

MgCl₂-CaCl₂-NaCl 혼합용융염에서 Mg²⁺ 이온의 전기화학적 거동

류효열* · 정상문*[†] · 김정국**

*충북대학교 화학공학과
361-763 충북 청주시 흥덕구 내수동로 52
**한국원자력연구원
305-353 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
(2012년 6월 20일 접수, 2012년 7월 20일 채택)

Electrochemical Behavior of Mg²⁺ Ions in MgCl₂-CaCl₂-NaCl Molten Salt

Hyo Yeol Ryu*, Sang Mun Jeong*[†] and Jeong-Guk Kim**

*Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University,
52 Naesudong-ro, Heungdeok-gu, Cheongju, Chungbuk 361-763, Korea

**Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeok-daero 989-111, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea
(Received 20 June 2012; accepted 20 July 2012)

요 약

본 연구에서는 MgCl₂-CaCl₂-NaCl 혼합용융염에서 Mg²⁺ 이온의 전기화학적 거동을 평가하였다. MgCl₂-CaCl₂-NaCl 용융염에서 순환전압전류법 측정을 통해 Mg²⁺ 이온의 환원전위를 측정하였고, MgCl₂의 농도 변화 및 용융염의 온도 변화에 따른 환원전위의 영향에 대해 살펴보았다. 그리고 각각 660, 680, 700, 720 및 740 °C의 온도에서 Mg²⁺ 이온의 확산계수를 계산한 결과 8.79×10⁻⁶, 9.56×10⁻⁶, 1.17×10⁻⁵, 1.4×10⁻⁵ 및 1.77×10⁻⁵ cm² s⁻¹로 측정되었다. 또한 Arrhenius 식을 통해 Mg²⁺ 이온의 확산에 대한 활성화 에너지는 70.28 kJ mol⁻¹로 계산되었다.

Abstract – The electrochemical behavior of magnesium ions was examined by cyclic voltammetry in a molten MgCl₂-CaCl₂-NaCl salt. The reduction potential of magnesium ions was measured and those values were estimated with the variation of the concentration of MgCl₂ and the temperature of molten salts. The diffusion coefficient of the Mg²⁺ ions has been determined at 660, 680, 700, 720 and 740 °C. The values were 8.79×10⁻⁶, 9.56×10⁻⁶, 1.17×10⁻⁵, 1.4×10⁻⁵ and 1.77×10⁻⁵ cm² s⁻¹. The activation energy for the diffusion processes of Mg²⁺ ions was found to be 70.28 kJ mol⁻¹ by using the Arrhenius equation.

Key words: Magnesium, Electrowinning, Diffusion Coefficient, Cyclic Voltammetry, Molten Salt

1. 서 론

원소기호 Mg, 원자번호 12, 원자량 24.3인 마그네슘은 용융점이 650 °C이며 지구에서 8번째로 풍부한 원소로 지각의 1.9%를 차지하고 있다. 마그네슘은 가볍고 강도와 연성이 뛰어난 특성으로 인해 자동차 부품, 노트북, 핸드폰 케이스와 같은 제품에 사용되면서 수요가 증가하고 있다. 하지만 자원화 기술이 소수 기업에 집중되어 있어 마그네슘 자원의 수급 및 가격 불안정성이 예상되면서 마그네슘 자원화 공정 기술개발에 대한 관심이 집중되고 있다.

현재 마그네슘 금속을 제련하는 공정은 주로 돌로마이트(MgCO₃·CaCO₃)를 원료로 사용하는 열 환원법과 염수를 원료로 사용하는 용융염 전해법 2가지로 구분할 수 있다[1,2]. 열 환원법은 원

료물질에 환원제를 첨가한 후 고온에서 반응시켜 마그네슘 금속을 얻는 방법으로 공정이 비교적 간단하다. 현재 세계 마그네슘 생산량의 80% 이상이 중국에서 열 환원법으로 생산되고 있다. 하지만 열 환원법은 원료가 편재화 되어있고, 1600 °C의 높은 온도에서 수행되어 에너지 비용이 크며 CO₂를 발생시켜 환경문제를 가져오는 단점이 있다[1,2].

용융염 전해법은 염수와 같은 원료물질을 전기화학적 방법으로 전기 분해하여 금속 마그네슘을 얻는 방법이다. 용융염 전해법은 열 환원법에 비해 낮은 온도에서 수행하며 비교적 에너지 소모가 적고 CO₂ 배출을 줄일 수 있어 경제적이고 친환경적인 장점으로 각광받고 있다[3,4]. 최근에 고온 용융염 전해법은 마그네슘, 리튬 등과 같은 경량금속 추출 공정에 사용될 뿐만 아니라 금속산화물의 전기화학적 전해환원 공정에 사용되어 탄탈륨, 니오븀 등과 같은 금속을 얻는데 사용된다[5,6]. 또한 산화물 사용후 핵연료의 재활용을 위한 파이로 공정에서도 고온 용융염 전해법이 활용되고 있다[7].

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: smjeong@chungbuk.ac.kr

*이 논문은 KAIST 홍원희 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

용융염 전해법을 이용한 마그네슘 생산 비중이 증가함에 따라 고 효율의 마그네슘 용융염 전해 공정 기술개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 Mg^{2+} 이온의 환원전위 및 $MgCl_2$ 의 분해전압에 대한 기초자료는 마그네슘 생산 공정의 에너지 효율을 향상시키기 위해서 매우 중요한 자료이다. 또한 Mg^{2+} 이온의 확산계수를 전기화학적으로 측정하는 것은 Mg 복합 용융염계에서 전기화학 반응의 전하전달 및 물질전달과 관련하여 이온의 확산 메커니즘을 이해하는데 큰 도움이 된다[8].

따라서 본 연구에서는 cyclic voltammetry를 이용하여 $MgCl_2$ - $CaCl_2$ -NaCl 혼합용융염에서 Mg^{2+} 이온의 환원전위와 Mg^{2+} 이온의 확산계수를 측정하는 실험을 수행하였다. 용융염의 온도와 $MgCl_2$ 의 농도 변화에 따른 환원전위의 차이를 Nernst 식을 통해 평가하였다. 그리고 660, 680, 700, 720 및 740 °C의 온도에서 Mg^{2+} 이온의 확산계수를 측정하였고, Arrhenius 식을 통해 활성화 에너지를 측정하였다. 본 연구 결과는 Mg^{2+} 이온의 전기화학적 환원거동 및 확산 메커니즘을 이해하는데 큰 도움이 될 것이다.

2. 실험

2-1. 시 료

본 연구에서는 용융염 매질로 무수화물 $MgCl_2$ (순도 96%, SAMCHUN)와 $CaCl_2$ (순도 96%, SAMCHUN), NaCl(순도 99%, SAMCHUN)를 사용하였다. 시약들은 고순도의 아르곤 분위기가 형성된 글로브박스 안에서 보관하여 수분과 공기와의 접촉을 철저히 차단하였다.

2-2. 실험 장치

Mg^{2+} 이온의 전기화학적 거동을 측정하기 위한 모든 실험은 수분과의 접촉을 차단하기 위해서 고순도의 아르곤(Ar) 글로브박스 안에서 수행하였다. 글로브박스는 전기분해 셀과 온도조절기, 아르곤 가스 유입구와 아르곤 및 염소 가스 배출구, 냉각수 장치로 구성된다. Fig. 1는 Mg^{2+} 이온의 전기화학적 환원거동을 측정한 실험장치의 개략도이다. 실험 장치는 반응기를 가열시키는 원통형 전기저항로와 $MgCl_2$, $CaCl_2$ 및 NaCl이 혼합된 용융염이 담긴 알루미늄 도

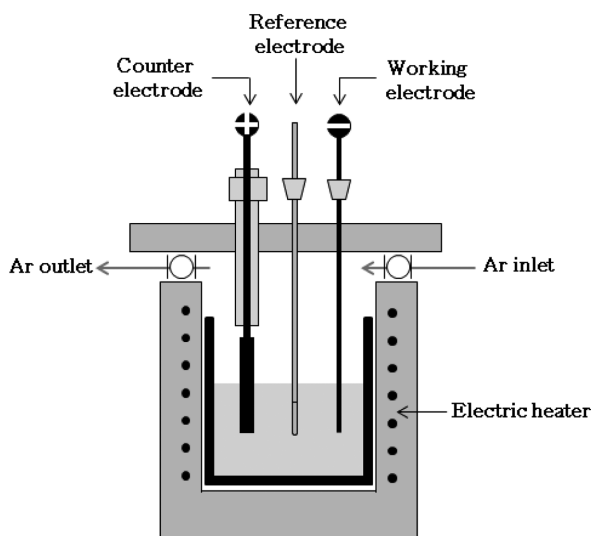


Fig. 1. Experimental apparatus for the measurement of electrochemical behavior of Mg^{2+} ions.

가니, 산화전극, 환원전극 및 기준전극으로 구성된 전기분해 셀로 이루어져 있다.

Mg^{2+} 이온의 환원전위를 측정하기 위한 cyclic voltammetry 실험에서는 Ni 와이어와 흑연봉, Ag/AgCl이 각각 작업전극과 상대전극, 기준전극으로 사용되었다. 또한 Mg^{2+} 이온의 확산계수를 측정하기 위한 cyclic voltammetry 실험에서는 tungsten 와이어와 흑연봉, Ag/AgCl이 각각 작업전극과 상대전극, 기준전극으로 사용되었다. Ag/AgCl 기준전극을 제조하기 위해서 우선 $MgCl_2$, NaCl, $CaCl_2$ 및 AgCl을 각각 0.056, 0.616, 0.286 및 0.02 g 씩 섞은 혼합물을 밀부분이 얇은 이온 멤브레인 형태인 석영관(내경 4 mm)에 장입시킨다. 그리고 석영관 안에 730 °C에서 녹은 액체 혼합물에 silver wire(지름 0.5 mm)를 담가서 제조한다.

2-3. 실험 방법

Mg^{2+} 이온의 환원전위에 대한 온도의 영향을 평가하기 위해서 상온에서 알루미늄아 도가니에 $MgCl_2$ 와 $CaCl_2$, NaCl을 각각 75.4, 84.8 및 216.7 g씩 넣은 후 반응기를 단계적으로 가열시켜 각각 700 °C와 650 °C로 유지시켜 환원전위를 측정하였다. 또한 Mg^{2+} 이온의 환원전위에 대하여 $MgCl_2$ 농도의 영향을 평가하기 위해서 610 °C의 온도에서 알루미늄아 도가니에 $CaCl_2$ 와 NaCl을 각각 196.5 g와 103.5 g(몰비=1:1)을 넣은 후 $MgCl_2$ 의 농도를 달리하여 환원전위를 측정하였다. 그리고 Mg^{2+} 이온의 확산계수를 측정하기 위해 알루미늄아 도가니에 $MgCl_2$ 와 $CaCl_2$, NaCl을 각각 15 g(4.8 wt%), 196.5 g(62.4 wt%), 103.5 g(32.8 wt%) 씩 넣은 후 용융염의 온도를 각각 660, 680, 700, 720 및 740 °C로 유지시킨 후 실험을 수행하였다. 반응기의 온도를 단계적으로 가열한 후 작업전극과 상대전극, 기준전극을 용융염에 담가 전기분해 셀을 구성하였다. AutoLAB (PGSTAT302N)을 이용하여 전극전위를 조절하여 cyclic voltammetry를 측정하였고, 전기화학적 환원반응을 유도하여 Mg^{2+} 이온의 환원전위 및 확산계수를 측정하였다.

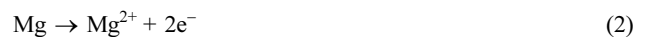
3. 결과 및 고찰

3-1. 온도 변화에 따른 Mg^{2+} 이온의 전기화학적 환원거동

$MgCl_2$ - $CaCl_2$ -NaCl 혼합용융염에서 온도 변화에 따른 Mg^{2+} 이온의 전기화학적 환원거동을 살펴보기 위해 cyclic voltammetry를 측정하였다. Fig. 2는 각각 700, 650 °C에서 Ni 작업전극을 이용하여 측정한 CV 그래프이다. Fig. 2(A)는 700 °C에서 측정한 CV 그래프로 -1.54 V에서 환원전류가 급격히 증가하기 시작한다. 이 환원전류는 Mg^{2+} 이온이 Ni 작업전극 표면에 금속 Mg으로 환원됨을 의미한다. Mg^{2+} 이온의 환원반응은 반응식 (1)과 같다.



전위주사방향이 역전되면서 두 개의 산화피크가 나타나는데, 첫 번째 산화피크 b1은 반응식 (2)와 같이 환원된 금속 Mg이 Mg^{2+} 이온으로 재산화된 것으로 판단된다. 그리고 두 번째 산화피크 b2는 반응식 (3)과 같이 환원반응에서 형성된 $MgNi_x$ 합금이 Ni와 Mg^{2+} 이온으로 산화된 것으로 판단된다. 이와 관련한 반응식은 다음과 같이 제안될 수 있다.



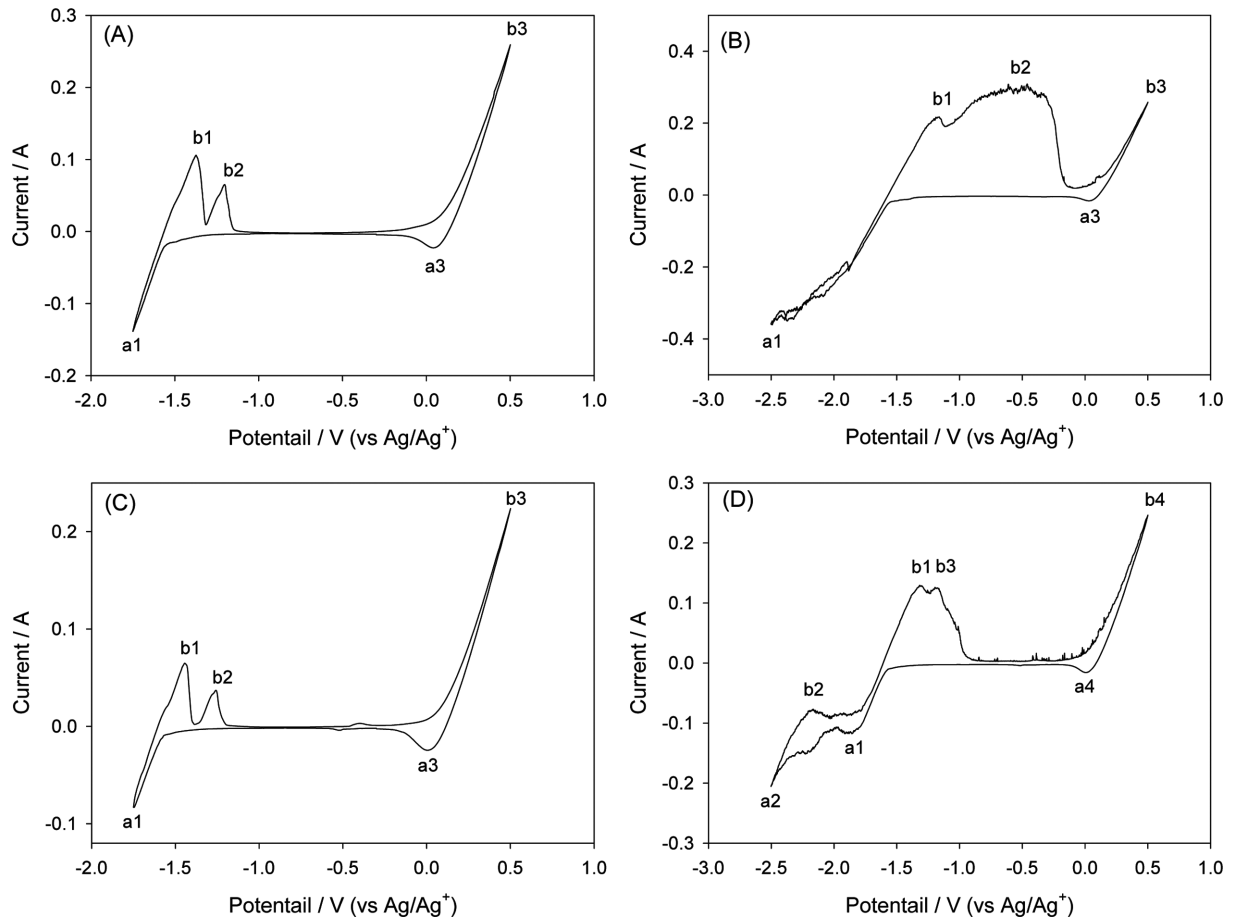


Fig. 2. Cyclic voltammograms of Ni wire electrode. The temperature was (A) 700 °C (scanning range: -1.75~0.5 V), (B) 700 °C (scanning range: -2.5~0.5 V), (C) 650 °C (scanning range: -1.75~0.5 V) and (D) 650 °C (scanning range: -2.5~0.5 V).

0~0.5 V의 전위에서 나타나는 산화전류와 환원전류는 각각 Ni 작업전극의 산화, 환원 반응을 의미하며 이는 반응식 (4)와 (5)와 같다.



Fig. 2(B)는 700 °C에서 -2.5~0.5 V의 전위 범위에서 측정한 CV 그래프이다. 전류피크 a1은 Mg²⁺ 이온이 환원반응과 관련한 환원전류를 의미한다. 전극전위가 음의방향으로 진행됨에 따라 환원전류가 불안정한 것은 환원된 금속이 용융염으로 분산 용해되어 금속연무(Metal fog) 현상이 발생하면서 전극 면적이 불규칙적으로 변화하기 때문이다. 산화피크 b1과 b2는 각각 환원된 금속 Mg의 재산화반응과 MgNi_x 합금의 산화반응을 의미하며 전류피크 b3과 a3는 Ni 작업전극의 산화, 환원반응을 의미한다.

Fig. 2(C)는 650 °C에서 측정한 CV 그래프로 Fig. 2(A)와 동일한 반응 메커니즘을 갖으며 -1.56 V에서 Mg²⁺ 이온의 환원전류가 급격히 증가한다. Mg²⁺ 이온의 환원전위가 700 °C에서 -1.54 V이고 650 °C에서 -1.56 V이며 온도가 증가함에 따라 환원전위가 감소함을 알 수 있다. 이를 Nernst 식인 식 (6)을 통해서 평가할 수 있다.

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cell}}^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (6)$$

이 식에서 E_{cell}은 셀 전압(V), E_{cell}^o은 활동도가 모두 1일 경우 표

준전극전위(V), R은 기체상수(J/mol·K), T는 온도(K), n은 반응에 참여하는 전자 수, F는 패러데이 상수(C/mol), Q는 전해질(Mg²⁺)의 농도를 의미한다. 이 식에서 온도가 증가하면 셀 전압(E_{cell})이 감소하는 이론적인 경향을 파악할 수 있다. 셀 전압이 감소할수록 Mg²⁺ 이온의 환원전위가 감소하기 때문에 마그네슘 용융염 전해 공정에서 용융염의 온도가 감소할수록 더 큰 환원전위를 가해주어야 함을 알 수 있다.

Fig. 2(D)는 650 °C에서 -2.5~0.5 V의 전위 범위에서 측정한 CV 그래프이다. 환원피크 a1은 Mg²⁺ 이온의 환원반응과 관련이 있으며, 환원피크 a2는 Mg²⁺, Ca²⁺ 및 Na⁺ 이온의 환원반응을 통해 합금 생성과 관련이 있다. 전위주사방향이 역전되면서 나타나는 첫 번째 산화피크 b2는 Ca와 Na의 재산화반응(re-oxidation)을 의미하고, 산화피크 b1과 b3은 환원된 금속 Mg의 재산화반응과 MgNi_x 합금의 산화반응과 관련이 있다. 또한 b4와 a4는 Ni 작업전극의 음극 용해반응(anodic dissolution)과 이에 따른 재환원반응(re-reduction)과 관련된 redox 피크이다.

3-2. MgCl₂ 농도 변화에 따른 Mg²⁺ 이온의 전기화학적 환원거동

MgCl₂-CaCl₂-NaCl 혼합용융염에서 MgCl₂ 농도 변화에 따른 Mg²⁺이온의 전기화학적 환원거동을 살펴보기 위해서 cyclic voltammetry를 측정하였다. Fig. 3는 610 °C에서 MgCl₂가 각각 15 g(4.8 wt%), 30 g(9.1 wt%), 45 g(13.0 wt%) 및 60 g(16.7 wt%) 씩 포함된 혼합

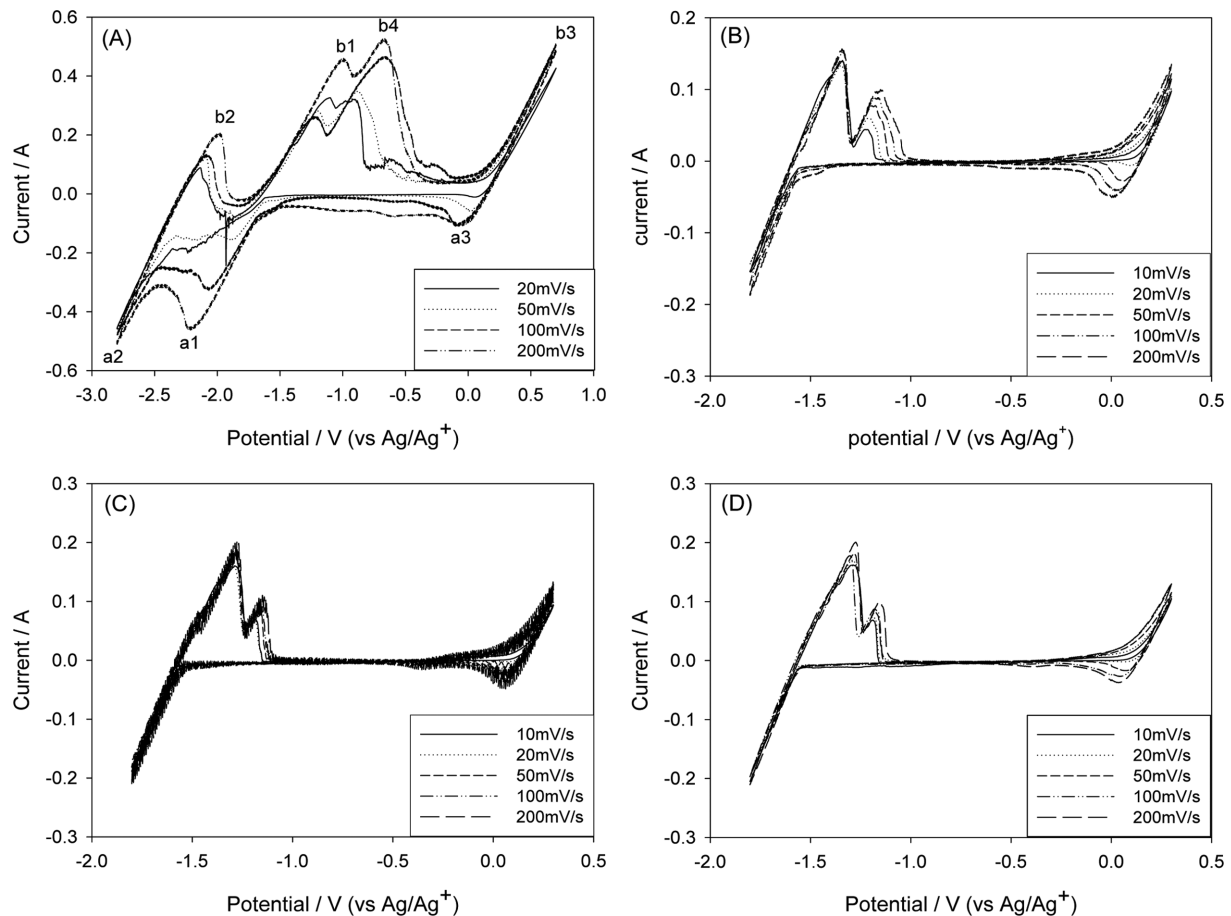


Fig. 3. Cyclic voltammograms of Ni wire at 610 °C in $\text{MgCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaCl}$ molten salt. The concentration of MgCl_2 in molten salt was (A) 4.8 wt%, (B) 9.1 wt%, (C) 13.0 wt% and (D) 16.7 wt%, respectively.

용융염의 CV 그래프이다. Fig. 3(A)를 살펴보면 우선 -1.61 V에서 환원전류가 증가하기 시작하면서 Mg^{2+} 이온의 환원반응이 일어난다. 전극전위가 계속 음의 방향으로 진행되면서 환원전류의 크기가 감소하는데 이는 전극 주변에 Mg^{2+} 이온의 농도가 감소하기 때문이다. 그리고 환원피크 a2가 나타나는데 이는 Ca^{2+} 이온과 Na^+ 이온의 환원반응을 의미한다. 그리고 전위주사방향이 역전되면서 세 개의 산화피크가 나타나는데, 첫 번째 산화피크 b2는 Ca와 Na의 산화반응을 의미하고, 두 번째 산화피크 b1은 Mg의 산화반응을 의미하며 세 번째 산화피크 b4는 MgNi_x 합금의 산화반응을 의미한다. 그리고 전류피크 b3과 a3은 Ni 작업전극의 산화, 환원반응을 의미한다. Fig. 3(B)~(D)는 MgCl_2 가 30, 45 및 60 g 포함된 혼합용융염에서 측정한 CV 그래프로서 선택적으로 Mg^{2+} 이온의 환원거동만을 살펴보기 위해서 Ca 및 Na 금속이 환원되지 않는 전위 범위에서 CV를 측정하였다. Fig. 3(B)~(D)에서 Mg^{2+} 이온의 환원전류와 전위주사방향이 역전되면서 발생한 전류가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 Mg^{2+} 이온의 전극반응이 전하 전달에 의해 영향을 받음을 보여준다. Fig. 3(B)~(D)의 그래프들은 Fig. 2(A)와 동일한 반응 메커니즘을 갖지만 MgCl_2 의 농도에 따라 Mg^{2+} 이온의 환원전위가 다르다. Mg^{2+} 이온의 환원전위는 MgCl_2 가 각각 15, 30, 45 및 60 g 씩 포함되었을 때 -1.61 , -1.54 , -1.53 및 -1.52 V이며 MgCl_2 의 농도가 증가할수록 환원전위가 감소하는 경향을 가진다. 이와 같은 실험결과를 Nernst 식인 식 (6)을 통해 평가할 수 있다.

식 (6)에서 MgCl_2 의 농도(Q)가 증가할수록 셀 전압(E_{cell})이 감소하는 경향을 알 수 있다. 셀 전압의 감소할수록 Mg^{2+} 이온의 환원전위가 감소함을 파악할 수 있다. 실제 마그네슘 용융염 전해 공정에서는 마그네슘 회수 과정에서 MgCl_2 의 농도가 줄어드는데, 이 경우에는 더 큰 Mg^{2+} 이온의 환원전위를 가해주어야 함을 알 수 있다.

3-3. 온도 변화에 따른 Mg^{2+} 이온의 확산계수 측정

온도 변화에 따른 Mg^{2+} 이온의 확산계수를 측정하기 위해서 $\text{MgCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-NaCl}$ 혼합용융염에서 각각 660, 680, 700, 720 및 740 °C에서 cyclic voltammetry를 측정하였다. Fig. 4는 660 °C에서 tungsten wire 작업전극을 이용하여 전위주사속도에 따라 측정한 CV 그래프이다. Mg^{2+} 이온을 포함한 용융염에서 Ni를 작업전극으로 사용할 경우 MgNi_x 합금이 생성되기 때문에 Mg과 합금을 형성하지 않고 Inert한 tungsten wire를 작업전극으로 사용하였다. Fig. 4를 살펴보면 두 개의 환원피크(a1, a2)와 두 개의 산화피크(b1, b2)가 나타난다. 전류피크 a1은 Mg^{2+} 이온의 환원반응을 의미하며 전류피크 b1은 Mg의 산화반응을 의미하고, 전류피크 a2는 Ca^{2+} 와 Na^+ 이온의 환원반응을 의미하며 전류피크 b2는 Ca와 Na의 산화반응을 의미한다[9]. 각 전위주사속도에 따른 Mg^{2+} 이온의 환원피크 전류 값을 가지고 Randles-Sevcik 식을 이용하여 가역반응에 대한 확산계수를 측정한다. 이 식은 다음과 같다.

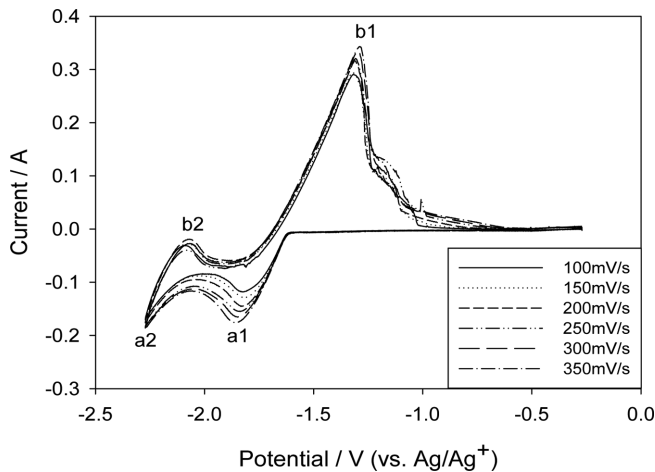


Fig. 4. Cyclic voltammograms of Tugsten wire at 660 °C in MgCl₂-CaCl₂-NaCl molten salt.

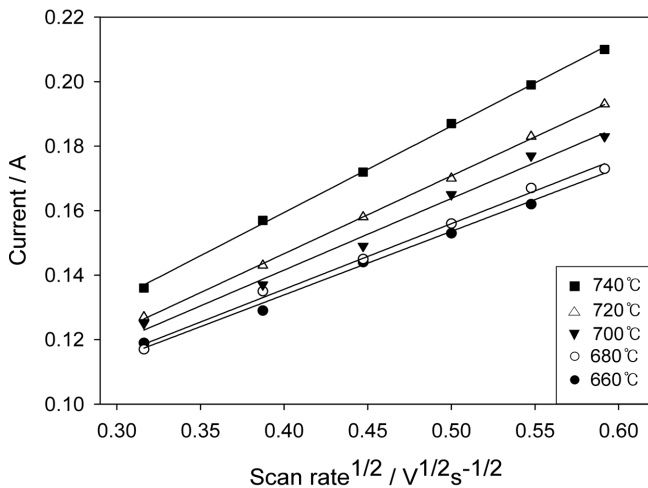


Fig. 5. Dependence of peak current on square root of scan rate at different temperatures.

$$i_p = 0.4463 \left(\frac{F^3}{RT} \right)^{1/2} n^{3/2} A D^{1/2} C_0 v^{1/2} \quad (7)$$

이 식에서 i_p 는 환원피크전류(A), A는 전극면적(cm²), C는 반응이온의 농도(mol/cm³), D는 확산계수(cm²/s), v 는 전위주사속도(V/s), n 은 반응에 참여하는 전자 수, F는 패러데이 상수, R은 기체상수, T는 온도를 나타낸다. Fig. 5은 각각 660, 680, 700, 720 및 740 °C에서 환원전류피크(i_p)와 $v^{1/2}$ 의 그래프를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 그래프는 선형관계이며 그 기울기로부터 식 (7)을 이용하여 확산계수를 계산할 수 있다[10]. Table 1은 각 660, 680, 700, 720 및 740 °C에서 측정된 Mg²⁺ 이온의 확산계수 측정값을 나타낸다. 온도 변화에 따른 확산계수 값을 살펴보면 온도가 증가함에 따라 확산계수 값이 증가함을 알 수 있다. Arrhenius 식을 이용하여 Mg²⁺ 이온의 확산계수와 온도의 의존성을 파악할 수 있으며 이를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 회귀선의 기울기와 절편을 통해 온도에 따른

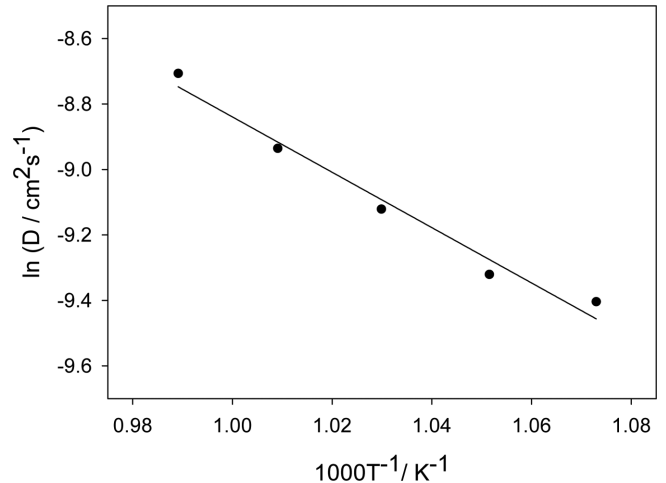


Fig. 6. Temperature dependence of the diffusion coefficient of Mg²⁺ ions in MgCl₂-CaCl₂-NaCl molten salt.

확산계수의 식을 다음과 같이 제안할 수 있다[11].

$$D_{Mg(II)} = 0.6794 \exp \left(-\frac{70277}{RT} \right) \quad (8)$$

Arrhenius 식을 통해 Mg²⁺ 이온의 확산에 대한 활성화 에너지를 계산하면 약 70.28 kJ/mol로 측정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 MgCl₂-CaCl₂-NaCl 용융염에서 Mg²⁺ 이온의 전기화학적 반응특성에 대해 고찰하였다. 니켈 및 텅스텐을 작업전극으로 흑연봉(graphite rod)을 상대전극으로 Ag/AgCl를 기준전극으로 사용하여 전기화학 셀을 구성하였고, Mg²⁺ 이온의 산화, 환원반응을 유도하여 순환전압전류법측정을 하였다. CV 그래프를 통해서 Mg²⁺ 이온의 전기화학적 산화, 환원거동 및 MgNi_x의 산화반응, Ni의 산화, 환원거동을 살펴볼 수 있었다. 실험결과 온도가 증가할수록 Mg²⁺ 이온의 환원전위가 감소하고, MgCl₂ 농도가 증가할수록 Mg²⁺ 이온의 환원전위가 감소함을 알 수 있었다. 이러한 경향성을 전기화학 반응식인 Nernst 식을 통해 이론적으로 평가하였다. 또한 Randles-Sevcik 식과 Arrhenius 식을 이용하여 온도에 따른 Mg²⁺ 이온의 확산계수를 측정하였고, Mg²⁺ 이온의 확산에 대한 활성화 에너지를 측정하였다. 본 연구결과를 통해 마그네슘 생산 공정의 에너지효율을 향상시킬 것이라 기대하며 Mg²⁺ 이온의 전기화학적 환원반응에 대한 확산 메커니즘을 이해하는데 큰 도움이 될 것이라 생각한다.

감 사

본 연구는 지식경제부에서 주관하는 기술혁신사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 2011T00200211).

Table 1. Diffusion coefficient of Mg²⁺ ions at 660, 680, 700, 720 and 740 °C in MgCl₂-CaCl₂-NaCl molten salt

Temperature (°C)	660	680	700	720	740
Diffusion coefficient of Mg ²⁺ ions (cm ² s ⁻¹)	8.79×10 ⁻⁶	9.56×10 ⁻⁶	1.17×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻⁵	1.77×10 ⁻⁵

참고문헌

1. Park, H. K., "Review on the Current Status of Magnesium Smelting," *J. KSGE*, **11**(1), 13-18(2008).
2. Gao, F., Nie, Z. R., Wang, Z. H., Gong, X. Z. and Zuo, T. Y., "Assessing Environmental Impact of Magnesium Production Using Pidgeon Process in China," *J. Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **18**(3), 749-754(2008).
3. Thayer, R. L. and Neelameggham, R. N., "Improving the Electrolytic Process for Magnesium Production," *JOM*, **53**(8), 15-17 (2001).
4. Rajagopalan, N., Srikantan, S., Srinivasan, L. K., Kannan, G. N. and Selvakesavan, A., "Developing an Energy-Efficient Electrolytic Cell for Magnesium," *JOM*, **52**(3), 18-19(2000).
5. Jeong, S. M., Jung, J. Y., Seo, C. S. and Park, S. W., "Characteristics of an Electrochemical Reduction of Ta_2O_5 for the Preparation of Metallic Tantalum in a LiCl-Li₂O Molten Salt," *J. Alloys Compd.*, **440**(1-2), 210-215(2007).
6. Jeong, S. M., Yoo, H. Y., Hur, J. M. and Seo, C. S., "Preparation of Metallic Niobium from Niobium Pentoxide by an Indirect Electrochemical Reduction in a LiCl-Li₂O Molten Salt," *J. Alloys Compd.*, **452**(1), 27-31(2008).
7. Jeong, S. M., Shin, H. S., Hong, S. S., Hur, J. M., Do, J. B. and Lee, H. S., "Electrochemical Reduction Behavior of U_3O_8 Powder in a LiCl Molten Salt," *J. Electrochim. Acta*, **55**(5), 1749-1755(2010).
8. Martinez, A. M., Borresen, B., Haarberg, G. M., Castrillejo, Y. and Tunold, R., "Electrodeposition of Magnesium from CaCl₂-NaCl-KCl-MgCl₂ Melts," *J. Electrochem. Soc.*, **151**(7), C508-C513 (2004).
9. Martinez, A. M., Borresen, B., Haarberg, G. M., Castrillejo, Y. and Tunold, R., "Electrodeposition of Magnesium from the Eutectic LiCl-KCl melt," *J. Appl. Electrochem.*, **34**(12), 1271-1278(2004).
10. Castrillejo, Y., Martinez, A. M., Pardo, R. and Haarberg, G. M., "Electrochemical Behavior of Magnesium Ions in the Equimolar CaCl₂-NaCl Mixture at 550 °C," *J. Electrochim. Acta*, **42**(12), 1869-1876(1997).
11. Store, T., Haarberg, G. M. and Tunold, R., "Determination of Diffusion Coefficients of Depositing Ions in Molten Chlorides by Transient Electrochemical Techniques," *J. Appl. Electrochem.*, **30**(12), 1351-1360(2000).