

공학규모 전해제련 장치의 설계를 위한 열전달 해석

윤달성*, 백승우, 김시형, 김광락, 권상운, 심준보, 안도희

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

*UST(University of Science and Technology)

yds0127@kaeri.re.kr

1. 서론

원자력을 이용한 발전량이 증가함에 따라 사용 후 핵연료가 계속적으로 누적되고 있으며, 이 사용후핵연료의 처리, 처분 문제가 현안으로 등장하고 있다. 따라서 누적된 사용 후 핵연료의 부하를 감소시킬 목적으로 최근 Pyroprocessing 공정이 개발되었으며, 여러 국가에서 활발히 연구 되고있다. Pyroprocessing 공정 중 전해제련 공정에서는 순수한 우라늄을 회수한 후 용융염 내의 TRU원소 및 악티나이드계 원소를 동시에 회수하기 때문에 핵 확산 저항성의 관점에서 중요한 공정으로 인식되고 있다. 한국원자력연구원(KAERI)에서는 우라늄과 초 우라늄 군을 액체 카드뮴용융염을 이용하여 동시에 회수 하는 전해 제련 연구를 실험실 규모로 진행 중이다. 본 연구에서는 공학규모 전해제련 장치의 설계를 위하여 실험실 규모 전해제련 장치의 열전달 해석을 수행하여 그 타당성을 판단하고, 공학규모 장치의 크기와 구조에 따른 열 분포 특성을 연구하였다. 전해 실험을 수행하기 위해서는 용융염 내부의 온도분포가 일정해야 하며, 카드뮴의 증발을 줄이고 장치의 뒷개에서 원활하게 전극과 교반기 등을 사용하기 위해서는 상부 덮개 부분의 아르곤 가스의 온도가 낮아야 한다. 따라서 장치 내부의 가열부와 냉각부의 크기와 상부 냉각 관의 구조 등을 변수로 설정하여 내부의 용융염과 Ar가스의 온도분포를 규명하는데 중점을 두었다. 상용전산코드인 Ansys CFX 유동해석 프로그램을 이용하여 본 연구를 수행 하였다.

2. 실험 및 결과

실제 실험실 규모의 전해제련 장치는 Fig.1에 나타난 바와 같이 장치의 총 높이 370mm, 직경 210mm의 원통형이며, 바닥 면 전체와 아래로 부터 300mm 높이에서 가열을 하며, 그 위로 50mm 높이만큼 냉각한다. 냉각부와 같은 높이에 직경 150mm의 냉각 관이 설치되었으며, 용융염은 직경과 높이가 150mm로 각각 설정되었다. 본 연구에서는 Ar과 용융염은 실제 물성 치와 동일하게 적용되었으며, 장치 내 온도분포의 해석결과 Fig.2와 같이 시뮬레이션의 경우 용융염 위쪽의 Ar 온도가 조금 높은 경향이 있었지만, 전체적인 온도 분포의 경향성은 실제 장치와 일치하는 것으로 생각 된다.

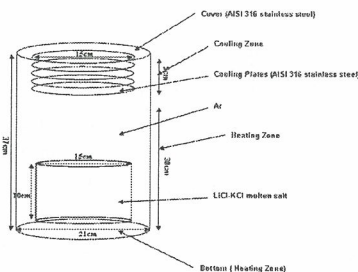


Fig.1. lab-scale 전해제련장치

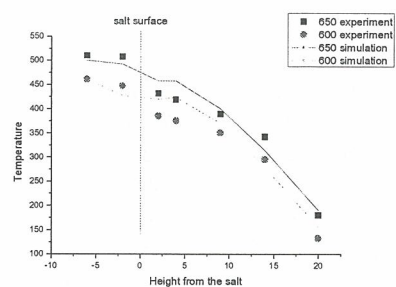


Fig.2. lab-scale 전해제련장치

공학규모 전해제련장치의 기본설계는 용융염의 양 50 kg (D : 400mm H: 250mm)을 기준으로 하며, Table 1과 같이 각 시뮬레이션의 운전변수를 가열부와 냉각부의 길이 및 냉각관의 개수와 직경 등으로 설정하였으며, Table 2에 각 운전변수에 따른 열전달 해석의 결과를 나타내었다. 가열부를 600°C로 가열하였을 경우 가열부의 길이가 용융염 높이의 2.5배 이상(620 mm)일 때 용융염의 평균온도가 500°C 이상

으로 유지되었으며 용융염 내의 온도구배도 5°C 이하였다. 냉각부의 길이는 길어질수록 상부 덮개 아래의 Ar 온도를 낮게 유지할 수 있었지만, 용융염의 높이의 0.5배 이상(120mm)이 되면 용융염의 평균온도가 500°C 이하로 하강하며 온도 편차도 10°C 이상이 된다. 냉각관은 5개 이상 냉각부 영역에 설치되었을 경우 상부 덮개 아래의 Ar 온도를 200°C 이하로 낮게 유지할 수 있었다. 직경 410 mm 이상의 냉각관을 사용하여야 Ar 온도를 200°C 이하로 유지 하였으며, 용융염 내부의 온도 편차도 줄어들었다. 따라서 여러 개의 직경이 큰 냉각관이 냉각부와 가열부를 효율적으로 차단하여 Ar의 온도구배를 최소화 할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 1. 각 시뮬레이션의 운전변수

	SET H-1	SET H-2	SET H-3	SET H-3
가열부 길이	370 mm	500 mm	620 mm	750 mm
	냉각부 길이 : 120 mm 냉각관 개수 : 6 (D : 420mm)			
	SET C-1	SET C-2	SET C-3	SET C-4
냉각부 길이	50 mm	100 mm	120 mm	150 mm
	가열부 길이 : 620 mm 냉각관 개수 : 6 (D : 420 mm)			
	SET P-1	SET P-2	SET P-3	SET P-4
냉각관 개수	0	1	3	6
	가열부 길이 : 620 mm, 냉각부 길이 : 120 mm 냉각관 직경 : 420mm			
	SET PD-1	SET PD-2	SET PD-3	SET PD-4
냉각관 직경	420 mm	410 mm	400 mm	390 mm
	가열부 길이 : 620 mm, 냉각부 길이 : 120mm 냉각관 개수 : 6			

Table 2. Ar, 용융염 온도분포 해석 결과

	Salt Temp (°C).	At Temp. under cover (°C)	Transtion of the Temp. in the salt(°C)
SET H-1	440	125	14
SET H-2	485	127	10
SET H-3	503	125	7
SET H-4	520	120	5
SET C-1	556	199	6
SET C-2	526	154	6
SET C-3	503	125	7
SET C-4	495	127	18
SET P-1	479	335	18
SET P-2	498	247	12
SET P-3	503	183	8
SET P-4	503	125	6
SET PD-1	514	100	6
SET PD-2	503	125	7
SET PD-3	499	227	13
SET PD-4	494	247	13

3. 결론

본 연구에서는 공학규모의 액체음극 전해제련 장치의 설계를 위하여 장치의 크기와 구조에 따른 열분포 해석을 CFX 상용코드를 이용하여 정량적으로 수행하였다. 용융염 50 kg 기준의 공학규모 전해제련 장치에서는 가열부의 길이를 620 mm 이상으로 설정해야 하고 냉각부의 길이는 120 mm 이하로 설계하여야 용융염의 온도를 500°C 이상으로 유지할 수 있으며 용융염 내부의 온도 편차도 최대한으로 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 장치를 설계할 경우 전체 높이는 750mm 가 되며, 공학규모 장치를 운전하는데 제한을 받지 않는 규모이다. 또한 5개 이상의 냉각관을 설치하면 아르곤 가스가 냉각부와 잘 접촉하여 장치 상부의 아르곤 온도를 200°C 이하로 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 냉각관의 길이 또한 Ar의 온도와 용융염의 온도 분포에 영향을 미치므로 그 크기를 잘 조정해야 한다. 본 장치에서는 410mm 이상의 냉각관이 설치 될 경우 용융염의 온도가 일정하게 유지되는 것을 기대할 수 있었다. 본 연구에서 얻어진 자료를 통하여 장치 내부의 아르곤과 용융염의 온도 분포의 특성을 예상할 수 있어 공학규모의 전해제련 장치의 설계에 직접적으로 적용 될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.