'2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

이종원자가 치환된 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$ 계의 결함 구조 재고

Review of Defect Models in $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$ system

양재호, 강기원, 김건식, 송근우, 이영우

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기존에 발표된 Ln계 및 Nb^{5+}의 이종원소가 치환된 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$계에서 산소비화학양론과 전기전도도의 산소 분압 의존 양상을 비교 분석하였다. 비교 결과 발표된 산소비화학양론과 전기전도도의 산소분압의존 양상은 서로 일치하지 않으며 이를 기초로 제시된 결함구조들도 서로 일관성이 없음을 확인하였다. 이를 해결하기 위한 새로운 산소 화학양론기준을 제시하였고 이 화학양론을 기초로 $(U,Er)O_2$, $(U,Gd)O_2$, $(U,Nb)O_2$ 계에서 산소분압변화에 따른 산소 비화학양론과 전기전도도 변화를 재해석 하였다.

Abstract

Previously reported data about the dependencies of oxygen nonstoichiometry and electrical conductivity on oxygen partial pressure in Lanthanide and Nb^{5+} doped UO_2 systems have been reviewed. It was found that consistency between oxygen nonstoichiometry and electrical conductivity was somewhat poor and consequently, the suggested defect models were incongruent with each other. A new stoichiometric oxygen composition was proposed to solve this inconsistency and the oxygen partial pressure dependency of nonstoichiometry and electrical conductivity was reanalyzed in $(U,Er)O_2$, $(U,Gd)O_2$ and $(U,Nb)O_2$ system.

1. 서론

산화물 핵연료인 UO_2는 산소잉여 비화학양론 산화물(oxygen-excess nonstoichiometric oxide)의 전형이다. 산소 잉여 UO_{2+x}의 결함 구조는 Willis [1]에 의해 밝혀졌으며, 산소분압과

온도에 따른 산소 비화학양론의 변화는 $\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$ cluster 의 생성 및 이온화로 설명되고 있다[2-6].

U와는 원자가가 다른, 원소들 예를 들면 가연성 흡수 핵연료의 란타나이드계 원소, MOX연료에서의 Pu, 혹은 Nb 등 각종 첨가제 원소들은 산화물 핵연료에서 기술적으로 매우 중요하며 UO_2의 핵연료 특성을 향상시키기 위해 UO_2에 치환 혹은 혼합되어 사용된다[7]. 이종원소의 치환으로 UO_2의 열역학 특성이 다양하게 영향을 받는다. 이 중 hypostoichiometric 산소 조성 영역의 발생이나, 산소 조성의 불연속 변화등이 특징적인 예이다. 많은 연구자들은 산소분압과 온도의 변화에 따른 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$의 산소 비화학양론 변화나 전기전도도 변화를 측정하여 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$ 결함구조를 고찰하였다[8-15]. 산소 비화학양론(x)과 전기전도도(σ)는 산소 분압에 대해 각 각 $x \propto P_{O_2}^{1/n}$, $s \propto P_{O_2}^{1/n'}$ 의 관계를 가진다. 실험을 통해 얻은 산소 분압과 비화학양론, 전기전도도의 변화를 만족하는 합당한 mass action law와 전기중성 조건을 적용하여 산소 결함 구조를 유추할 수 있다. 이종원자가 치환된 여러 계에 대해 제시된 결함구조들은 서로 유사한 면들을 가진다. O/M비가 2보다 큰 산소 조성에서는 UO_2의 $\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$cluster나 이와 유사한 $\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$ cluster model이 적용된다. O/M비가 2보다 작은 hypostoichiometric 영역에서는 산소공공의 형성 및 이들 간의 결합으로 결함구조를 설명한다.

지금까지 발표된 결과들을 보면 많은 의문점들이 존재한다. 전기전도도와 산소 비화학양론은 동일한 정보를 제공하여야 함에도 불구하고 산소 비화학양론과 전기전도도측정을 통해 독립적으로 얻어진 결함 구조는 서로 일치하지 않는다. 또한 산소 비화학양론의 변화로 예측한 carrier의 종류도 서로 일치하지 않는다. 그러나 아직까지 이러한 의문들이 잘 설명되지 않고 있다.

본 논문에서는 지금까지 발표된 +3가의 원자가를 가지는 란타나이트계 원소와 +5가의 원자가를 가지는 Nb^{5+} 이종원자가 치환된 UO_2계에서의 산소 분압에 따른 전기 전도도와 산소 비화학양론의 변화에 대한 결과를 비교 정리하고 측정 결과로부터 유추된 결함구조를 상호 비교하고자 한다. 특히 전기전도도와 산소비화학양론으로부터 독립적으로 얻어진 결함구조가 서로 일치하지 않는 원인에 대해 관심을 기울이고자 한다. 이러한 정리를 통해 산소 비화학양론과 전기전도도로부터 동일한 결함구조를 예측할 수 있는 해석 방법을 보이고자 한다. 이를 발표된 실험결과에 적용하여 그 유용성을 고찰하고 우리가 실험한 결과와 비교하고자 한다.

2. 란타나이드계 원소가 치환된 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$

란타나이드계 원소는 3+의 고정된 원자가를 가지고 있다. 때문에 UO_2에 치환된 경우 상대적으로 낮은 산소 조성을 가지는 상이 안정하게 된다. 즉, UO_2와 비교하여 란타나이드계

원소가 치환된 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$는 O/M비가 2보다 작은 hypostoichiometric 영역이 나타나며, O/M비가 같으면 가지는 평형 산소 분압이 증가하게 된다. 산소분압에 따른 산소비화학양론의 변화는 세 영역으로 나뉠 수 있다. 낮은 산소분압 영역에서는 O/M비가 2보다 작은 hypostoichiometric 조성을 가지고 중간 산소분압 영역에서는 O/M비가 산소분압에 무관한 stoichiometric 조성을 가지며 높은 산소분압 영역에서는 O/M비가 2보다 큰 hyperstoichiometric 조성을 가진다.

2.1. Hyperstoichiometric 영역에서의 결함 구조

Hyperstoichiometric 영역에서의 결함구조는 순수한 UO_{2+x} 에서의 결함 구조와 유사한 $\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$나 $\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$ defect cluster model이 제시된다. Kroger-Vink 기호를 이용하여 두 종류의 결함 구조 생성 반응식을 나타내면 다음과 같다.

$$2V_i^a + 2V_i^b + 2O_o + O_2 \leftrightarrow \left[2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right]^{n'} + nh^{\bullet} \quad \text{식(1)}$$

$$V_i^a + 2V_i^b + 2O_o + 1/2O_2 \leftrightarrow \left[O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right]^{n'} + nh^{\bullet} \quad \text{식(2)}$$

이 반응식에서 전기적 중성조건은 각각 다음과 같다.

$$n\left[\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)^{n'}\right] = h^{\bullet} \quad \text{식(3)}$$

$$n\left[\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)^{n'}\right] = h^{\bullet} \quad \text{식(4)}$$

생성되는 결함 농도와 산소비화학양론은 각각 다음의 관계식을 가진다.

$$\left[\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)^{n'}\right] = x \quad \text{식(5)}$$

$$\left[\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)^{n'}\right] = \frac{1}{2}x \quad \text{식(6)}$$

위에 나열한 각각의 관계식을 만족하는 mass action law를 적용하여 산소비화학양론과 산소분압과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$x, s \propto P_{O_2}^{1/(n+1)} \text{ for } \left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right) \text{ cluster model} \quad \text{식(7)}$$

$$x, s \propto P_{O_2}^{1/2(n+1)} \text{ for } \left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right) \text{ cluster model} \quad \text{식(8)}$$

많은 연구자들이 산소분압에 따른 산소비화학양론과 전기전도도의 변화를 동시에 혹은 독립적으로 측정하여 결함구조를 설명하고 있다. 이들의 결과를 종합해 보면 산소비화학양론의 경우 n이 1~2의 값을 가지며 전기전도도의 경우는 치환된 Ln원소의 양에 의존하지만 10mol%이하의 치환량을 가진 계의 경우 n은 약 2~4의 값을 가진다. 원칙적으로 산소비화학양론과 전기전도도는 서로 선형적으로 비례하기 때문에 기울기 값 n의 차이를 명확하게 설명하기 어렵다. 산소비화학양론의 결과로부터 연구자들은 hyperstoichiometric 영역에서의 산소

결함은 $\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)'$ 나 $\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$ 와 $\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$ 와의 혼합상태로 해석하고 있다. 그러나 전기전도도 결과로는 정확한 결함구조를 제시하지 못하고 있다.

2.2. Hypostoichiometric 영역에서의 결함 구조

Hypostoichiometric 영역에서의 산소분압에 따른 산소 비화학양론의 변화와 전기전도도의 변화는 hyperstoichiometric 영역보다 일관성있게 설명하기가 더욱 어렵다. 우선 hypostoichiometric 영역에서 제시되고 있는 다양한 결함구조는 모두 산소 공공과 관련되어 있다. 산소공공의 발생은 자유전자의 생성을 의미한다. 따라서 전기전도도는 hyperstoichiometric 영역에서는 p-type이지만 hypostoichiometric 영역에서는 n-type 전도특성을 보여야 하며 산소분압이 낮아지면 전기전도도가 증가하여야 한다. 그러나 지금까지 전기전도도측정 결과를 보면 낮은 산소 분압에서 전기전도도의 증가를 확인할 수 없다. 오히려 Dudney[3]등은 낮은 산소 분압으로 갈수록 3+가의 Ln 양이온과 charge compensation되어 있던 hole농도가 감소하므로 전기전도도가 낮아질 것으로 예상하였다. 그들은 충분히 낮은 산소 분압조건에서 실험하지 못하여 이를 확인하지 못하였다. 그러나 Ohmichi [17]등은 hypostoichiometric 산소 조성으로 맞추어진 시편의 온도에 따른 전기전도도 측정을 통해 실제로 낮은 O/M비을 가지는 시편의 전기전도도가 더 낮다는 것을 확인하였다. 또한 Matsui [14]등은 $(U_{1-y}La_y)O_{2\pm x}$계에서 측정한 전기전도도에서 산소비화학양론의 변화로 예측한 바와는 반대로 낮은 산소 분압에서 전기전도도가 감소하는 것을 발견하였다. 이러한 사실들은 산소 비화학양론으로 구한 낮은 산소 분압에서의 결함종류가 실제 결함과 일치하지 않는다는 것을 의미한다. 대부분의 연구 결과는 중간 영역의 산소 분압과 낮은 산소 분압에서 전기전도도가 일정하다고 보고 이는 해당하는 산소분압 영역에서 hole이든 전자든 carrier의 농도가 산소분압과는 무관하고 치환된 Ln계 양이온의 농도에만 관계된다고 해석하고 있다. 그러나 이는 산소분압에 따라 산소조성이 변하지 않는 영역에서는 바른 가정이지만 hypostoichiometric 산소 조성에서는 성립하기 힘든 가정이다.

2.3. 기준 산소화학양론의 재고

UO_{2+x}와는 달리 Ln계 이종원자가 치환된 경우 산소비화학양론과 전기전도도가 산소분압에서로 다른 의존 관계를 보이는 것을 설명하기 위해서는 전기전도도 혹은 산소 비화학양론과 관계되어 농도가 변화하는 이온에 대해 고찰할 필요가 있다. UO_{2+x}의 경우 산소의 조성 변화는 U^{5+}와 U^{4+}의 농도변화로 보상한다. 치환되는 Ln계 양이온은 U 양이온과는 달리 산소 분압에 관계없이 고정된 3+의 원자가를 가진다. 따라서 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$ 구조를 유지하고 있는 산소 분압영역에서 존재하는 양이온의 종류는 U^{5+}, U^{4+}, Ln^{3+}의 세 종류이다. O/M가 2.0인 화학양론은

치환된 Ln^{3+}의 농도와 동일한 농도의 U^{4+}양이온이 U^{5+}로 산화되어 있고 이 U^{5+}의 농도가 일정한 산소 분압 영역에서 변하지 않고 있는 상태로 볼 수 있다. O/M비가 2.0보다 작은 값을 가지는 산소 분압 영역에서는 U^{5+}의 농도가 산소 분압의 감소에 따라 점차 줄어들게 된다. 산소 분압이 아주 낮아져서 모든 U^{5+} 양이온이 U^{4+} 양이온으로 환원되면 U^{4+}의 양이온이 U^{3+}로 환원되는 산소분압전까지는 U^{4+}와 Ln^{3+}로만 존재하는 조성영역이 생기며 이 또한 산소분압에 관계없이 일정한 산소 조성을 가지는 영역이 되므로 다음과 같은 조성식을 가지는 화학양론으로 정의할 수 있다.

$$(U_{1-y}^{4+}Ln_{y}^{3+})O_{2-\frac{y}{2}} \qquad \text{식(9)}$$

산소 분압의 증가에 따라 변화하는 산소 조성은 이식을 기준으로 다음식과 같이 표현된다.

$$(U_{1-y-2x}^{4+}U_{2x}^{5+}Ln_{y}^{3+})O_{2-\frac{y}{2}+x} \qquad \text{식(10)}$$

이종원소가 치환된 UO_2 산화물에서의 기준 화학양론을 2.0이 아닌 식(9)로 정의할 때 산소분압에 따른 비화학양론의 변화와 전기전도도의 변화가 서로 일관성을 가지게 되는지 몇가지 system을 통해 알아보자.

2.4. $(U_{1-y}Er_y)O_{2-\frac{y}{2}+x}$계 재해석

여러 종류의 가연성 흡수 물질을 포함하는 $(U_{1-y}Ln_y)O_{2\pm x}$에 대하여 산소분압에 따른 비화학양론과 전기전도도의 변화를 독립적으로 측정한 예는 많지만 같은 종류의 시료에 대해, 같은 조건에서 동시에 측정한 예는 많지 않다. 그러나 산소분압에 따른 비화학양론의 변화를 측정한 각각의 결과에 새로운 산소기준화학양론을 적용한 결과들은 유사하며 여기서는 $(U_{1-y}Er_y)O_{2\pm x}$ 를 대표적인 예로 제시하겠다. $(U_{1-y}Er_y)O_{2\pm x}$의 산소 분압에 따른 산소 비화학양론의 변화에 대한 측정은 Kim[13]등에 의해 자세히 이루어졌다. 최근에 Kang[15]등은 Kim등이 실험한 같은 종류의 시편에 대해 같은 온도에서 전기전도도를 측정한 결과를 발표하였다. 산소화학양론을 2.0으로 정의할 경우 hyperstoichiometric 영역에서의 문제점은 산소 분압에 따른 산소비화학양론과 전기전도도의 변화가 서로 일치하지 않아서 결함구조를 일관성있게 예측할 수 없다는 데에 있다. 이 둘의 실험에서도 hyperstoichiometric 영역에서 산소비화학양론은 산소분압에 $x \propto P_{O_2}^{1/2}$의 관계를 가지며 $\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)$의 결함 구조로 설명되나, 전기전도도의 경우 $s \propto P_{O_2}^{1/4}$ 의 관계식을 가져 $\left(O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)'$ 결함과 $\left(2O_i^a \cdot 2V_o \cdot 2O_i^b\right)'$ 결함의 가능성을 동시에 제시한다. 그러나 식(9)의 화학양론을 적용할 경우에는 이러한 부조화를 배제할 수 있다. 그림 1은 식(9)의 화학양론 정의를 통해 얻은, Er이 0.06mol 치환된 $(U_{0.94}Er_{0.06})O_{1.97+x}$에서의

산소분압에 따른 비화학양론과 전기전도도의 변화를 동시에 도시한 것이다. 이 그림에서 보면 산소 비화학양론과 전기전도도의 변화 곡선 기울기가 서로 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

2.5. $(U_{1-y}Gd_y)O_{2-\frac{y}{2}+x}$ 계 재해석

$(U_{1-y}Er_y)O_{2\pm x}$계를 통해 새로운 산소 기준 화학양론의 적용이 hyperstoichiometric 영역에서의 산소 비화학양론과 전기전도도 간의 산소분압의존을 일관성있게 설명할 수 있다는 것을 확인하였다. Hypostoichiometric 영역에서도 일관성의 유지를 확인하여야 하나 기존에 발표된 결과들 중에는 비교대상을 찾기 어렵다. 최근 저자들은 Gd가 치환된 UO_2의 여러 온도에서 산소분압에 따른 전기전도도의 변화와 산소 비화학양론의 변화를 측정하였다. 이 측정을 통해 낮은 산소 분압에서의 연속적인 전기전도도 감소를 확인하였다. 이것은 낮은 산소 분압에서 공공의 생성과 그로 인한 자유전자의 증가로 결함 구조를 설명하는 기존의 가정과 반대되는 특징적인 결과이다. 그러나 식(9)의 새로운 화학양론을 적용하면 이를 설명할수있다. 식(10)에 의하면 순수한 UO_2의 경우와 마찬가지로 Gd가 치환된 UO_2도 산소분압의 변화에 따라 산소의 조성은 항상 증가하게 된다. 따라서 생성되는 산소결함은 항상 침입형산소와 연관되며 이는 hypostoichiometric 영역에서도 산소분압에 따라 농도가 변하는 carrier는 항상 hole임을 의미한다. 따라서, Dudney[3]가 예측한 바와 같이 산소 분압이 감소하면 hole농도가 감소 하기 때문에 전기전도도는 감소하게 된다. 그림 2는 Gd가 0.087mole 치한된 $(U_{0.913}Gd_{0.087})O_{1.9565+x}$ 계에서 산소분압에 따른 전기전도도와 산소비화학양론 변화를 도시한 것이다. Er이 치환된 경우와 마찬가지로 전기전도도와 산소비화학양론의 산소분압의존이 서로 잘 일치한다는 것을 확인 할 수 있다.

Fujino[18-24]등은 2+가나 3+가의 이종원소가 치환된 $(U_{1-y}M_y)O_{2\pm x}$계의 열역학적인 특징은 산소화학양론을 2.0으로 정의하고 제안된 산소와 관련된 결함으로는 설명이 어렵다는 것을 확인하였다. 이들은 산소나 그들간의 결합으로 이루어진 산소 결함의 생성이 아닌 산소비화학양론에 따라 변하는 양이온 혹은 양이온 결합체들의 종류와 농도를 가정하여 계산하였다. 이를 바탕으로 그들은 해당 산소 조성에서의 자유에너지를 양이온 농도변화에 따른 configurational entropy의 변화에 중점을 두고 계산하였으며 이를 실험결과와 비교하여 존재하는 양이온 cluster의 종류를 제시하는 일련의 논문들을 발표하였다. 그들도 hypostoichiometric 영역에서 산소공공이 존재한다고 가정하였으나, 산소 분압이 낮아지면 U^{5+}의 소진과 함께 양이온 농도의 변화에 의한 configurational entropy가 급격하게 ∞ 로 수렴하게 된다고 보고하고 있다. 이는 우리가 제시하는 새로운 산소 기준 화학양론의 설정과 일맥상통하는 바가 있다.

특히, 가장 최근에 Nakajima [25] 등은 Y_2O_3가 치환된 UO_2의 mass spectroscopy 실험을

통해 $(1-x)UO_2$-$xYO_{1.5}$의 조성을 가지는 화합물의 산소포텐샬이 산소조성이 $UO_{2-0.5x}$인 화합물의 산소포텐샬과 거의 같다는 사실을 발표하였다. 이는 우리가 제시한 식(9)의 기준 산소 화학 양론 조성에서 산소 포텐샬이 급격하게 감소한다는 의미이며 이는 우리의 제시한 기준 산소 화학양론의 새로운 정의가 매우 적절하다는 것을 확인해 준다.

3. $(U_{1-y}Nb_y)O_{2\pm x}$ 계 재해석

Nb이 치환된 $(U_{1-y}Nb_y)O_{2\pm x}$ 계는 고정된 원자가를 가지는 Ln^{3+}가 치환된 경우보다 다소 복잡한 양상을 보인다. Matsui [16]등은 Nb가 치환된 UO_2의 산소분압에 따른 산소 비화학양론과 전기전도도 변화를 측정하였다. 이들의 결과에 따르면 Nb가 치환된 경우 산소분압에 따른 산소 비화학양론은 hyperstoichiometric 영역만 존재하며 UO_2와는 달리 특정 O/M비에서 산소 포텐샬이 급격하게 증가하는 것을 관찰하였다. 산소 포텐샬이 급격하게 증가하는 O/M비는 Nb 치환량이 증가에 따라 증가하는 것을 확인하였다. 또한 같은 O/M비를 가지는 산소포텐샬이 순수한 UO_2 보다 작다. 반면에 전기전도도의 산소분압의존 특성을 보면 산소 분압이 증가함에 따라 전기전도도가 감소하다가 특정 산소분압 이상이 되면 다시 증가하는 모습을 보인다. Matsui 등은 산소비화학양론과 전기전도도 변화를 바탕으로 다양한 결함구조를 제시하였지만 이 계에서도 산소비화학양론과 전기전도도가 동일한 산소분압의존 특성을 보이지 않고 있다.

Nb는 Ln^{3+}와는 달리 산소 분압에 따라 4+나 5+의 원자가를 가질 수 있다. O/M비가 2.0인 경우 Nb는 Nb^{4+}로 존재한다. 산소분압이 증가하면 U^{4+}나 Nb^{4+}가 5+로 산화가 되며 산소 조성이 증가하게 된다. 이때 같은 산소 포텐샬에서 평형 O/M비가 순수한 UO_2 보다 낮으므로 Nb^{4+}가 U^{4+}보다 먼저 Nb^{5+}로 산화되고 그 후에 U^{4+}가 U^{5+}로 산화 된다고 가정할 수 있다. 이렇게 가정하면 U^{4+}와 Nb^{5+} 만 존재하는 조성을 새로운 화학양론으로 정의할 수 있다.

$$(U_{1-y}Nb_y)O_{2+0.5y\pm x} \qquad \text{식(11)}$$

이 새로운 산소화학양론을 기준으로 전기전도도의 산소분압 거동을 분석하면 낮은 산소분압에서는 Nb^{5+}가 Nb^{4+}로 환원되면서 산소 공공을 형성하고 자유전자를 발생시키므로 전기전도도가 증가하고 높은 산소 분압에서는 U^{4+}가 U^{5+}로 산화 되면서 침입형산소가 생기고 hole이 형성되어 전기전도도가 증가하게 된다.

그림 3은 새로운 산소 화학양론을 적용하여 Nb가 0.05mol 치환된 UO_2에서의 산소분압에 따른 전기전도도와 산소비화학양론 변화를 함께 도시한 그림이다. 기울기는 약간 다르지만 전체적인 변화 양상은 O/M비=2.0을 화학양론으로 정의할 때 보다 유사한 거동을 나타냄을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

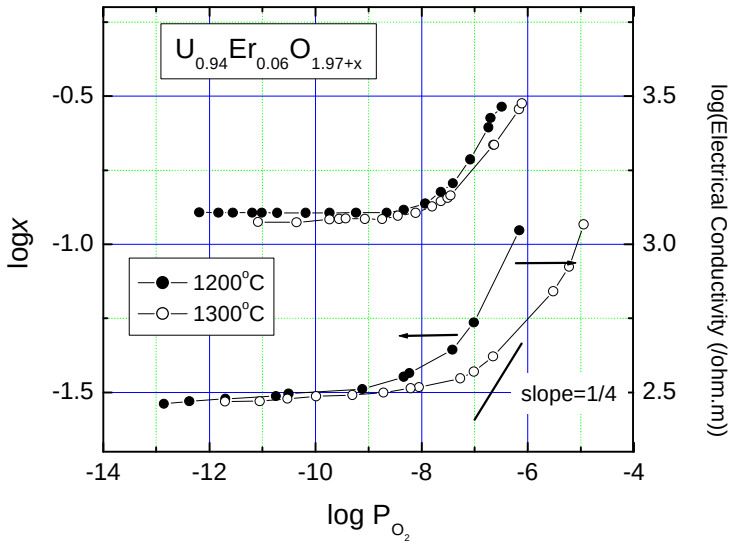

그림 1. $(U_{0.94}Er_{0.06})O_{1.97+x}$에서의 산소분압에 따른 전기전도도 및 산소비화학양론의 변화

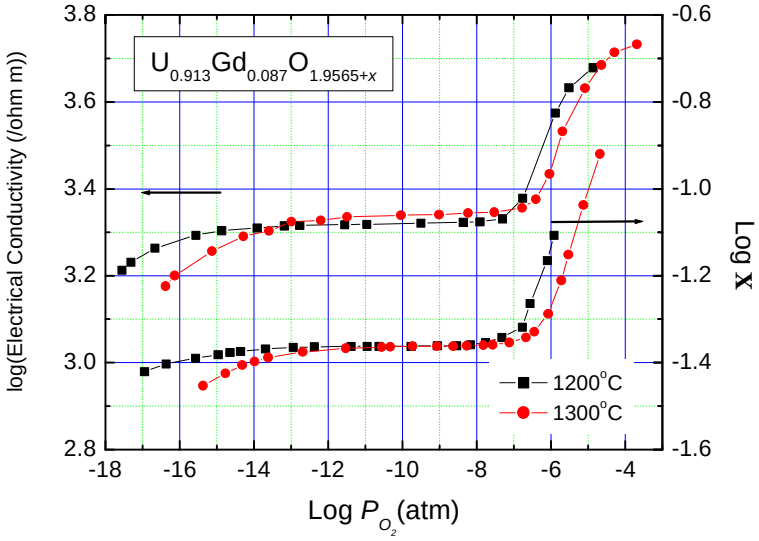

그림 2. $(U_{0.913}Gd_{0.087})O_{1.9565+x}$에서의 산소분압에 따른 전기전도도 및 산소비화학양론의 변화

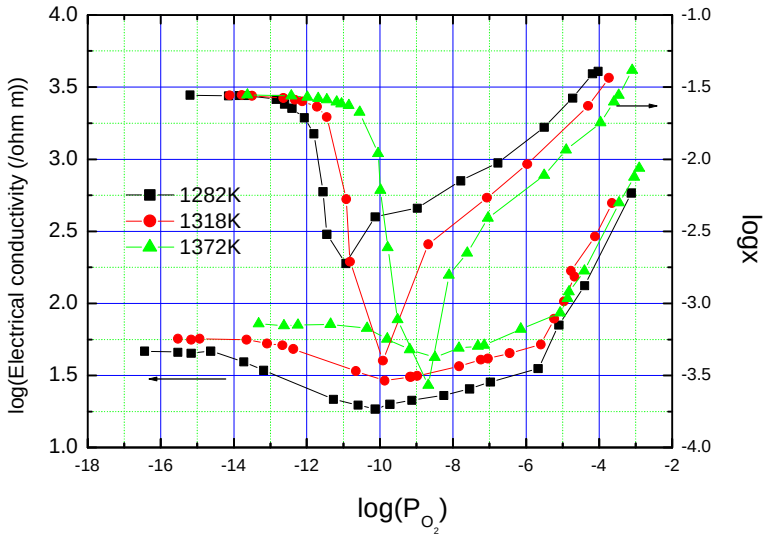

그림 3. $(U_{0.95}Nb_{0.05})O_{2.028\pm x}$에서의 산소분압에 따른 전기전도도 및 산소비화학양론의 변화

참고 문헌

[1] Willis, B.T.M. (1978) Acta Crystallogr., A34, 88

[2] Lee, H.M. (1973) J. Nucl. Mater., 48, 107

[3] Dudney, N.J., Coble, R.L. & Tuller, H.L., (1981) J. Am. Ceram. Soc. 64, 627

[4] Matsui, T. & Naito, K., (1985) J. Nucl. Mater., 132, 212

[5] Matsui, T. & Naito, K., (1986) J. Nucl. Mater., 138, 19

[6] Kang, S.H., Lee, J.H., Yoo, H.I., Kim, H.S. & Lee, Y.W. (2000) J. Nucl. Mater., 277, 339

[7] Assmann, H. & Bairiot, H., "Process and Product Control od Oxide Powder and Pellets for Reactor Fuel Application", in Guidebook on Quality Control of Water Reactor Fuel, Tech. Report Series N0.221, IAEA, Vienna (1983)

[8] Une, K. & Oguma, M., (1982) J. Nucl. Mater., 110, 215

[9] Une, K. & Oguma, M., (1983) J. Nucl. Mater., 115, 84

[10] Lindemer, T.B. & Brynestad, J., (1986) J. Am. Cerm. Soc. 69, 867

[11] Lindemer, T.B. & Sutton, Jr., A.L., (1989) J. Am. Cerm. Soc. 71, 553

[12] Park, K. & Olander, D.R., (1992) J. Nucl. Mater., 187, 89

[13] Kim, H.S., Yoon, Y.K. &Lee, Y.W. (1995) J. Nucl. Mater., 226, 206

[14] Matsui, T., & Nato, K. (1987) J. Nucl. Mater.,151, 86

[15] Kang, S.H., Yi, J.D., Yoo, H.-I., Kim, S.H. & Lee, Y.W., (2002) J. of Phys. & Chem. Od Solids, 63, 773

[16] Matsui, T., & Nato, K., (1985) J. Nucl. Mater.,136, 59

[17] Ohmichi, T., Takeshita, H., Fukushima, S., & Maeda, A., (1987) J. Nucl. Mater.,151, 90

[18] Fujino, T. et al. (1992) J. Nucl. Mater., 189, 103

[19] Fujino, T. et al. (1995) J. Nucl. Mater., 223, 6

[20] Fujino, T. et al. (1997) J. Nucl. Mater., 246, 150

[21] Fujino, T. et al. (1999) J. Nucl. Mater., 265, 154

[22] Fujino, T. et al. (2000) J. Nucl. Mater., 282, 232

[23] Fujino, T. et al. (2001) J. Nucl. Mater., 289, 270

[24] Fujino, T. et al. (2001) J. Nucl. Mater., 297, 332

[25] Nakajima, K., Ohmichi, T., & Arai, Y., (2002) J. Nucl. Mater., 304, 176