

## LiCl-KCl 고온 용융염 내 $\text{UCl}_3$ 및 $\text{GdCl}_3$ 의 전기화학적 거동 연구

민슬기 · 배상은\* · 박용준 · 송규석\*

한국원자력연구원 원자력화학연구부

(2009년 7월 24일 접수; 2009년 7월 29일 채택)

## Electrochemical Behavior of $\text{UCl}_3$ and $\text{GdCl}_3$ in LiCl-KCl Molten Salt

Seul Ki Min, Sang-Eun Bae\*, Yong Joon Park, and Kyuseok Song\*

Nuclear Chemistry Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daeduk daero 1045, Yuseong-gu,  
Daejeon 305-353, Republic of Korea

(Received July 24, 2009 : Accepted July 29, 2009)

### 초 록

본 연구는 고온화학공정에 사용할 전기화학적 센서 기술 개발의 사전 연구로서 고온 LiCl-KCl 공융염에  $\text{UCl}_3$ 나  $\text{GdCl}_3$ 를 녹여  $\text{U}^{3+}$ 와  $\text{Gd}^{3+}$ 의 전기화학 반응을 조사하였다.  $\text{U}^{3+}$ 는 고온 LiCl-KCl 용융염내에서  $-0.2\text{ V}/-0.35\text{ V}$ 에서  $\text{U}^{4+}$ 로의 산화/환원반응의,  $-1.51\text{ V}/-1.35\text{ V}$ 에서 전착/해리 반응전류의 피크를 나타내었다.  $\text{Gd}^{3+}$ 의 경우  $-2.15\text{ V}$ 에서 전착반응 피크를,  $-1.9\text{ V}$ 에서 산화해리전류 피크를 나타내었다.  $\text{U}^{3+}$ 와  $\text{Gd}^{3+}$ 의 혼합 고온 용융염에서는  $\text{Gd}^{3+}$ 의 전착 피크가 양의 전위로 이동하였다. 일정전류법의 결과는 시간이 지남에 따라 전위값이 일정해졌으며 그 전위값은 전해질 내 반응물의 환원전위값과 일치하였다. 노멀펄스전위법과 직각파전위법은 두 원소의 정성 분석을 위한 좋은 전기화학적 방법론임을 보였으며 특히 노멀펄스전위곡선을 미분한 결과는 사용된 다른 방법에 비해 반응전류의 피크분리가 잘 일어났다.

**Abstract :** Electrochemical behaviors of  $\text{U}^{3+}$  and  $\text{Gd}^{3+}$  were investigated in LiCl-KCl eutectic molten salt by using various electrochemical techniques. The electrodeposition and dissolution currents for uranium show the maximum at  $-1.51\text{ V}$  and  $-1.35\text{ V}$ , respectively while, for gadolinium, at  $-2.15\text{ V}$  and  $-1.9\text{ V}$ , respectively. In case of LiCl-KCl molten salt containing both of  $\text{U}^{3+}$  and  $\text{Gd}^{3+}$ , the peak potential of electrodeposition of gadolinium shifts to more positive potential than in the solution without  $\text{U}^{3+}$ . The potentials in chronopotentiometric data suddenly dropped to negative value as soon as the reduction currents were applied and became constant at the potential around which the  $\text{U}^{3+}$  and  $\text{Gd}^{3+}$  are electrodeposited. The results of normal pulse voltammetry (NPV) and square wave voltammetry show that those methods can be used to qualitatively analyze the elements in the melts. Especially, the differentiation of NPV result was found to be useful for the separation of the peaks of which potentials are close each other.

**Keywords :** Pyrochemical processing, Uranium, Gadolinium, Electrochemical sensor, LiCl-KCl

\*E-mail: sebae@kaeri.re.kr (SEB) and sks@kaeri.re.kr (SK)

## 1. 서 론

21세기 들어 화석자원의 고갈과 지구 온난화 방지를 위한 이산화탄소 저감화 정책은 에너지 자원의 가격 폭등을 불러왔다.<sup>1)</sup> 특히 석유가 나지 않는 우리나라는 세계 원유 가격에 따라 우리나라 전체 경제가 좌지우지 되는 실정이기 때문에 이를 대체할 새로운 대안 에너지의 필요성을 절실히 느끼고 있다. 원자력 발전은 높은 가격 경쟁력 및 이산화탄소의 저배출을 모두 만족시키고 있기 때문에 그 대안 에너지로써 큰 관심과 이목을 끌고 있다. 우리나라는 현재 원자력 발전이 전체 발전량의 약 40%를 담당하고 있으며 2030년까지 약 60%까지 올리기 위하여 현재 새로운 원자력 발전소가 건설 중에 있다.<sup>2)</sup>

원자력 발전소에서 발생하는 사용후핵연료는 방사성 폐기물을 포함하기 때문에, 원자력 발전량이 증가함에 따라 이의 관리 및 처리에 대한 관심이 현재 그 어느 때보다 높다. 처리 방법으로 습식법과 건식법이 있는데 현재 우리나라에서는 핵확산 방지에 효과적인 건식법이 집중 조명을 받고 있다. 건식법은 선진 핵연료주기(Advanced Fuel Cycle) 공정으로 불리기도 하며, 이 공정 중 전기화학적 기술이 핵심으로 사용되는 공정은 고온화학공정(Pyrochemical Processing)이다. 고온화학 공정은 사용후핵연료를 전처리 후, LiCl-KCl 공융염을 약 500°C의 고온에서 녹인 액체 전해질에 녹여 전기화학 셀을 구성하여, 우라늄, 초우라늄과 같은 원소를 작업전극에 전착(electrochemical deposition)하여 회수하는 과정이다.<sup>2,3)</sup>

고온화학공정을 실제 핵연료주기에 활용하기 위해서는

고온 용융염 내 우라늄, 초우라늄, 란탄족 등의 전기화학적 반응특성 등의 연구는 필수불가결하다. 특히 사용후핵연료에는 다양한 란탄족 및 악티늄족 원소를 포함하고 있기 때문에 이러한 다양한 원소들간의 상호 반응 또는 합금 형성 등 전기화학적 특성을 사전 조사하여 데이터베이스화하는 것이 절실하게 요구되는 실정이다.<sup>4-10)</sup> 또한 고온화학공정에서 공정 초기와 진행 중 고온 용융염 내 각 원소의 정량 및 정성 분석을 위한 센서의 개발이 필수적으로 요구된다. 이러한 센서의 개발을 위해 란탄족 및 악티늄족 원소의 흡광 및 형광을 이용한 분광학적 방법, 전기화학적 전류 및 전위 신호를 이용한 전기화학적 방법 등이 최근까지 활발하게 연구되어 왔으며, 이 중에서도 전기화학적 센서가 가장 유력한 후보로 나타났다.<sup>11-13)</sup>

따라서, 본 논문에서는 고온화학공정의 센서기술 개발을 위한 기반 연구로써 악티늄족 중 사용후핵연료에 가장 많이 들어있는 우라늄과 란탄족 중에서 가돌리늄을 선정하여 두 원소의 전기화학적 특성을 조사하였다.

## 2. 실험

Fig. 1은 본 연구에 사용된 고온 용융염용 전기화학적 측정 시스템의 개략도이다. 각 시스템의 구성은 아래와 같다.

### 2.1. 시 약

염화리튬 (LiCl)/염화칼륨 (KCl) 공염 (anhydrous beads)과 gadolinium chloride ( $GdCl_3$ ) 시약은 Aldrich ( $\geq 9.999\%$ )에서 구입하였다. 염화은 (AgCl)은 Alfa Aesar 사의 제품 ( $\geq 99.998\%$ )을 사용하였고,  $UCl_3$ 는 우라늄

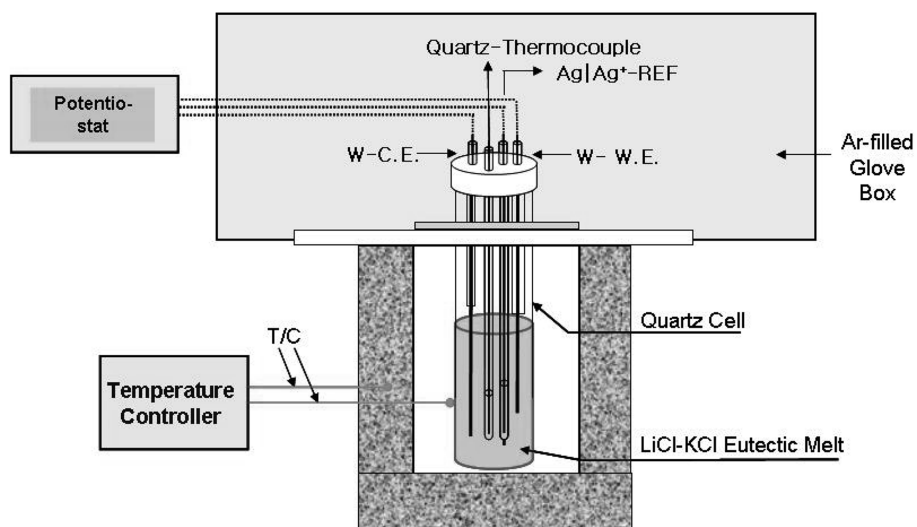
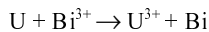


Fig. 1. Schematic of the electrochemical measurement system in molten salt media.

금속을 용융염 내에 넣고  $\text{BiCl}_3$ 를 이용하여 아래 반응과 같이 합성하여 사용하였다.<sup>14)</sup>



본 실험에 사용한 나머지 시약은 별도의 정제과정 없이 그대로 사용하였다.

## 2.2. 전극

상대전극과 작업전극은 각각 텅스텐 또는 몰리브데늄을 사용하였다. 이 전극들을 석영관에 넣어 다른 전극들과의 전기적 접촉이 없도록 하였다. 모든 실험 전, 전극의 표면을 사포로 갈아낸 후 깨끗이 닦았다. 기준전극으로는 1.0 mol%의  $\text{AgCl}$ 를 함유한  $\text{LiCl-KCl}$  공융염을, 3 mm 지름의 파이렉스관에 넣어 고온에서 녹인 후 은선 ( $\text{Ag}$ )을 꼽은  $\text{Ag}|\text{Ag}^+$  기준전극을 사용하였다.<sup>15)</sup>

## 2.3. 기기 및 장치

전 실험은 Gamry Instruments Reference 600 potentiostat/galvanostat를 PC와 연결하여 사용하였다. 용융염 내의 온도 측정을 위해 K type Chromel-Alumel 열전대 (thermocouple)를 사용하였다.  $\text{LiCl-KCl}$  공융염을 넣은 석영관은 각 실험 전  $450^\circ\text{C}$ 의 온도에서 1시간 이상 유지함으로써 시약을 균일하게 녹여 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 2a는  $\text{UCl}_3$ 를  $\text{LiCl-KCl}$  공융염 용액에 녹여 텅스텐 전극을 작업전극으로 사용하여 측정된 순환전압전류곡선(cyclic voltammetry)을 나타내고 있다. 피크  $\text{C}_1$ 은

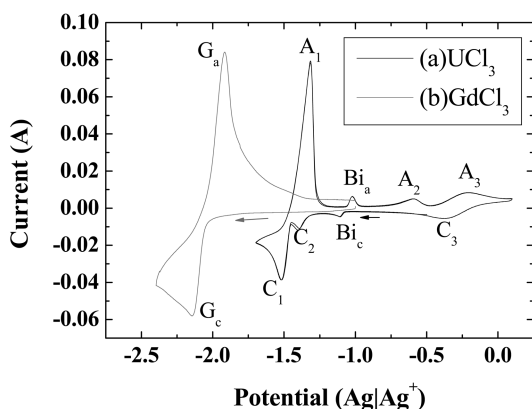


Fig. 2. Cyclic voltammograms obtained from W in  $\text{LiCl-KCl}$  melt containing  $3.12 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{UCl}_3$  (a) and  $1.06 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$   $\text{GdCl}_3$  (b) at  $450^\circ\text{C}$ . Scan rate was 200 mV/s.

우라늄 3가 이온이 우라늄 금속으로 환원되어 전착되는 전류이며 이의 상대 산화전류는  $\text{A}_1$ 으로서 약  $-1.35 \text{ V}$ 에서 그 피크를 나타내고 있다.<sup>14)</sup> 피크  $\text{C}_2$ 와  $\text{A}_2$  또한 쌍 산화환원 전류이며 지금까지 이 전류의 해석은 두 가지로 알려져 있다. 하나는 우라늄 금속의 저전위 석출 (underpotential deposition) 및 해리에서 기인한 것과<sup>16)</sup> 두번째는  $\text{U(III)}$ 이온이 환원되어  $\text{U(I)}$ 와 염소 음이온의 화합물의 형성하여 전극 위에 Langmuir 막을 형성한다는 것이다.<sup>17)</sup> 하지만 CV에서 흐른 전하량을 계산해본 결과  $\text{Au(111)}$  표면의 금 원자수에 34배나 큰 전하량을 나타냈으며, 산화환원 피크 분리가 금전극위 구리의 저전위 석출과 같은 일반적인 저전위 석출의 경우보다 약 10배 이상이며, 탄소 표면을 전극으로 사용하였을 때 또한 나타나는 것으로 보아 (탄소전극에서 저전위 석출이 보고된 적 없음<sup>18)</sup>) 저전위 석출보다  $\text{U(I)}$ 와 염소이온의 막 형성이 더 타당하다. 피크  $\text{A}_3$  및  $\text{C}_3$ 는 우라늄 3가와 4가 양이온의 산화환원 전류로써 잘 알려져 있으며 그 피크 분리는 약 150 mV로서 준가역적인 (quasi reversible) 반응임을 의미한다.<sup>14)</sup> 피크  $\text{Bi}_a$  및  $\text{Bi}_c$ 는  $\text{UCl}_3$ 의 합성 과정에서 들어간 비스무스 불순물에 기인한 것으로 보인다.<sup>19)</sup>

Fig. 2b는  $\text{GdCl}_3$ 가 첨가된  $\text{LiCl-KCl}$  고온 용융염 내에서 텅스텐 전극을 작업전극으로 사용하여 측정된 순환전압전류곡선이다. 이 곡선의 경우  $-2.1 \text{ V}$ 에서 환원 전류가 시작하여 약  $-2.13 \text{ V}$ 에서 피크전류가 나타나고 있다. 양의 방향 주사에서는 약  $-2.1 \text{ V}$ 에서 산화 전류가 보이기 시작하여 약  $-1.95 \text{ V}$ 에서 피크 전류가 나타난다.<sup>20)</sup>

서론에서 언급하였듯이, 고온화학공정에는 우라늄과 같은 악티늄족, 가돌리늄과 같은 란타늄족원소들이 섞여있다. 용융염 내 이들의 성분 및 농도를 파악하는 것은 고온화학공정의 반응 시간, 효율 등을 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 초기실험으로 악티늄족 원소로는 우라늄, 란타늄 원소로는 가돌리늄을 선택, 혼합, 공융염에 녹여 나타나는 전기화학적 신호를 조사하였다.

Fig. 3은  $\text{UCl}_3$ 와  $\text{GdCl}_3$ 를 같이 녹인  $\text{LiCl-KCl}$  고온 공융염에서 텅스텐 전극을 작업전극으로 사용하여 측정된 직선홀기전압전류곡선 (linear sweep voltammetry; LSV)을 나타내고 있다. Fig. 2에서 나타난 것처럼,  $-1.4 \text{ V}$ 와  $-1.5 \text{ V}$ 에서 우라늄 3가 양이온과 관련된 환원 피크가 나타난다. 하지만 가돌리늄의 환원전위 영역의 경우 환원 전류의 시작 전위가 Fig. 2(b)에 비해  $-1.99 \text{ V}$ 에서  $-1.85 \text{ V}$ 로, 피크 전위가  $-2.14 \text{ V}$ 에서  $-2.02 \text{ V}$ 로 양의 방향으로 이동하였다. 이는 가돌리늄의 환원 반응이, Fig. 2(b)의 경우와 달리 전착된 우라늄 표면에서 일어나기 때문이거나 우라늄-가돌리늄 합금의 전착에 기인할 것으로 예상된다. 비슷한 예는  $\text{Al-Eu}^{9)}$ 나  $\text{Al-U}^{10)}$  등의 합

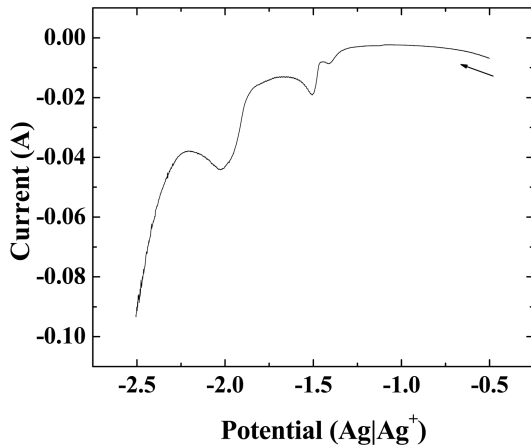


Fig. 3. Linear sweep voltammogram obtained from W in LiCl-KCl melt containing  $2.04 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{UCl}_3$  and  $6.07 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{GdCl}_3$  at  $450^\circ\text{C}$ . Scan rate was  $200 \text{ mV/s}$ .

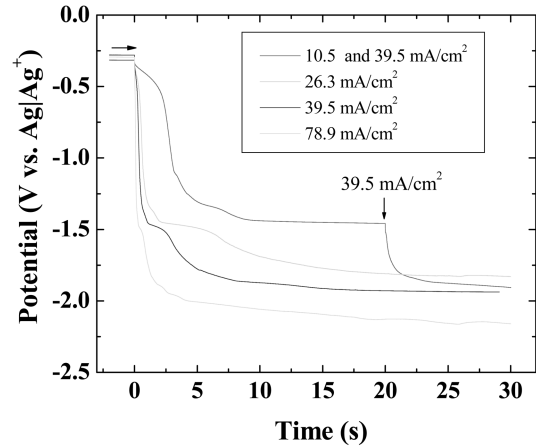


Fig. 4. Chronopotentiometric results obtained from W in LiCl-KCl melt containing  $2.04 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{UCl}_3$  and  $6.07 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{GdCl}_3$  at  $450^\circ\text{C}$ .

금에 관해 보고된 논문에서 볼 수 있는데 Al-Eu에 관한 논문을 예로 들자면 다음과 같다. Eu는 LiCl-KCl 공융염의 전위창 밖에서 전착 반응이 일어나기 때문에 LiCl-KCl 공융염에서 전착을 수행할 수 없다. 이 문제를 타개하기 위하여 알루미늄전극을 사용하거나 알루미늄 양이온을 전해질에 첨가하여 전착반응을 수행하면  $\text{Al}_4\text{Eu}$  상태의 합금 전착이 전위창 내에서 일어나기 때문에 Eu를 전착 분리할 수 있다. 결론적으로  $\text{Al}_4\text{Eu}$ 의 합금 전착 반응 전압이, Eu 자체 전착 반응에 더하여 양의 전압에서 일어남을 알 수 있다.<sup>9)</sup> 하여 본 연구의 우라늄과 가돌리늄의 전착반응도 이와 유사하게 합금 반응에 기인한 새로운 피크가 더해져서 두 개의 피크가 나타났을 것으로 예상할 수 있으며, 현재 XRD나 XPS 분석법을 이용하여 전착물의 성분에 관한 연구를 수행하고 있으며 곧 본 연구실에서 투고할 논문을 통하여 보고할 것이다.

Fig. 4는  $\text{UCl}_3$ 와  $\text{GdCl}_3$ 을 같이 녹인 LiCl-KCl 고온 공융염에서 텅스텐 선을 작업전극으로 사용하여 측정한 일정전류전압 (chronopotentiometry) 곡선이다. 네 곡선 모두 초기 영점전류전압(OCP) 값이  $-0.3 \text{ V}$ 로 일정하다가 음의 전류를 가하자마자 급격히 음의 전위로 감소하고 있다.  $-10.5 \text{ mA/cm}^2$ 의 전류밀도 (빨간선)를 가할 때에는 초기 충전전류에 이은 Fig. 2a의 피크  $\text{C}_2$ 의 반응에 해당하는  $-1.3 \text{ V}$  전위값을 나타내다가 우라늄의 전착 반응 전위인  $-1.45 \text{ V}$ 에서 일정화 된다. 이에 더하여 가하는 전류밀도를  $-39.5 \text{ mA/cm}^2$ 로 높이니 그 값이  $-39.5 \text{ mA/cm}^2$ 만 (파란선) 가했을 때의 전위값으로 다가간다. 가하는 전류가 증가할수록 우라늄의 전착 반응 전위에 머무는 시간이 짧아지며 일정해지는 전위가 가돌리늄의 환

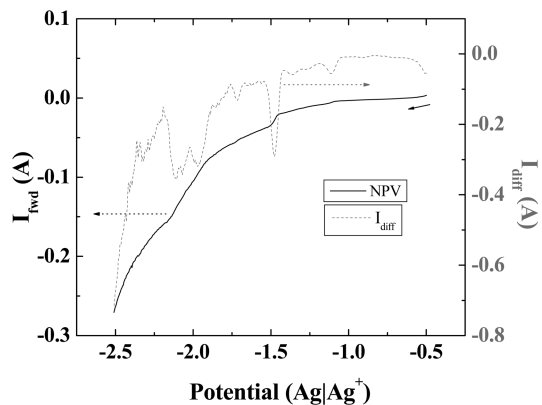


Fig. 5. Normal pulse voltammogram and its differentiated graph obtained from W in LiCl-KCl melt containing  $2.04 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{UCl}_3$  and  $6.07 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$   $\text{GdCl}_3$  at  $450^\circ\text{C}$ .  $dE = 4 \text{ mV}$ ,  $T_p = 0.2 \text{ s}$ , and  $T_m = 1 \text{ s}$ .

원전위 영역에서 음 전위 영역으로 내려가고 있다. 결국 측정된 이 전위값들은 용액 내 성분의 조성과 반응 속도에 따라 결정됨을 의미한다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 환경에서 노멀펄스전압전류 (normal pulse voltammetry; NPV)를 수행하여 얻은 곡선이다. 전위가 음의 영역으로 갈수록 전류값이 낮아지지만 각 원소가 반응이 일어나는 전위에서 작은 변화가 있을 뿐 그 전류변화를 확실히 구별할 수 없다. 하지만 이 곡선을 미분하였을 때는 그 피크 분리가 확실히 나타나고 있다.  $-1.45 \text{ V}$  영역에서 우라늄의 환원 전착 반응에 기인하는 피크가, 그리고  $-1.95 \text{ V}$ 와  $-2.15 \text{ V}$ 에서 두 개의 큰 피크가 나타나고 있다. 실제로 Fig. 3을

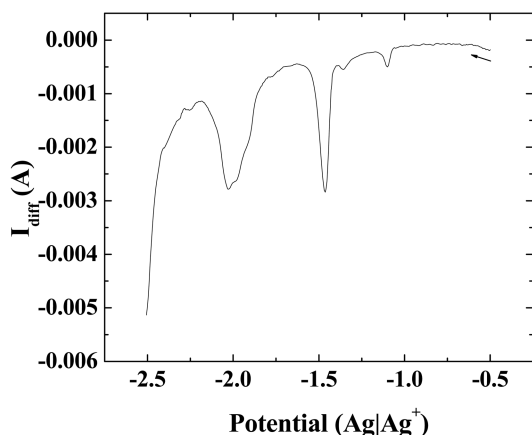


Fig. 6. Square wave voltammogram obtained from W in LiCl-KCl melt containing  $2.04 \times 10^{-5}$  mol/cm<sup>3</sup> UCl<sub>3</sub> and  $6.07 \times 10^{-5}$  mol/cm<sup>3</sup> GdCl<sub>3</sub> at 450°C. F = 10 Hz and dE = 4 mV.

자세히 살펴보면 가돌리늄의 환원전류 피크는 대칭적이지 않으며 두 개 이상의 피크가 합쳐진 것으로 보인다. 즉, LSV 에서는 분명하게 분리되지 않지만 NPV 결과를 미분함으로써 두 개의 피크가 극명하게 나타남을 알 수 있다. 이는 NPV법을 사용했을 때 측정된 전류가 정상상태 (steady-state)에서 측정된 값이기 때문일 것으로 예상된다.

Fig. 6은 Fig. 3과 같은 환경에서 직각파전압전류법 (square wave voltammetry; SWV)을 수행하여 얻은 곡선이다. 이 그림에는 Fig. 2에서 관찰된 모든 피크가 존재하며 각 피크의 S/N 비가 Fig. 2에 비해 크게 증가되었음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 5의 NPV의 미분곡선과 같이 가돌리늄의 환원전류 피크는 정확히 분리되지 않는다.

이상의 결과로부터, 고온 화학공정에서 사용될 수 있는 전기화학적 센서 개발을 위해, UCl<sub>3</sub>와 GdCl<sub>3</sub>를 고온 LiCl-KCl 공융염에 녹여 다양한 전기화학적 방법을 테스트하였다. CV나 LSV의 경우 피크가 넓고 날카롭지 못하지만 SWV나 NPV법은 각 원소의 반응 전위를 잘 표현하고 있다. 또한 일정전류법을 사용하였을 때에는 가한 전류밀도와 전해질 내 반응물에 따라 그 전위값이 다르게 나타남을 보였다. 앞으로 여러 악티늄 및 란타늄에 관한 전기화학적 데이터 베이스를 구축하여 이러한 전기화학적 신호와 연관 짓는다면 이 연구에서 보인 여러 전기화학적 측정법은 고온 화학공정에서 필요한 전기화학적 센서 기술로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

고온 화학공정에서 필요한 고온 용융염 내 센서의

제작을 위해, 악티늄 원소로는 UCl<sub>3</sub>를, 란타늄 원소로는 GdCl<sub>3</sub>를 선택하여 고온 LiCl-KCl 용융염에 녹여 UCl<sub>3</sub>와 GdCl<sub>3</sub>의 전기화학적 거동을 조사하였다. U<sup>3+</sup>는 고온 LiCl-KCl 용융염내에서 -0.2 V/-0.35 V에서 산화/환원반응의, -1.51 V/-1.35 V에서 전착/해리 반응전류의 피크를 나타냈다. Gd<sup>3+</sup>의 경우 -2.15 V에서 전착반응 피크를, -1.9 V에서 산화해리전류 피크를 나타냈다. U<sup>3+</sup>와 Gd<sup>3+</sup>의 혼합 고온 용융염에서는 Gd<sup>3+</sup>의 전착 피크가 양의 전위로 이동하였으며 이는 전착된 우라늄 표면에서의 전자기동반 반응이 용이하거나 U-Gd 합금전착에 기인한 것으로 예상된다. 일정전류법의 결과는 시간이 지남에 따라 전위값이 일정해졌으며 그 전위값은 전해질 내 반응물의 환원 전위값과 일치하였다. 가한 전류값이 증가함에 따라 나타난 전류값 또한, 우라늄의 환원전위, 가돌리늄이 환원전위값 순으로, 음으로 증가하였다. 노멀펄스전압전류법과 직각파전압전류법은 두 원소를 정성분석을 위한 좋은 전기화학적 방법이며 특히 노멀펄스전압전류곡선을 미분한 결과는, 사용된 다른 방법에 비해 반응전류의 피크 분리가 잘 일어났다. 이러한 결과는 고온화학공정에 사용될 센서로서 전기화학적 센서 기술이 좋은 방법론임을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 지원으로 수행한 중장기 원자력연구개발사업의 연구결과이며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. P. N. Pearson and M. R. Palmer, 'Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years' *Nature*, **406**, 695 (2000).
2. D. K. Cho, S. K. Yoon, H. J. Choi, J. Choi, and W. I. Ko, 'Reference Spent Nuclear Fuel for Preprocessing Facility Design' *J. Kore. Rad. Waste Soc.*, **6**, 225 (2008).
3. J. H. Yoo, B. J. Lee, H. S. Lee, and E. H. Kim, 'Investigation of Pyroprocessing Concept and Its Applicability as an Alternative Technology for Conventional Fuel Cycle' *J. Kore. Rad. Waste Soc.*, **5**, 283 (2007).
4. O. Shirai, M. Iizuka, T. Iwai, Y. Suzuki, and Y. Arai, 'Electrode reaction of plutonium at liquid cadmium in LiCl-KCl eutectic melts' *J. Electroanal. Chem.*, **490**, 31-36 (2000).
5. T. Nagai, A. Uehara, T. Fujii, O. Shirai, N. Sato, and H. Yamana, 'Redox equilibrium of U<sup>4+</sup>/U<sup>3+</sup> in molten NaCl-2CsCl by UV-Vis spectrophotometry and cyclic voltammetry' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **42**, 1025-1031 (2005).
6. Y. D. Yan, M. L. Zhang, Y. Xue, W. Han, D. X. Cao, and L. Y. He, 'Electrochemical study of the codeposition of Mg-Li-Al alloys from LiCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-AlCl<sub>3</sub> melts' *J.*

- Appl. Electrochem.*, **39**, 455-461 (2009).
7. J. Serp, M. Allibert, A. Le Terrier, R. Malmbeck, M. Ougier, J. Rebizant, and J. P. Glatz, 'Electrodeposition of actinides from lanthanides on solid aluminum electrode in LiCl-KCl eutectic melts' *J. Electrochem. Soc.*, **152**, C167-C172 (2005).
  8. H. Kawamura and Y. Ito, 'Electrodeposition of cohesive carbon films on aluminum in a LiCl-KCl-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> melt' *J. Appl. Electrochem.*, **30**, 571-574 (2000).
  9. M. R. Bermejo, F. de la Rosa, E. Barrado and Y. Castrillejo, 'Cathodic behaviour of europium(III) on glassy carbon, electrochemical formation of Al<sub>3</sub>Eu, and oxoacidity reactions in the eutectic LiCl-KCl' *J. Electroanal. Chem.*, **603**, 81-95 (2007).
  10. L. Cassayre, C. Caravaca, R. Jardin, R. Malmbeck, P. Masset, E. Mendes, J. Serp, P. Soucek, and J. P. Glatz, 'On the formation of U-Al alloys in the molten LiCl-KCl eutectic' *J. Nucl. Mater.*, **378**, 79-85 (2008).
  11. T. J. Kim, Y. H. Cho, I. K. Choi, J. G. Kang, K. Song, and K. Y. Jee, 'Application of a chronoamperometric measurement to the on-line monitoring of a lithium metal reduction for uranium oxide' *J. Nucl. Mater.*, **375**, 275-279 (2008).
  12. Y. J. Park, T. J. Kim, Y. H. Cho, Y. J. Jung, H. J. Im, K. Song, and K. Y. Jee, 'EPR investigation on a quantitative analysis of Eu(II) and Eu(III) in LiCl/KCl eutectic molten salt' *Bull. Korean Chem. Soc.*, **29**, 127-129 (2008).
  13. T. J. Kim, Y. H. Cho, I. K. Choi, J. G. Kang, and K. Y. Jee, 'EPR and luminescence studies of Eu(II) magnetically diluted in LiCl-KCl salt' *J. Lumin.*, **127**, 731-734 (2007).
  14. P. Masset, D. Bottomley, R. Konings, R. Malmbeck, A. Rodrigues, J. Serp, and J. P. Glatz, 'Electrochemistry of uranium in molten LiCl-KCl eutectic' *J. Electrochem. Soc.*, **152**, A1109-A1115 (2005).
  15. Y. J. Park, Y. J. Jung, S. K. Min, Y. H. Cho, H. J. Im, J. W. Yeon, and K. Song, 'A Quartz Tube Based Ag|Ag<sup>+</sup> Reference Electrode with a Tungsten Tip Junction for an Electrochemical Study in Molten Salts' *Bull. Korean Chem. Soc.*, **30**, 133-136 (2009).
  16. O. Shirai, T. Iwai, Y. Suzuki, Y. Sakamura, and H. Tanaka, 'Electrochemical behavior of actinide ions in LiCl-KCl eutectic melts' *J. Alloys Comp.*, **271-273**, 685-688 (1998).
  17. K. Serrano and P. Taxil, 'Electrochemical reduction of trivalent uranium ions in molten chlorides' *J. Appl. Electrochem.*, **29**, 497-503 (1999).
  18. E. Herrero, L. J. Buller, and H. D. Abruna, 'Underpotential deposition at single crystal surfaces of Au, Pt, Ag and other materials' *Chem. Rev.*, **101**, 1897-1930 (2001).
  19. J. Serp, P. Lefebvre, R. Malmbeck, J. Rebizant, P. Vallet, and J. P. Glatz, 'Separation of plutonium from lanthanum by electrolysis in LiCl-KCl onto molten bismuth electrode' *J. Nucl. Mater.*, **340**, 266-270 (2005).
  20. M. R. Bermejo, J. Gomez, J. Medina, A. M. Martinez, and Y. Castrillejo, 'The electrochemistry of gadolinium in the eutectic LiCl-KCl on W and Al electrodes' *J. Electroanal. Chem.*, **588**, 253-266 (2006).