 염증기 이송관 연결부와 응축 챔버 전단부의 중심온도가 아르곤 가스 주입이전보다 크게 증가함을 알 수 있었다. 따라서 아르곤 가스를 주입할 때 공용염 증기가 응축될 수 있는 냉각부는 휘발챔버 상부 덮개와 응축챔버 전단부 그리고 응축챔버 등이고, 일부가 휘발챔버

와 염증기 이송관의 연결부에 응축될 것으로 예측할 수 있으며, 이는 Fig. 2에 나타낸 실제시험에서의 공용염 증기 응축 결과와 일치함을 알 수 있었다. 특히, 휘발챔버 상부 덮개에 상당량의 염이 침적된 결과는 공용염 증기의 이동이 온도구배에 의해 많은 영향을 받음을 의미하는 것으로서 진공증류/응축회수 시스템의 설계 및 운전원리를 결정하는데 핵심자료로 활용되었다.

이상의 결과를 통해 진공증류시험장치에서 공용염 증기의 응축거동은 다음과 같이 설명할 수 있다. 공용염 증기가 장치내에서 거동하면서 냉각면에 접촉할 경우에는 액상으로 전환된 후 고상으로 전환되어 냉각면에 필름형태로 침적되고, 냉각된 면에 접촉하지 않고 가스흐름에 따라 이동할 경우에는 냉각부를 통과하는 과정에서 고체로 빠르게 전환되어 미세한 입자를 형성한다. 따라서 휘발된 공용염을 소실 없이 용이하게 회수하기 위해서는 장치내 냉각면이 한 곳에만 위치하도록 하고 염증기가 발생될 때 진공펌프의 가동이 계속되지 않아야 할 것으로 판단되었다.

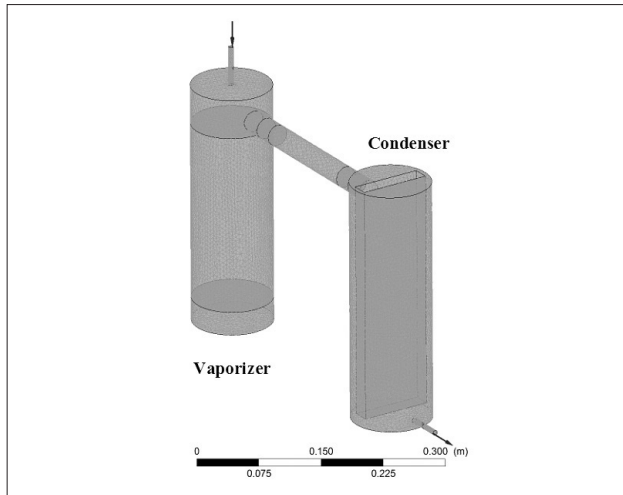


Fig. 3. CFX mesh of computational model for the vacuum distillation test apparatus.

나. 진공증류/응축회수 시스템 개발

진공증류시험장치에서 얻어진 결과를 바탕으로 진공증류/응축회수 시스템을 개발하였으며, 그 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 이 시스템은 휘발된 공용염을 대부분 회수하는데 초점을 맞추어 공용염 증기가 한 위치에서만 응축될 수 있도록 휘발챔버와 응축챔버를 연결관 없이 하나의 형태로 제작하였고, 챔버내 응축염이 회수용기(salt collector) 바닥에서만 냉각면이 존재하도록 설계하였다. 이 장치의 큰 특징은 각각 독립적으로 제어할 수 있는 네 개의 전기히터가 설치되어 있다는 것과 일정압력 유지를 위해 진공펌프를 계속 가동하던 열린계 방식의 진공증류시험장치와 달리 닫힌계에서 운전을 할 수 있다는 것이다. 따라서 본 시스템은 감압조건에서 챔

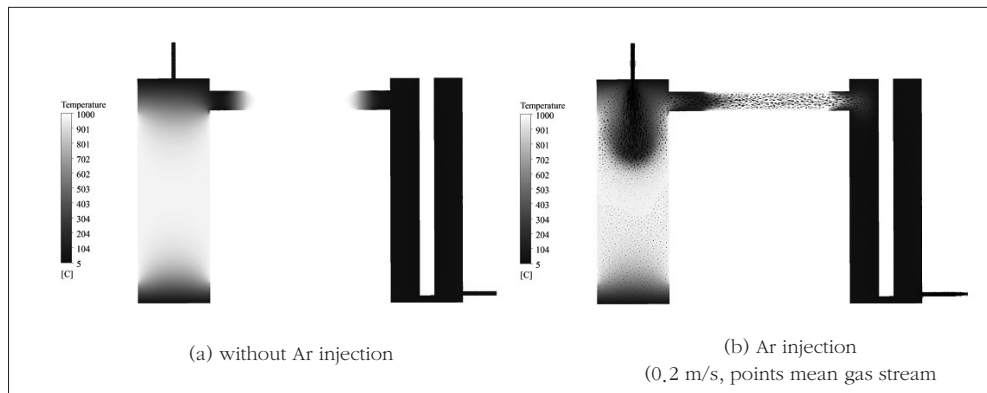


Fig. 4 Simulation results of temperature distributions and gas streams in the vacuum distillation test apparatus.

버 내부에 온도구배를 조성하여 운전할 수 있고, 온도구배를 이용하여 공융염 증기의 응축거동을 제어할 수 있으며, 휘발된 염의 소실 없이 응축염 회수용기에서만 휘발된 염을 대부분 침적시켜 회수할 수 있다.

희토류 침전물내 잔류하는 공융염의 증류시험에 앞서 운전조건에서 챔버 내부의 온도분포를 ANSYS CFX 상용코드를 이용하여 모사하였으며, 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 모사된 챔버 내부의 온도분포는 네 개 전기히터의 온도를 각각 950 °C, 950 °C, 780 °C 그리고 650 °C로, 냉각면의 온도를 50 °C로 설정한 경우의 결과로서 응축챔버 내부의 온도구배가 뚜렷하게 조성됨을 확인할 수 있다. 이 모사결과를 통해 진공증류/응축회수 시스템에서의 공융염 증기의 거동은 다음과 같이 예상할 수 있었다. 감압조건에서 공융염은 휘발챔버에서 휘발되어 다량의 공융염 증기가 발생되고 이때 공융염 휘발에 의해 발생된 공융염 증기로 인해 챔버 내부압력은 증가한다. 발생된 공융염 증기는 온도구배를 따라 응축챔버 상부로 이동한 후 다시 응축챔버내 온도구배를 따라 하부로 이동하면서 액상으로 응축되어 회수용기로 침강하고 침강된 염은 촛농과 같이 하나의 고상으로 침적되며 이 응축과정을 통해 증가된 내부압력은 감소된다.

ANSYS CFX 상용코드를 이용하여 모사된 결과를 확인하기 위해 챔버 내부 온도분포 모사에 사용된 운전조건으로 희토류 침전물내 잔류하는 공융염 증류를 위한 기초시험을 실시하였다. 이 시험에서 장치내부 온도를 측정한 결과 휘발챔버 내부온도(917-926 °C), 응축챔버 상부온도(779-800 °C), 응축챔버 중간부 온도(665-642 °C) 그리고 회수용기 바닥온도(44-52 °C)가 Fig. 6의 모사결과와 거의 일치하는 것으로 확인되었다. 증류기초시험 결과, 희토류 침전물에 잔류하였던 공융염은 증류시험 종료 후 잔류물내에서 검출되지 않았

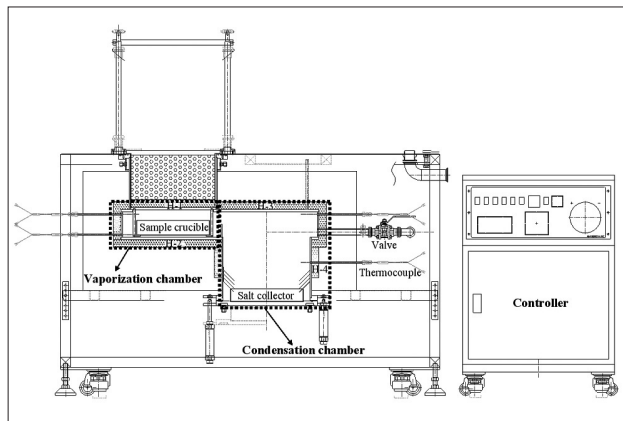


Fig. 5. A schematic diagram of the vacuum distillation/condensation recovery system.

고, 휘발된 공융염의 99 wt% 이상이 Fig. 7과 같이 회수가 용이한 하나의 덩어리 형태로 침적되었으며, 운전조건에서 챔버 내부압력이 증가하였다가 감소한 후 일정한 값으로 유지되었다. 이러한 결과는 챔버 내부 온도분포 모사결과를 통해 예상한 진공증류/응축회수 시스템내 공융염 증기의 거동과 내부압력의 변화와 거의 일치함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 통해 진공증류/응축회수 시스템을 이용하여 희토류 침전물내 잔류하는 공융염을 효과적으로 분리할 수 있고 휘발

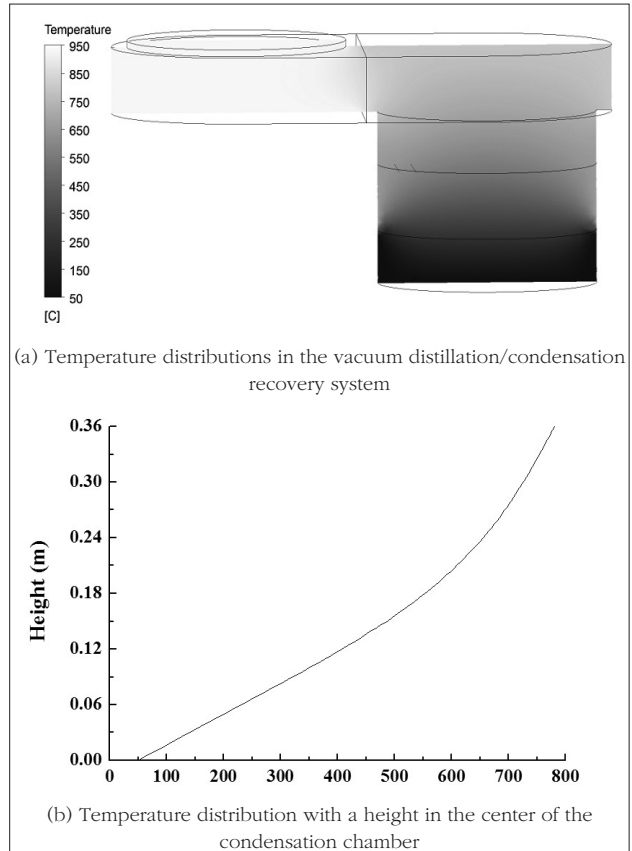


Fig. 6 Simulation results of temperature distributions in the vacuum distillation/condensation recovery system.

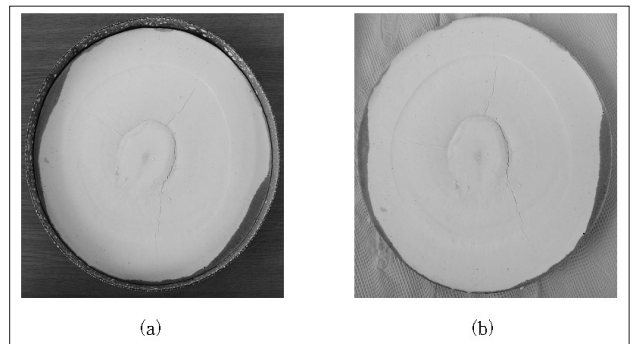


Fig. 7 Photos of the deposited salt in the salt collector (a) and the recovered salt from the salt collector (b).

된 공용염의 99 wt% 이상을 재활용이 가능한 형태로 회수할 수 있어 방사성폐기물 감량과 공정의 경제성 향상에 큰 도움이 될 것으로 판단되었다. 그러나 본 시스템에서 공용염의 휘발과 응축의 종료를 확인하는 것이 쉽지 않아 운전조건에서 공용염 증류시험을 장시간(10시간 이상) 수행해야 하는 단점이 있었으며, 이를 해결하기 위해 챔버 내부에서 공용염의 이동모델구축과 휘발 및 응축의 종료지표 도출을 위한 연구가 수반되어야 할 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

사용후핵연료 건식처리공정(pyrochemical process)에서 발생하는 방사성 공용염 폐기물의 감용을 위해 공용염내 희토류 염화물 산화침전공정 발생 희토류 침전물내 잔류하는 공용염의 휘발 및 응축특성을 살펴보았으며, 이 결과를 바탕으로 감압조건에서 온도구배를 조성하여 공용염 거동을 제어할 수 있는 진공증류/응축회수 시스템을 개발하였다. 이 시스템을 이용한 기초증류시험결과 희토류 침전물내 잔류하는 공용염을 효과적으로 분리 및 회수할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 공용염의 휘발 및 응축의 종료여부를 확인하는 것이 쉽지 않아 운전시간이 길어지는 문제점이 있었으며, 이를 해결하기 위한 연구가 부가적으로 수반되어야 할 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] O. Shirai, M. Iizuka, T. Iwai, Y. Arai, "Electrode reaction of Pu³⁺/Pu couple in LiCl-KCl eutectic Melts: Comparison of the electrode reaction at the surface of liquid Bi with that at a solid Mo electrode," *Analytical Sciences*, 17, pp. 51-57 (2001).

[2] 유재형, 이병직, 이한수, 김응호, "고온전해분리 기술의 개요 및 기존 핵연료주기 대체 기술로서의 적합성 검토", *방사성폐기물학회지*, 5(4), pp. 283-295 (2007).

[3] 은희철, 양희철, 조용준, 이한수, 김인태, "산화조건에서 PrCl₃의 열적거동", *방사성폐기물학회지*, 7(4), pp.

207-212 (2007).

[4] Y. J. Cho, H. C. Yang, H. C. Eun, E. H. Kim and J. H. Kim, "Oxidation of Lanthanum Chloride in a LiCl-KCl Eutectic Molten Salt Using Oxygen Sparging Method," *J. Ind. Eng. Chem.*, 11(5), pp. 707-711 (2005).

[5] Y. J. Cho, H. C. Yang, H. C. Eun, E. H. Kim, I. T. Kim, "Characteristics of oxidation reaction of rare-earth chlorides for precipitation in LiCl-KCl molten salt by oxygen sparging," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 43(10), pp. 1280-1286 (2006).

[6] 양희철, 은희철, 김인태, "희토류 침전물로부터 LiCl-KCl 공용염의 증류 분리에 관한 기초연구", *방사성폐기물학회지*, 8(1), pp. 65-70 (2010).

[7] H. C. Eun, H. C. Yang, Y. Z. Cho, H. S. Park, H. S. Lee, I. T. Kim, "Stabilization of rare earth nuclides in LiCl-KCl eutectic salt wastes", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 208(3), pp. 643-649 (2009).

[8] Y. Z. Cho, H. C. Yang, G. H. Park, H. S. Lee, I. T. Kim, "Treatment of a waste salt delivered from an electrorefining process by an oxidative precipitation of the rare earth elements", *J. Nucl. Mater.*, 384, pp. 256-261 (2009).

[9] B. R. Westphal, K. C. Marsden, J. C. Price, D. V. Laug, "On the development of a distillation process for the electrometallurgical treatment of irradiated spent fuels", *Nucl. Eng. Tech.*, 40(3), pp. 163-174 (2008).

[10] T. Koyama, T. Hijikata, T. Usami, T. Inoue, S. Kitawaki, T. Shinozaki, J. M. Fukushima, M. Myochin, "Integrated experiments of electrometallurgical pyroprocessing using plutonium oxide", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44(3), pp. 382-392 (2007).

[11] H. C. Eun, H. C. Yang, Y. J. Cho, H. S. Park, E. H. Kim, I. T. Kim, "Separation of pure LiCl-KCl eutectic salt from a mixture of LiCl-KCl eutectic salt and rare-earth precipitates by vacuum distillation", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44(10), pp. 1295-1300 (2007).

[12] H. C. Eun, H. C. Yang, H. S. Lee, I. T. Kim, "Distillation and condensation of LiCl-KCl eutectic

salts for a separation of pure salts from salt wastes from an electrorefining process", *J. Nucl. Mater.*, 395, pp. 58–61 (2009).