

네오디뮴 금속의 전해 채취 중의 열수지

§조성욱* · 유정현* · 최호길**

*한국지질자원연구원 자원활용연구본부, **서울대학교 재료공학부

Heat Balance during the Electrowinning of Neodymium Metal in Molten Salt

§Sung-Wook Cho*, Jeong-Hyun Yu* and Ho-Gil Choi**

*Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

**Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

요 약

용융염 전해 채취 공정에서 가장 중요한 경제 지표 중 하나는 에너지 원단위(kwh/kg of metal)이다. 이는 외부로 손실되는 에너지와 전류 효율에 관련된다. 전류 효율은 전해온도에 의해 크게 좌우된다. 한편 염욕의 온도는 전해 초기에 염욕의 열수지 차이로 인해 급격히 상승하여 처음에 목표했던 전해온도와 상이해질 수 있다. 염욕의 의도치 않은 온도 변화는 전류 효율에 악 영향을 미친다. 따라서 전해 초기를 대상으로 열수지 검토를 통해 염욕의 온도 변화에 대한 계산치와 실측치를 비교해 보고 외부로 손실되는 에너지를 평가하는 것은 에너지 원단위를 줄이는 데 도움이 될 것이다. 본 논문에서는 저자들의 실험 데이터를 이용하여 용융염 전해 채취 중의 열수지에 대해 검토하였으며 이를 통해 외부로의 열 손실과 염욕의 온도 상승을 정량적으로 평가할 수 있었다. 이와 같은 방법을 통하면 열 손실을 줄일 수 있는 방안을 도출하고 전해온도를 제어하여 전류 효율을 제고시킴으로써 에너지 원단위를 줄일 수 있다.

주제어 : 용융염 전해, 네오디뮴, 열수지, 에너지 원단위, 전해온도, 전류 효율

Abstract

Energy consumption per unit weight of metal (kwh/kg of metal) is one of the most important economic indicators in the process of molten salt electrolysis. It is related to the heat loss of salt bath and the current efficiency of the process. The current efficiency is highly dependent on electrolysis temperature. On the other hand, the temperature of salt bath may increase significantly due to the difference (larger energy input than consumption) in heat balance at the beginning of electrolysis, which may cause different electrolysis temperature from an initially targeted value. This results in a bad effect on current efficiency. Therefore, it will be helpful to the reduction of energy consumption to compare the calculated and measured values of the temperature change of salt bath through the heat balance review at the early stage of electrolysis and to evaluate the energy loss to outside. In this study, based on the authors' experimental data, the heat balance was reviewed at the beginning of the electrolysis, and it was possible to evaluate the energy loss to the outside and the increase of the temperature of the salt bath quantitatively. Through such a method, heat loss reduction plan can be derived and current efficiency can be improved so that energy consumption can be reduced.

Key words : molten salt electrolysis, neodymium, heat balance, energy consumption, electrolysis temperature, current efficiency

· Received : May 15, 2022 · Revised : June 15, 2022 · Accepted : June 24, 2022

§ Corresponding Author : Sung-Wook Cho (E-mail : cho@kigam.re.kr)

Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

전해 채취는 고온에서 화학적 활동도를 갖는 금속 용융염의 전해를 통해 금속 이온을 금속 또는 합금으로 환원시키는 전해 증착 공정으로, 물과의 반응성이 큰 알칼리 금속, 희토류, 알루미늄 등 주요 활성 금속의 생산에 이용되고 있다. 특히 희토류의 경우 비점이 낮은 몇 가지 원소를 제외하고 대부분의 희토류 금속과 합금들이 용융염 전해 채취에 의해 생산되고 있다¹⁻³⁾.

용융염 전해 채취 공정에서 가장 중요한 경제 지표 중 하나는 에너지 원단위(energy consumption per unit weight of metal: kWh/kg of metal)로서, 이를 낮추기 위해서는 외부로 손실되는 에너지를 줄이거나 전류 효율을 향상 시켜야 한다.

Yin 등⁴⁾은 에너지 절감 방향과 방법을 검토하기 위하여 3kA급 용융염 전해조의 열평형 계산을 통해 전해의 에너지 소비 상황을 이해하고 에너지 손실 감소를 위한 제언을 하였다. 또한 Wang 등⁵⁾도 10kA급 하부 음극 용융염 전해조의 열평형 계산을 통해 전해조 내 에너지 구성, 이용 수준을 파악하고 에너지 저감 방법에 대해 검토하였다.

한편, 전류 효율은 전기 분해에 관한 패러데이 법칙에 의해 전극에서 석출(환원)되는 단위 시간 당 이론 석출량(인가전하량/(화학당량×패러데이상수))에 대한 실제 석출량의 비율이다. 전류 효율은 전해지지염의 물성, 전해 온도, 전압 및 전류의 세기, 전해시스템의 구성 등 여러 요인에 의해 달라진다. 특히 전해온도는 전해지지염의 유동성, 증발, 석출금속의 재용해 등에 영향을 미치므로 전류 효율을 크게 좌우한다. 따라서 전해온도는 전해지지염과 석출금속의 용점을 고려하되 적절하게 결정되는 것이 매우 중요하다.

그러나 용융염 전해 시 외부로부터 투입되는 전기 에너지와 양극에서의 가스 발생에 기인한 발열량 대비 전해에 소모되는 에너지 및 외부로의 손실 에너지 차이, 즉 열수지로 인해 전해 초기에 염욕의 온도가 급격히 상승할 수 있다. 염욕의 온도는 전해 시작 후 일정 시간이 지나면 전체적으로 열평형을 이루게 되어 일정 온도로 유지되는데 이때 처음에 목표했던 전해온도와 상이해질 수 있으며 이는 전류 효율에 악 영향을 미친다.

앞서 언급하였던 Yin 등⁴⁾과 Wang 등⁵⁾은 입력되는 직류 전기에너지로 전해 반응과 열평형을 유지하는 상태에

서 열평형 계산을 실시하여 염욕의 온도 변화를 고려하지 않았으나 본 보고에서는 전해 초기 염욕의 온도 상승에 주목하여 전해 초기를 대상으로 열수지 검토를 실시하였다.

본 연구에서 사용한 전해 장치는 인용 문헌^{4,5)}이나 공업 전해조와 달리 전해 온도까지 전해조를 승온하기 위한 가열용 교류 전원과 전해용 직류 전원으로 구성되어 있어 전해 개시 후 교류 전원을 차단하지 않으면 전해 중 교류 에너지도 짧게나마 간헐적으로 공급될 가능성이 있다. 그러나 이런 경우에도 교류 공급에 대한 별도의 실시간 전력 모니터링 장치를 갖춘다면 후술하는 전해 열수지 계산에 이를 반영하고 열평형 계산을 실시할 수 있다.

본 연구에서는 앞서 언급대로 전해 초기 수 분간에 주목하였으며 그 시간 동안에는 교류 전원을 차단하지 않았음에도 교류 에너지의 공급은 관찰되지 않았다. 이와 같은 사실을 바탕으로 전해 초기의 열수지 계산을 실시하였으며, 이를 통해 염욕의 온도 변화에 대한 계산치와 실측치를 비교해 보고 외부로 손실되는 에너지를 평가하였다.

이와 같은 인식과 접근을 통하면 에너지 손실(또는 이용률)의 관점에서 전해시스템의 평가 및 개선과 전류 효율의 관점에서 유사 공정의 전해온도 변화 예측, 즉 에너지 원단위 저감에 도움이 될 것이다. 전보⁶⁾에서 Nd 금속의 전해 채취 중 전류 효율에 미치는 전해 인자의 영향에 대해 보고한 바 있으므로, 본 논문에서는 저자들의 실험 데이터를 이용하여 용융염 전해 채취 중의 열수지에 대해 보고하고자 한다.

2. 실험방법

Fig. 1에 용융염 전해 실험 장치의 개략도⁶⁾를 나타내었다. 전해 장치는 가열용 교류 전원과 가열로, 가열로 내부의 전해조, 전해용 직류 전원과 전극, 배가스용 후드와 스크러버, 전해 데이터 표시 및 수집 장치 등으로 구성되어 있다. 전해조로는 240h×70∅×10t의 크기를 지닌 원통형의 graphite 도가니, 음극으로는 원통 중심에 위치하여 용융염 내 침지 깊이 조절이 가능한 직경 20∅의 텅스텐 봉, 양극으로는 graphite 도가니를 사용하였다. 가열로의 상부는 배가스, 원료의 추가 장입, 염욕의 온도 측정 등을 위한 구멍들이 가공된 세라믹 보드로 덮었다.

전해지지염으로 LiF-NdF₃-BaF₂ 3원계 염을 사용하였으며 그 구성비는 무게비로 LiF:NdF₃:BaF₂ = 7.5:67.4:25.1

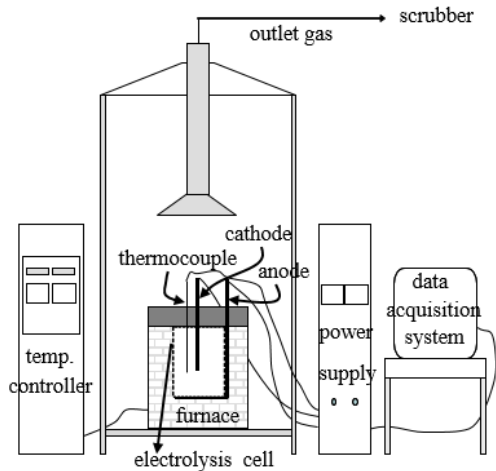


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus⁶⁾.

이었다⁶⁾. 전해지지염의 투입량은 다음과 같이 결정되었다. 미리 정해진 인가전류와 양극 전류 밀도로부터 양극 (graphite 전해조)과 전해지지염의 접촉 면적을 계산한 후 이로부터 전해지지염의 부피를 구하였다. 부피는 전해지지염의 고체 평균 밀도를 이용하여 무게로 환산되었다. 그러나 실제 전해 시 전해지지염의 액체 밀도는 고체 밀도보다 작으므로 부피는 증가하고 양극 전류 밀도는 예정된 값보다 작아질 것이다. 그러므로 양극 전류 밀도 값을 보다 정확히 알기 위해서는 용해된 전해지지염의 전해조 내 부피를 실측할 필요가 있다. 본 연구에서 전해지지염의 총량은 2,485g이었으며 초기 혼합되는 Nd_2O_3 량은 용해도⁷⁾ 이 내가 되도록 NdF_3 와 LiF 총량의 1.5 wt%, 즉, 27.9g이었다.

전해지지염과 초기에 장입되는 원료 Nd_2O_3 를 잘 혼합한 후 graphite 도가니에 장입할 수 있는 만큼 최대한으로 장입하고 가열로를 가열하였다. 전해조 내 온도가 상승하여 전해지지염의 용점에 이르면 지지염의 용해가 시작되고 전해조 내 전해지지염의 장입 높이가 감소한다. 부피 문제로 초기에 장입하지 못한 여분의 전해지지염을 추가로 장입하고 용해시켰다. 용해가 완료되고 온도가 재 상승하여 목표하는 전해온도에 도달하면 교류 전원을 차단하지 않은 채 직류 전원을 인가하여 전해를 시작하였다. 앞서 언급하였듯 전해 개시 후 교류 전원을 차단하지 않으면 전해 중 교류 에너지도 짧게나마 간헐적으로 공급될 가능성이 있다. 그 양상은 전해조의 보온성에 따라 다를 수 있으므로 전해 열평형 상태에서 검토를 위해서는 전해 중 조금

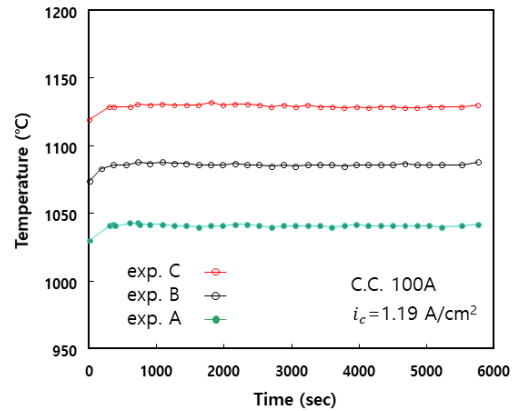


Fig. 2. The temperature changes of the salt baths during electrolysis in constant current mode (C.C.: constant current, i_c : cathodic current density).

이라도 인가되는 교류 에너지를 모니터링 할 별도의 장치가 필요하나 본 연구에서 사용된 전해 장치는 이를 갖추고 있지 못하였다. 다만, 전해 실험 중 간헐적 관찰에 의해서는 교류 에너지의 공급을 확인할 수 없었다. 더욱이 적어도 본 연구에서 주목하는 전해 초기 수 분간은 교류 에너지의 공급이 없었음은 육안으로 확인하였고 따라서 후술하는 열수지 계산에서 이를 배제할 수 있었다.

실험은 1030~1130°C의 범위에서 실시되었다. 즉, 음극에서 Nd금속을 액상으로 회수하기 위하여 Nd의 용점 (1021°C) 이상이 되 전해지지염의 증기압과 석출 금속의 재 용해^{6,8-11)}를 고려하여 최고 1130°C를 초과하지 않도록 하였다. Fig. 2는 실험 온도 범위를 대표할 수 있는 서로 다른 3개의 실험 온도에서 실측된 전해 중의 염욕 온도 변화를 실험 조건과 함께 나타낸다. 실험에 대한 보다 상세한 내용과 전해 온도의 영향 등은 전보⁶⁾를 참고하기 바란다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 전해 시작 후 약 5분 이내에 염욕의 온도가 약 10°C 상승하고 이후에는 거의 일정한 온도로 유지됨을 나타내고 있다. 전해 조건이나 전해시스템에 따라서 온도 상승 정도가 더욱 커질 수 있다. 이는 앞서 언급하였듯이 전해 온도, 즉 전류 효율에 큰 영향을 미친다.

Yin 등⁴⁾과 Wang 등⁵⁾은 열평형 상태에서의 계산을 통해 전해 시 에너지 투입량과 소모량의 차 ΔQ 가 모두 외부

와의 열 출입, 즉, 외부로 손실되는 것으로 보고 전해조 측면, 상부, 액면, 하부 등으로 구분하여 계산함으로써 열 손실 관점에서 고찰하였으나 본 연구에서는 전해조 내 용융염의 초기 온도 변화와 외부로의 열 손실을 함께 고려하고자 한다. 또한 Wang 등⁵⁾은 양극에서의 발생 가스를 모두 CO라고 가정한 반면 Yin 등⁴⁾은 CO:CO₂가 85:15로 발생 하는 것으로 가정하였다. 그러나 C, CO, CO₂ 간의 Boudouard Reaction(2CO=C+CO₂)을 고려하면(980°C에서 $P_{CO_2}/P_{CO} = 1/100$) 본 연구에서의 실험 온도인 1030°C 이상에서는 CO₂의 발생(<1%)이 무시 가능하며 거의 CO만 발생하는 것으로 가정해도 좋을 것이다.

용융염 전해 중의 열수지를 고려하기 위하여 다음과 같이 정의한다.

- $Q_{i,1}$: 전해에 투입되는 직류 전기에너지
- $Q_{i,2}$: 양극에서 발생하는 CO 가스의 생성에너지
- $Q_{o,1}$: 전해 중 추가 장입된 Nd₂O₃의 가열에너지
- $Q_{o,2}$: 전해 중 추가 장입된 Nd₂O₃의 분해에너지
- $Q_{o,3}$: CO 가스 버블링에 의한 에너지 소모

여기서 i는 energy in, o는 energy out을 의미한다.

이때 아래의 식 (1)과 같이 쓸 수 있으며

$$Q_{i,1} + Q_{i,2} = Q_{o,1} + Q_{o,2} + Q_{o,3} + \Delta Q \dots \quad (1)$$

energy in, energy out 차이인 ΔQ 가 전해조의 온도 변화와 전해시스템-외부 간의 열 출입에 관련된다는 것을 알 수 있다.

식 (1)을 단위 시간(한 시간)에 대해 고려하면,

$$Q_{i,1} = V \times I \times t (\text{volt} \cdot \text{ampere} \cdot \text{sec}) = 3.6 VI \text{ kJ} \dots (2)$$

$$Q_{i,2} = N_{CO} \times \Delta G_{CO} \dots \quad (3)$$

$$N_{CO} (\text{mol}) = \text{current efficiency} \times I \times \frac{3600 \text{sec}}{nF} \dots \quad (4)$$

여기서 N_{CO} 는 한 시간 당 생성되는 CO 가스의 몰 수, ΔG_{CO} 는 온도 T에서 CO 가스의 생성에너지¹²⁾ ($\Delta G_{CO} =$

$-27,340 - 20.5T$ cal/mol), n 은 생성 가스의 기중평균 화학당량($n=2$), F 는 Faraday 상수(96,487A·sec/mol)를 의미한다.

한편, $Q_{o,1}$, $Q_{o,2}$, $Q_{o,3}$ 는 각각 다음과 같다.

$$Q_{o,1} = N_{Nd_2O_3} \times \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \dots \quad (5)$$

$$Q_{o,2} = E_{Nd_2O_3} \times I \times t = 3.6 E_{Nd_2O_3} I \text{ kJ} \dots \quad (6)$$

$$Q_{o,3} = N_{CO} \times \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \dots \quad (7)$$

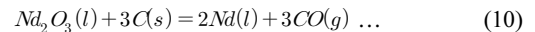
위에서 $N_{Nd_2O_3}$ 는 한 시간 당 첨가된 Nd₂O₃의 몰 수, $E_{Nd_2O_3}$ 는 온도 T에서 Nd₂O₃의 분해환원전위를 나타낸다.

Nd₂O₃와 CO의 C_p 값⁴⁾은 각각 아래의 식 (8)과 (9)를 이용하였다.

$$C_{p,Nd_2O_3} = 115.66 + 0.2976T - 1.19 \times 10^{-4} T^2 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \dots \quad (8)$$

$$C_{p,CO} = 28.4 + 4.1 \times 10^{-3} T - 0.46 \times 10^{-5} T^2 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \dots \quad (9)$$

한편, 온도 T에서 Nd₂O₃의 분해환원전위 $E_{Nd_2O_3}$ 는 양극에서 CO 가스만 발생하는 것으로 가정했을 때 아래의 반응식 (10)으로부터 구할 수 있다.



즉,

$$E_{Nd_2O_3} = E_{Nd_2O_3}^o - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{a_{Nd}^2 P_{CO}^3}{a_{Nd_2O_3} a_C^3} \right) \dots \quad (11)$$

식 (11)에서, $E_{Nd_2O_3}^o$ 는 Nd₂O₃의 표준환원전위, R 은 기체상수 8.314 J/mol·K, T 는 절대온도 K, n 은 반응에 참여한 전자 수 6, F 는 Faraday 상수, a 와 P 는 각 상의 활동도 및 분압을 의미한다. Fig. 2에 나타난 실험들의 전해시작

Table 1. The experimental data and the calculation results for the difference in heat balance (C.E.: current efficiency, E.S.T.: electrolysis start temperature)

Cat.	Experimental Data						Calculation Results	
	Exp.	C.E. (%)	$N_{Nd_2O_3}$ (mol/hr)	Room Temp. T_1 (K)	E.S.T. T_2 (K)	Current (A)		Voltage (V)
A		60.0	0.421	301	1303	93.6	4.17	988.8
B		50.3	0.421	301	1348	95.0	4.20	989.1
C		43.7	0.421	301	1392	94.8	4.00	902.4

Table 2. The weights and the specific heats per mole of the constituents in the salt baths (G.C.: graphite crucible, T.C.: Tungsten Cathode, TC: thermocouple)

Cat.		NdF ₃	LiF	BaF ₂	Nd ₂ O ₃ (initial charge)	G.C.	T.C.	Al ₂ O ₃ TC
Weight (in mol)		8.32	7.19	3.56	0.08	98.83	7.67	0.98
Specific Heat (J/mol·K)	A (1303K)	122.85	64.35	130.36	301.39	23.14	28.30	128.82
	B (1348K)	123.93	64.35	118.15	300.59	23.28	28.45	129.43
	C (1392K)	124.98	64.35	118.15	299.34	23.41	28.59	130.01

온도인 1303K, 1348K, 1392K에서 반응식 (10)의 ΔG^o 값은 Factsage 8.0 FactPS 데이터베이스¹³⁾로부터 각각 729.9 kJ/mol, 706.5 kJ/mol, 683.6 kJ/mol이다. 따라서 아래의 식 (12)를 통해 표준환원전위 $E_{Nd_2O_3}^o$ 로 환산할 수 있으며 그 값들은 각각 -1.2607V, -1.2203V, -1.1809V이다.

$$\Delta G = -nFE \dots \quad (12)$$

또한 액상 Nd의 활동도는 1, CO 가스의 분압은 1, C의 활동도는 1로 가정하였으며 전해지지염에 용해된 Nd₂O₃의 활동도는 용융 불화물 내 Y₂O₃의 활동도를 제시한 선행 연구¹⁴⁾를 참고하여, 이상 용액을 가정했을 때인 4.178×10^{-3} 과 1×10^{-9} 사이의 값을 갖는다고 가정하였다.

식 (11)에 이상의 값들을 대입하면 1303K에서 Nd₂O₃의 분해환원전위 $E_{Nd_2O_3}$ 의 범위는 -1.363V부터 -1.649V 까지이며, 1348K에서는 -1.326V부터 -1.621V, 1392K에서는 -1.290V부터 -1.595V까지이다. 이하 계산에서는 중간 값, 즉, 1303K에서는 -1.506V, 1348K에서는 -1.474V, 1392K에서는 -1.443V를 Nd₂O₃의 분해환원전위 $E_{Nd_2O_3}$ 의 값으로 사용하였다.

이제, 식 (1)에서의 ΔQ 를 상기 식 (2)~(9), 식 (11), 전

류 효율, 한 시간 당 첨가된 Nd₂O₃의 몰 수($N_{Nd_2O_3}$), T_1 (실온), T_2 (전해시작온도), 인가 전류 및 전압 등 실험 데이터를 이용하여 하기 식 (13)으로부터 구할 수 있다.

$$\Delta Q = (Q_{i,1} + Q_{i,2}) - (Q_{o,1} + Q_{o,2} + Q_{o,3}) \dots \quad (13)$$

아래 Table 1에 Fig. 2에 나타난 실험들의 실제 데이터와 이 값들을 이용하여 위와 같이 계산한 각 실험에 대한 식 (13)의 결과를 정리하였다. 참고로 Table 1에는 계산 결과로서 ΔQ 값만 나타내었으나 계산 과정에서 순차적으로 얻어지는 식 (13)의 각각의 에너지 요소에 대한 값들도 알 수 있다.

이로부터 전해 초기에 염욕의 온도 상승분을 계산하고 실제와 비교해 볼 수 있다. 즉, Fig. 2에서 염욕의 온도가 상승한 시간을 초기 5분이라 가정하면, Table 1에서의 ΔQ 값(열 손실이 없을 경우 한 시간 동안 누적되는 열량)을 5분으로 환산하고 전해조 구성물들의 중량과 비열¹⁵⁾을 고려하면 염욕의 온도 상승분을 계산할 수 있다. 전해조 구성물들은 실험 차수에 관계없이 모두 동일하였고 각각의 비열은 전해시작온도의 값으로 가정하였다. Table 2에 전해조 구성물들의 중량과 비열을 나타내었고 Table 3에 결과를 나타내었다.

Table 3. Comparison of measured and calculated values for the temperature increase at the early stage of electrolysis (E.S.T.: electrolysis start temperature)

Exp.	ΔQ (kJ/initial 5min.)	E.S.T. T_2 (K)	Calculated ΔT (K)	Measured Temp. (K) (Mea. ΔT)
A	82.40	1303	17.9	1314 (11)
B	82.43	1348	18.0	1359 (11)
C	75.20	1392	16.3	1402 (10)

Table 3으로부터, 전해 초기 5분간 외부로의 열 손실이 없다고 가정했을 경우, 실험 A, B, C 각 염욕의 온도는 17.9°C, 18.0°C, 16.3°C 상승할 것임을 알 수 있다. 그러나 실제로는 각각 11°C, 11°C, 10°C 상승했을 뿐이므로, 각 실험에 대해 실제 온도 상승에 사용된 열량과 손실되는 열량을 구분 지을 수 있으며, 이 값들은 실험 A의 경우 각각 50.64kJ(61.5%), 31.76kJ(38.5%), B의 경우 49.97kJ(60.6%), 32.46kJ(39.4%), C의 경우 46.07kJ(61.3%), 29.12kJ(38.7%)임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Nd 금속 제조를 위한 산화물 용융염 전해에 대한 저자들의 실험 데이터를 이용하여 전해 초기의 열수지에 대해 고찰하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다. 용융염 전해 중의 열수지 계산에 의해 전해 초기 염욕의 온도 변화에 대한 계산치와 실측치의 비교를 통해 외부로의 열 손실과 염욕의 온도 상승을 정량적으로 평가할 수 있었다. 본 연구의 경우 염욕의 온도 상승기인 초기 5분 동안 열 출입 간 잉여 열의 61%는 온도 상승에 기여하였고 39%는 외부로 손실되었다. 이와 같은 방법을 통하면 열 손실 측면에서 전해시스템을 평가할 수 있고 이후 유사 공정에서의 전해온도 변화를 예측할 수 있다. 따라서 외부로의 열 손실 저감 방안을 도출하고 전해온도 제어를 통해 전류 효율을 제고시킴으로써 용융염 전해 채취 공정에서 가장 중요한 경제성 지표 중 하나인 에너지 원단위 저감에 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회에 의해 지원된 창조형 융합연구사업 “국내산 희토류광으로부터 희토류소재 제조기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. S. Yan, Z. Li, B. Zhao, et al., 2005 : Status and development prospects of China's rare earth metal industry, *Chinese Rare Earths*, 26(2), pp.81-86.
2. S. Pang, S. Yan, Z. Li, et al., 2011 : Advances in manufacturing technology of rare earth metals and their alloys by molten salt electrolysis in China, *Chinese J. Rare Met.*, 35(3), pp.440-450.
3. H. Lin, 2003 : Production and application of metallic neodymium, *Powder Metallurgy Industry*, 13(1), pp.34-39.
4. X. Yin, Z. Liu and Y. Cao, 2002 : Thermal equilibrium calculation of rare earth molten salt electrolyzer, *J. Baotou Univ. Iron and Steel Technology*, 21(1), pp.19-22.
5. J. Wang, C. Wang, G. Tu, et al., 2008 : Thermal equilibrium calculation of rare earth molten salt electrolyzer with 10kA bottom cathode, *Chinese Rare Earths*, 29(5), pp.61-63.
6. S.-W. Cho and J.-H. Yu, 2022 : Electrowinning of neodymium metal using FLiNdBa molten salt, *KJMM*, 60(2), pp.124-131.
7. Ram A. Sharma, 1987 : Neodymium production processes, *JOM*, 39(2), pp.33-37.
8. T. Shimada, N. Tedzuka, Y. Shimizu, et al., 1994 : Electrochemical reduction of uranium oxide in molten fluoride mixture, *JALCOM*, 204, pp.1-4.
9. D. Chen, S. Yan, Z. Li, et al., 2008 : Investigation on the dissolution of neodymium metal into molten salt and the formation of sludge, *Chinese J. Rare Met.*, 32(4), pp.482-484.
10. T. Shimada, N. Tedzuka, Y. Shimizu, et al., 1993 : Dissolution of lanthanide metals into molten lithium fluoride, *Proceedings of the International Symposium on Molten Salt Chemistry and Technology*, Marie-Louise Saboungi and Hirano Kojima, pp.220-230, The electrochemical society, Honolulu/Hawaii-USA, 16-21 May 1993, Printed in the USA.
11. T. Shimada, 1996 : State of activated complex of dissolved lanthanide metals into molten lithium fluoride, *JALCOM*, 245, pp.142-145.
12. E.T. Turkdogan, 1980 : Selected thermodynamic functions,

Physical Chemistry of High Temperature Technology, pp.5-24, Academic Press, New York.

13. C.W. Bale, E. Belisle, P. Chartrand, et al., 2016 : Factsage thermochemical software and database 2010-2016, Calphad, 55, pp.1-19.
14. R.G. Reddy and S.G. Kumar, 1994 : Solubility and thermo-

dynamic properties of Y_2O_3 in $LiF-YF_3$ melts, Metall. Mater. Trans. B, 25B, pp.91-96.

15. O. Knacke, O. Kubaschewski, K. Hesselmann, 1991 : Thermochemical properties of inorganic substances, pp.47, 170, 264, 307, 309, 1052, 1416, 1426, and 2260, 2nd Edition, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.

조성욱

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부
자원소재연구센터 책임연구원

유정현

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용연구본부
자원소재연구센터 책임연구원

최호길

- 현재 서울대학교 재료공학부 재료공정해석 및
설계 연구실 석박사통합과정 졸업 공학박사
-