

## The Linear Thermal Expansion Measurements and Estimations for $UO_2$ and $(U_{1-y}Ce_y)O_2$ Pellet

Dong-Joo Kim,<sup>\*,\*\*†</sup> Yong-Soo Kim,<sup>\*</sup> and Young-Woo Lee<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Nuclear Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>\*\*</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received March 8, 2005; Accepted April 14, 2005)

### $UO_2$ 및 $(U_{1-y}Ce_y)O_2$ 소결체의 열팽창 측정 및 평가

김동주<sup>\*,\*\*†</sup> · 김용수<sup>\*</sup> · 이영우<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한양대학교 원자력공학과

<sup>\*\*</sup>한국원자력연구소 미래형원자로연료개발부  
(2005년 3월 8일 접수; 2005년 4월 14일 승인)

#### ABSTRACT

The linear thermal expansions of  $UO_2$  and  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$  pellet were measured from room temperature to 1400°C as a function of Ce contents (0, 7.63, 14.84, and 21.68 mol%) by using the TMA(Thermo-Mechanical Analysis) method. From the measured data, the linear thermal expansion rate, the coefficient of linear thermal expansion and density variation with temperature were calculated, and the best-fitted temperature-dependent equations were recommended. It was shown that the rate and coefficient of  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$  thermal expansion increased and the density decreased with increasing Ce contents.

**Key words :** Linear thermal expansion, Thermo-mechanical analysis, Uranium dioxide, Mixed oxide fuel

#### 1. 서 론

Ce 및  $CeO_2$ 는 여러 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있는 재료이다. 그러나 원자력재료 분야에서는 그 용도를 크게 두 가지로 고려 할 수 있다.

첫 번째로는  $PuO_2$ 의 활용 및 평가를 위한 모사 재료로써의 용도이다. 원자력발전의 연료로 사용되는 재료는 원자로의 형태에 따라 여러 가지 종류가 있지만, 일반적인 핵연료는  $UO_2$  소결체가 사용되고 있다. 또한, 사용후 핵연료 처리, 자원의 효율적 이용 등의 개선을 위하여, 좀더 개량되고 미래지향적인 형태의 핵연료 개발이 이루어지고 있다. 이러한 연구 중 한가지로서, 사용후 핵연료 내에 존재하는  $PuO_2$ 를  $UO_2$ 과 함께 이용하는 혼합 핵연료(Mixed Oxide Fuel, MOX)를 예로 들 수 있으며, 이는 고속증식로(Fast Breeder Reactor, FBR) 및 가압경수로(Pressurized light Water Reactor, PWR)의 연료로써 국내 외적으로 많은 연구가 진행 중이다.<sup>1-5)</sup> 그러나,  $PuO_2$ 는 취급이 용이하지 않기 때문에,  $PuO_2$ 를 대신하여 여러 가지 모사 실험 수행에 이용 될 수 있는 재료를 찾게 되었으

며,  $CeO_2$ 가 그 역할을 하고 있다. Ce는 Pu와 마찬가지로 +3 또는 +4의 원자가를 가지고 산화물(Oxide)을 형성하며, 이산화 우라늄( $UO_2$ ) 내에서 대부분이 치환형 고용체를 형성하는 등 여러 가지 고온 화학적 특성이 유사하다고 알려져 있다.<sup>6-11)</sup>

두 번째 활용은 핵분열 생성물(Fission product)로서 생성되는 Ce 또는  $CeO_2$ 가  $UO_2$  기지 내에 존재하면서 핵연료에 미치는 영향을 평가하는 데에 있다. 핵분열 시에는 주기율표에 있는 대부분의 원소가 생성된다고 해도 과언이 아닐 정도로 다양한 원소가 생성된다. 그 중에서도 Ce는  $CeO_2$ 의 형태로 존재하며, 핵분열 생성물 중 높은 비율을 차지하는 원소라고 할 수 있고, 핵연료의 성능, 특히 열물성을 감소시키는 요인으로 작용한다.

핵연료에 있어서 열전도도(Thermal conductivity), 열팽창(Thermal expansion), 비열(Specific heat) 등과 같은 열물성은 핵연료의 성능을 좌우하는 가장 중요한 특성이라 할 수 있으며, 이 중 열팽창은 소결체 형태의 핵연료와 금속 피복관 사이의 간격 유지에 변수로 작용하게 된다. 초기에는 핵연료와 피복관 사이에 일정 간격을 갖도록 핵연료봉을 제조하지만, 원자로 운전 중 핵연료 소결체의 팽창으로 인해 이 간격이 영향을 받아 소결체-피복관 상호작용(Pellet-Cladding Interaction : PCI)을 야기 시킨다. 이것은 원자로 운전 및 핵연료의 건전성을 평가하는 중요

<sup>†</sup>Corresponding author : Dong-Joo Kim  
E-mail : djkim@kaeri.re.kr  
Tel : +82-42-868-8867 Fax : +82-42-868-8868

한 인자로 꼽을 수 있다.

본 연구에서는 (U,Ce)O<sub>2</sub>의 열물성에 대한 연구로서, Ce 함량에 따른 열팽창을 TMA(Thermo-Mechanical Analysis) 방법을 이용하여 측정하고, 그 결과를 통해 열팽창률, 열팽창 계수, 밀도, 격자상수 등의 변화를 계산하였다.

## 2. 실험 방법

분말처리 및 소결체 제조 공정은 혼합-분쇄-성형-소결의 일반적인 공정을 거쳤다. BNFL(British Nuclear Fuels plc.)사의 IDR-UO<sub>2</sub>(Integrated Dry-Route)와 Aldrich사의 CeO<sub>2</sub> (99.9%) 분말을 Turbula™ mixer를 이용하여 1시간 동안 혼합하고, 고르게 섞일 수 있도록 attrition mill을 이용하여 분쇄를 하였다. 분쇄 과정을 거친 분말을 3 ton/cm<sup>2</sup>의 압력으로, Zn stearate 윤활제를 die wall lubrication 방식으로 이용하여 성형하였다. 그리고 소결은 1750°C, H<sub>2</sub> 분위기에서 4시간 동안 수행되었는데, 처음엔 5°C/min.으로 승온 시키다가 윤활제 물질을 휘발시키기 위해 800°C에서 1시간 동안 유지하고, 다시 4°C/min.의 승온속도로 1750°C까지 가열하여 4시간 동안 유지하였다.<sup>12)</sup>

제조된 소결체는 TGA(Thermo-Gravimetric Apparatus)를 이용하여 Ce 함량에 의해 감소하였을 수 있는 O/M 비를 측정하였으나, 1.99~2.00 이내의 near-stoichiometry 상태를 유지하고 있어, 본 실험에서는 O/M 비에 의한 영향을 배제 할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 X-선 회절분석(XRD)을 통해 소결체에서의 Ce 고용 여부를 확인하고, 격자상수, 이론밀도 등을 계산하였다. XRD 측정은 Cu-Kα target을 이용하여 2θ = 10~120°의 범위에서 step-scanning 방법(counting time = 5초, step width = 0.05°)으로 수행하였다. 또한 열팽창 측정은 각 소결체에 대하여 계산된 이론밀도에 대한 소결밀도(수침법에 의해 측정)의 상대치를 비교하여, Ce 함량에 따른 기공률 차이가 적은 시편을 선택하여 사용하였다(Table 1).

TMA(SETARAM, TMA92)를 이용하여 flowing Ar 분위기에서 상온에서 1400°C까지, 그리고 ASTM 권장 측정 방법<sup>13)</sup>에 따라 5°C/min.의 승온 속도로 가열하여 열팽창을 측정하였다. TMA의 시편 holder와 probe는 알루미늄 재질을 사용하였으며, 측정된 변형을 보정하기 위한 표준

시료도 마찬가지로 알루미늄 시편을 이용하였다. 또한, 측정된 열팽창 및 계산된 열팽창계수 등의 결과는 MATPRO<sup>21)</sup>의 UO<sub>2</sub> 데이터와 비교함으로써, 측정값 및 장치의 신뢰성을 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. XRD Peak Pattern 관찰 및 해석

(U,Ce)O<sub>2</sub> 소결체에 대하여 XRD를 이용하여 Ce 함량에 따른 peak pattern(Fig. 1)을 확인하였다. 형석 구조(fluorite structure)를 갖는 UO<sub>2</sub>와 CeO<sub>2</sub> 반응은 대부분의 Ce가 UO<sub>2</sub> 기지 내에서 치환형 고용체를 형성한다고 일반적으로 알려져 있는 바와 같이,<sup>15)</sup> 본 연구의 XRD 결과에서도 peak의 전체적인 pattern은 그대로 유지되면서, peak의 위치만 약간씩 UO<sub>2</sub>에서 CeO<sub>2</sub>의 main peak 쪽으로 이동하는 경향

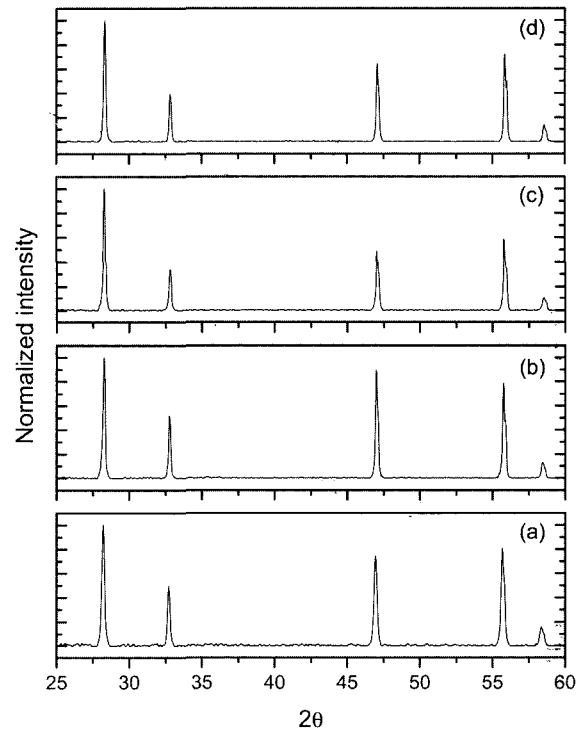


Fig. 1. XRD patterns of the (U<sub>1-y</sub>Ce<sub>y</sub>)O<sub>2</sub> samples with the Ce contents : (a) y=0, (b) 7.63, (c) 14.84, and (d) 21.68 mol%.

Table 1. Sample Compositions and Porosities, the Measured Lattice Parameters, and the Calculated Theoretical Densities of (U<sub>1-y</sub>Ce<sub>y</sub>)O<sub>2</sub> Used for This Experiment

CeO <sub>2</sub> content		Porosity (%)	Lattice parameter (nm)		Theoretical density (g/cm <sup>3</sup> )
wt%	mol%		Measured	Calculated	
0	0	2.613	0.54698	0.54695	10.960
5	7.63	2.009	0.54653	0.54651	10.683
10	14.84	2.136	0.54607	0.54610	10.419
15	21.68	2.826	0.54577	0.54570	10.168

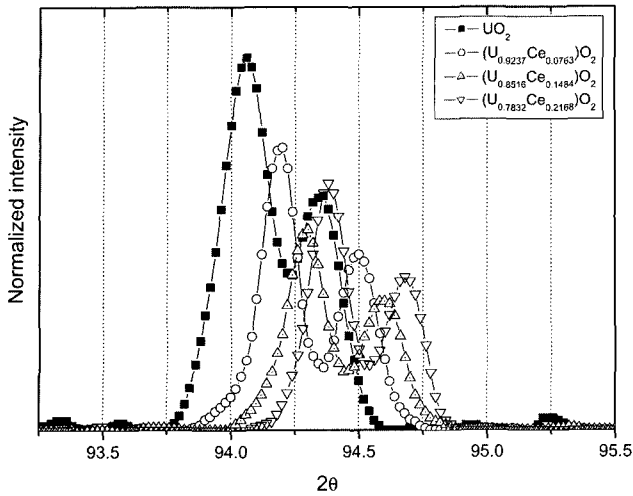


Fig. 2. Extended view of the XRD patterns for  $UO_2$  and  $(U,Ce)O_2$  (near 90 deg.).

을 보였다. 즉, 가장 높은 count intensity를 나타내는 (111) 면의 경우,  $2\theta$  값이  $UO_2$ 와  $CeO_2$ 가 각각  $28.28^\circ$ 과  $28.55^\circ$ 을 가지므로, Ce 함량이 증가 할수록 점점  $2\theta$  값이 증가하는 방향( $28.28 \rightarrow 28.55^\circ$ )으로 peak가 이동하는 경향만 보일 뿐, 이외의 Ce 혹은  $CeO_2$ 를 나타내는 peak는 전혀 관찰되지 않아, 결국 Ce는  $UO_2$  내에 대부분 고용되었음을 확인하였다. Fig. 2에서는 고각에서 나타나는 (511)면을 서로 비교하여, Ce 함량에 따라 peak가 이동하는 경향을 좀 더 확대하여 확인하였다.

또한 Table 1에 나타난 바와 같이, XRD peak 결과를 이용하여 Ce 함량에 따른 격자상수(Lattice parameter) 변화를 계산하였으며, 이를 통해 이론 밀도(Theoretical density)를 구하였다. 격자상수 계산은 XRD에 내장된 XPRESS™ 프로그램(X-ray powder research software)을, 그리고 계산 방법 중 Nelson-Riley 방식을 이용하였다. 측정된 격자상수는 Ce 함량 증가에 따라 선형적으로 감소함을 보였는데, 이는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 기존 결과<sup>8,16,17)</sup>와 잘 맞고 있다. 격자상수의 선형적 감소는 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에 사용된 함량 범위(0~21.68 mol%)에서는 시료의 O/M비가 near-stoichiometric 상태라는 것을 다시 한 번 보여주는 증거라고 할 수 있다. 측정된 결과를 이용하여, 다음과 같은 격자상수와 Ce 함량 간의 관계식을 식 (1)과 같이 도출하였다. 여기서 격자상수 ( $a$ )와 Ce 함량 ( $Ce$ )은 각각 nm와 mol% 단위로 나타내었다.

$$a = 0.54695 - 0.00582 \times \left( \frac{Ce}{U+Ce} \right) \quad (0 \leq Ce \leq 21.68 \text{ mol}\%) \quad (1)$$

그리고, 격자상수를 대입하여 다음과 같이 단위격자의 부피 (식 (2))와 질량 (식 (3))을 계산하여 이론밀도를 구

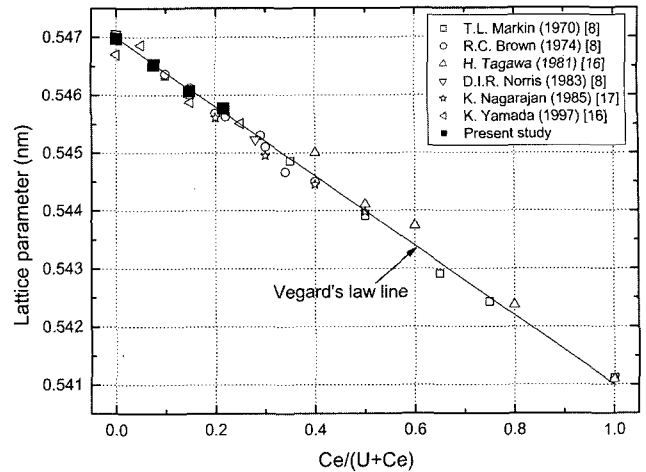


Fig. 3. The measured lattice parameters and literature data of  $(U,Ce)O_2$  as a function of the Ce contents.

하였다.

$$V = (a \times 10^{-7})^3, \quad (2)$$

$$m = \left\{ \left[ (4m_U + 8m_O) \times \frac{M_{UO_2}}{100} \right] + \left[ (4m_{Ce} + 8m_O) \times \frac{M_{CeO_2}}{100} \right] \right\} / N_A \quad (3)$$

여기서  $m_U$ ,  $m_O$ ,  $m_{Ce}$ 는 U, O, Ce의 질량으로 각각 238.029, 15.994, 140.12의 값을 사용하였다. 또한  $M_{UO_2}$ ,  $M_{CeO_2}$ 는  $UO_2$ ,  $CeO_2$ 의 몰분율 (mol%)을 나타내며,  $N_A$ 는 아보가드로 수( $6.023 \times 10^{23}$ )이다. 그 결과는 Table 1과 같으며, Ce 함량 증가에 따라 이론밀도는 선형적으로 감소함(Fig. 4)을 알 수 있다. 즉, 격자상수의 감소에도 불구하고, Ce와 U의 큰 질량 차이로 인해 밀도가 크게 감소함을 확인하였다.

### 3.2. 선형 열팽창 측정 및 열팽창 계수 계산

TMA를 이용하여, Ce 함량을 변수로  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$  소결체의 온도에 따른 길이 변화를 측정하였다. Fig. 5는 길이 변화를  $\Delta L/L_{298}$ 로 환산하여, % 단위로 나타낸 선형 열팽창률이다. 재료의 일반적인 열팽창 경향<sup>18-20)</sup>과 마찬가지로, 상대적으로 낮은 밀도( $UO_2 = 10.96 \text{ g/cm}^3$ ,  $CeO_2 = 7.65 \text{ g/cm}^3$ )와 녹는점( $UO_2 = 2827^\circ\text{C}$ ,  $CeO_2 = 2400^\circ\text{C}$ )을 갖는  $CeO_2$ 의 첨가로 인해, Ce 함량 증가에 따라 비례적으로 증가하였으며,  $UO_2$  결과의 경우는 MATPRO<sup>21)</sup> 값과 잘 일치함을 보였다.

Ce 함량을 7.63, 14.84, 21.68 mol%으로 각각 변화시켜 측정된  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$ 의 열팽창률(LEX, %)을 cubic polynomial approximation으로 fitting하여 다음과 같이 수식 (4)~(7)으로 표현하였다.

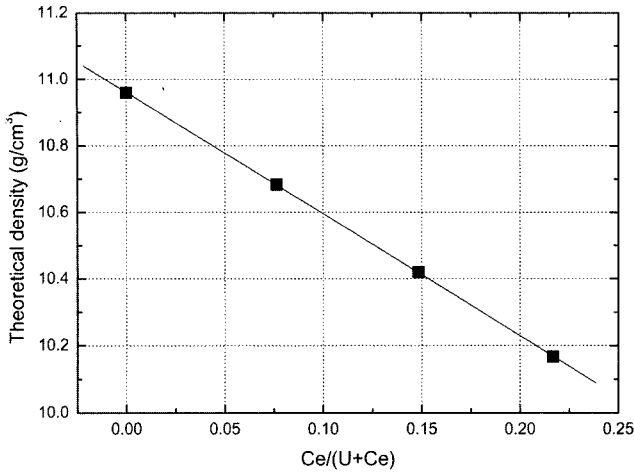


Fig. 4. The calculated theoretical densities of (U,Ce)O<sub>2</sub> as a function of the Ce contents.

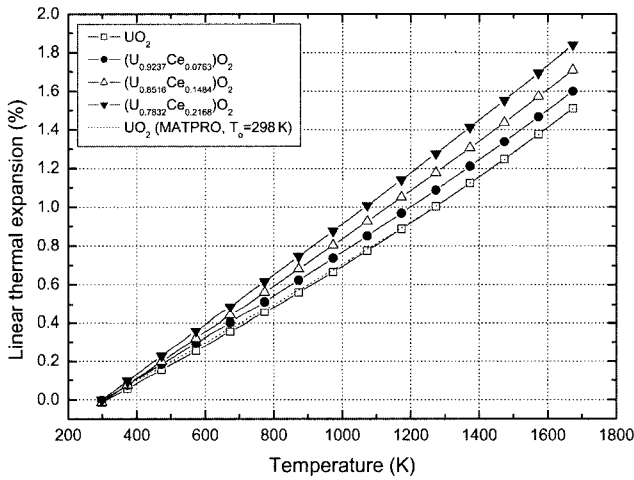


Fig. 5. Measured linear thermal expansion using TMA method for (U<sub>1-y</sub>Ce<sub>y</sub>)O<sub>2</sub> as a function of Ce contents.

$$LEX[y = 0] = (-0.3045) + (9.78139 \times 10^{-4})T + (-4.25143 \times 10^{-8})T^2 + (6.3739 \times 10^{-11})T^3 \quad (4)$$

$$LEX[y = 0.0763] = (-0.32599) + (1.09 \times 10^{-3})T + (-4.62482 \times 10^{-8})T^2 + (4.94623 \times 10^{-11})T^3 \quad (5)$$

$$LEX[y = 0.1484] = (-0.38396) + (1.27 \times 10^{-3})T + (-1.07077 \times 10^{-7})T^2 + (5.7298 \times 10^{-11})T^3 \quad (6)$$

$$LEX[y = 0.2168] = (-0.39764) + (1.36 \times 10^{-3})T + (-1.04597 \times 10^{-7})T^2 + (5.43329 \times 10^{-11})T^3 \quad (7)$$

여기서 온도(T)는 절대온도이며, 25°C(298 K)를 T<sub>0</sub>로 하였다.

추정된 열팽창을 다음 식<sup>21)</sup> (8)로 계산하여, 순간열팽창계수(Instantaneous coefficient of thermal expansion)와 평균열팽창계수(Mean coefficient of thermal expansion)를 구하였다.

$$\alpha_p(l) = \frac{1}{L_{298}} \left( \frac{dL}{dT} \right)_p \quad (8)$$

Ce 함량 및 온도에 따른 순간열팽창계수는 다음과 같이 cubic polynomial로 표현하였다.

$$\alpha_p[y = 0] = (9.78135 \times 10^{-6}) + (-8.50142 \times 10^{-10})T + (1.91202 \times 10^{-12})T^2 + (4.34913 \times 10^{-20})T^3 \quad (9)$$

$$\alpha_p[y = 0.0763] = (1.08998 \times 10^{-5}) + (-9.24315 \times 10^{-10})T + (1.48315 \times 10^{-12})T^2 + (2.38712 \times 10^{-19})T^3 \quad (10)$$

$$\alpha_p[y = 0.1484] = (1.27 \times 10^{-5}) + (-2.14159 \times 10^{-9})T + (1.71896 \times 10^{-12})T^2 + (2.44813 \times 10^{-22})T^3 \quad (11)$$

$$\alpha_p[y = 0.2168] = (1.36001 \times 10^{-5}) + (-2.09218 \times 10^{-9})T + (1.6302 \times 10^{-12})T^2 + (-5.88593 \times 10^{-20})T^3 \quad (12)$$

그리고 Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 평균열팽창계수는 상온에서부터 1000, 1400°C 범위에서 각각 계산하여 비교하였다. UO<sub>2</sub>의 경우 1000°C에서 10.290 × 10<sup>-6</sup> /K을 나타내었으며, (U<sub>1-y</sub>Ce<sub>y</sub>)O<sub>2</sub>의 경우는 Ce 함량에 따라 11.165 × 10<sup>-6</sup>, 12.076 × 10<sup>-6</sup>, 13.089 × 10<sup>-6</sup> /K 등 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.

추정된 소결체 길이 변화(ΔL/L<sub>298</sub>)를, 아래의 선형열팽창과 밀도 간의 관계식 (13)에 대입하여, Ce 함량 및 온도에 따른 밀도 식을 도출하였다.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{1 - (1 + \Delta L/L_0)^3}{(1 + \Delta L/L_0)^3} \quad (13)$$

$$\rho(T)[y = 0] = (11.05016) + (-3.22632 \times 10^{-4})T + (1.57821 \times 10^{-8})T^2 + (-1.84646 \times 10^{-11})T^3 \quad (14)$$

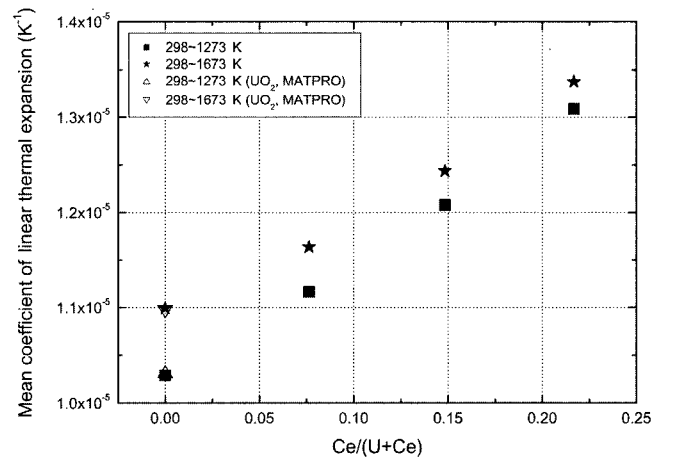


Fig. 6. Mean coefficient of linear thermal expansion of (U<sub>1-y</sub>Ce<sub>y</sub>)O<sub>2</sub> as a function of Ce contents at 1000 and 1400°C. These results were in good agreement with the reference data.

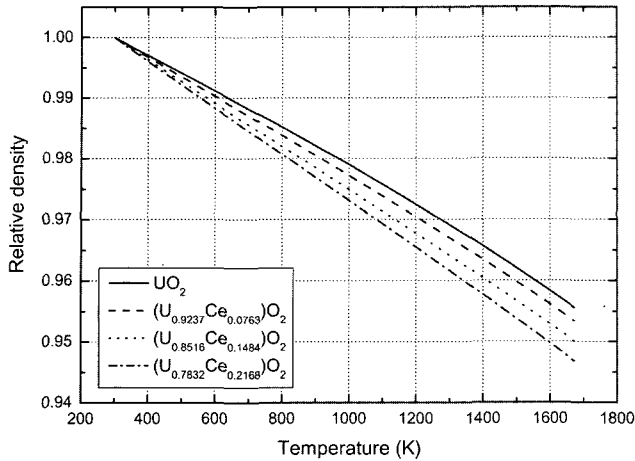


Fig. 7. Relative density variation with temperature of  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$  as a function of Ce contents.

$$\rho(T)[y = 0.0763] = (10.78779) + (-3.51866 \times 10^{-4})T + (1.89979 \times 10^{-8})T^2 + (-1.41041 \times 10^{-11})T^3 \quad (15)$$

$$\rho(T)[y = 0.1484] = (10.53949) + (-4.00595 \times 10^{-4})T + (3.95914 \times 10^{-8})T^2 + (-1.6587 \times 10^{-11})T^3 \quad (16)$$

$$\rho(T)[y = 0.2168] = (10.28983) + (-4.19046 \times 10^{-4})T + (3.93252 \times 10^{-8})T^2 + (-1.53539 \times 10^{-11})T^3 \quad (17)$$

Fig. 7은 Ce 함량에 따른 비교를 용이하게 하기 위하여, 상온에서의 밀도를 1로 하는 상대밀도로 나타내었다. 이때, 상온에서의 밀도는 XRD를 이용하여 측정된 이론밀도를 반영하였다. 그 결과, 온도 증가에 따라 생기는 밀도 감소량이, Ce 함량이 높을수록 비례적으로 커짐을 확인하였다.

#### 4. 결 론

$UO_2$  및  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$  소결체의 선형열팽창을 TMA(Thermo-Mechanical Analysis) 방법을 이용하여 상온~1400°C 온도 범위에서 Ce 함량을 변수로 하여 측정하고, 이를 이용하여 열팽창률, 열팽창 계수, 밀도 변화 등을 계산하고 그 변화를 관찰하였다. 계산된 결과는 각각 3차 다항식 형태의 Ce 함량 및 온도에 따른 관계식으로 계산하고 제시하였다.

특히, 평균열팽창계수는 1000°C에서  $UO_2$ 의 경우  $10.290 \times 10^{-6} /K$ 을 나타내었으며,  $(U_{1-y}Ce_y)O_2$ 의 경우는 Ce 함량에 따라  $11.165 \times 10^{-6}$ ,  $12.076 \times 10^{-6}$ ,  $13.089 \times 10^{-6} /K$  등 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2005년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

#### REFERENCES

1. W. Stach, "Advanced Mixed Oxide Fuel Assemblies with Higher Plutonium Content for Light Water Reactors," IAEA-SM-358, International Symposium on MOX Fuel Cycle Technologies for Medium and Long-Term Deployment, Vienna (Austria) 17-21 May (1999).
2. E. Zimmer, C. Ganguly, J. Borchardt, and H. Langen, "SGMP - an Advanced Method for Fabrication of  $UO_2$  and MOX Fuel Pellets," *J. Nucl. Mater.*, **152** [2-3] 169-77 (1988).
3. R. Guldner and H. Schmidt, "Optimization of Process Parameters for the Sintering of MOX Fuel," *J. Nucl. Mater.*, **178** [2-3] 152-57 (1991).
4. G. S. Chang and J. M. Ryskamp, "Depletion Analysis of Mixed-Oxide Fuel Pins in Light Water Reactors and the Test Reactor," *Nucl. Tech.*, **129** [3] 326-37 (2000).
5. E. J. Lahoda, "Costs for Manufacturing Thorium-Uranium Dioxide Fuels for Light Water Reactors," *Nucl. Tech.*, **147** [1] 102-12 (2004).
6. Y. W. Lee, *et al.*, "Development of Fabrication Technology for Advanced Nuclear Fuel for the Future," *Korea Atomic Energy Research Institute*, KAERI/RR-1371/93 (1993).
7. R. E. Woodley, "Oxygen Potentials of Plutonia and Urania-plutonia Solid Solutions," *J. Nucl. Mater.*, **96** [1-2] 5-14 (1981).
8. D. I. R. Norris and P. Kay, "Oxygen Potential and Lattice Parameter Measurements in  $(U, Ce)O_{2-x}$ ," *J. Nucl. Mater.*, **116** [2-3] 184-94 (1983).
9. H. P. Nawada, *et al.*, "Oxidation and Phase Behaviour Studies of the U-Ce-O System," *J. Nucl. Mater.*, **139** [1] 19-26 (1986).
10. M. Beauvy, "Nonideality of the Solid Solution in  $(U,Pu)O_2$  Nuclear Fuels," *J. Nucl. Mater.*, **188** 232-38 (1992).
11. O. T. Sørensen, "Thermodynamic Studies of the Phase Relationships of Nonstoichiometric Cerium Oxides at Higher Temperatures," *J. Solid State Chem.*, **18** [3] 217-33 (1976).
12. D. J. Kim, S. H. Na, Y. K. Kim, Y. W. Lee, and Y. S. Kim, "Effect of the  $UO_2$  Powder Characteristic Changes by Dynamic Milling on the Density(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [8] 588-92 (2004).
13. ASTM Designation, "Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis," E831-03.
14. J. Belle, "Uranium Dioxide: Properties and Nuclear Applications," Naval Reactors, Division of Reactor Development, United States Atomic Energy Commission, 1961.
15. T. Fujino, "Thermodynamics of Fluorite Type Solid Solutions Containing Plutonium, Lanthanide Elements or Alkaline Earth Metals in Uranium Dioxide Host Lattices," *J. Nucl. Mater.*, **154** 14-24 (1988).
16. K. Yamada, S. Yamanaka, T. Nakagawa, M. Uno, and M. Katsura, "Study of the Thermodynamic Properties of  $(U, Ce)O_2$ ," *J. Nucl. Mater.*, **247** 289-92 (1997).
17. K. Nagarajan, *et al.*, "Oxygen Potential Studies on Hypostoichiometric Uranium-Cerium Mixed Oxide," *J. Nucl. Mater.*, **130** 242-49 (1985).

18. C. K. Lee, B. H. Lee, and S. K. Chun, "Study on Thermal Expansion of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **17** [3] 141-44 (1980).
19. T. K. Kang and K. L. Weisskopf, "Thermal Expansion Behavior of Cordierite-SiC Whisker Ceramic Composites(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **24** [5] 411-16 (1987).
20. B. S. Kim, D. Y. Lee, H. K. Kim, and J. W. Jang, "The Decision on the Thermal Expansion Coefficient of the Glass Infiltrated in all Ceramic Crown(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [1] 93-7 (2003).
21. J. K. Fink, Thermal Expansion of Solid Uranium Dioxide, <http://www.insc.anl.gov/matprop/>, MATPRO (1999).