

## Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> 산화물의 소결성 및 소결체 특성에 관한 연구

김한수<sup>†</sup> · 정창용 · 김시형 · 이병호 · 이영우 · 손동성 · 이상현\*

한국원자력연구소

\*한국표준연구원

(2002년 10월 19일 접수; 2002년 10월 19일 승인)

### Study on the Sinterability and Pellet Properties of Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Oxides

Han Soo Kim<sup>†</sup>, Chang Yong Joung, Si Hyung Kim, Byoung Ho Lee, Young Woo Lee,  
Dong Seong Sohn and Sang Hyun Lee\*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

\*Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea

(Received October 19, 2002; Accepted October 19, 2002)

#### 초 록

산화물 제어봉 물질로서 Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> 소결체를 powder process에 의해 제조하였다. Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> 혼합분말의 소결성과 고용체의 상을 TMA와 XRD로써 각각 분석하였으며, 소결체의 비열과 열확산계수를 측정하여 열전도도를 구하였다. Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>에서 Dy의 함량에 따라 소결성과 밀도가 변화였고 3 g Dy/cm<sup>3</sup> Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>의 경우 1580°C의 소결온도에서 용융이 일어났다. 4.00 g Dy/cm<sup>3</sup> 소결체에는 Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>+Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>의 두 상이 존재하며 4.54 g Dy/cm<sup>3</sup>의 경우 Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>의 단일 상만이 존재하는 결과를 보였다. Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>의 열전도도는 25~600°C 범위에서 온도에 따라 큰 변화가 없으며 1600°C 소결체가 1.69~1.78 W/mK, 1550°C 소결체의 경우에는 1.49~1.55 W/mK이었다.

#### ABSTRACT

Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> pellets were fabricated as a reactor control material by the powder process. Sinterability of Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> mixtures and phases of solid solutions were analyzed by using TMA and XRD, respectively. The thermal conductivity of Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> pellet was determined from the measurement data of the specific heat and the thermal diffusivity of the pellet. The sinterability and the sintered density varied as a function of Dy content in Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>. The pellet of 3 g Dy/cm<sup>3</sup> Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> melted in the sintering temperature of 1580°C. There were two phases of Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>+Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and a single phase of Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> for the pellet that has the Dy content of 4.00 g Dy/cm<sup>3</sup> and 4.54 g Dy/cm<sup>3</sup>, respectively. The thermal conductivity of Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> was nearly constant in the temperature range of 25~600°C. It was 1.69~1.78 W/mK for the pellet sintered in 1600°C and 1.49~1.55 W/mK for the pellet sintered in 1550°C.

**Key words :** Control rod material, Sintering, XRD, Thermal conductivity

#### 1. 서 론

원자로의 출력을 조절, 제어하는 제어봉은 중성자의 흡수단면적이 큰 물질로 제조된다. 제어봉 물질은 핵적 특성 뿐만 아니라 적절한 강도와 열전도도, 원자로 분위기에서의 안정성 등을 갖추어야 하고 바람직하지 않은 핵반응이 없고 가격면에서 경제성이 있어야 한다. 현재 제어봉의 원료물질은 cadmium, silver, hafnium 등이 원소 또는 합금 형태로 사용되며, boron은 carbide 형태로 thermal reactor의 제어봉 물질로 사용되고 있다.

Hafnium과 silver는 상대적으로 고가의 물질이며, cadmium은 용융점이 낮고 강도가 약하기 때문에 봉의 형태로 제어봉을 제조하는데 문제가 있다. Silver-cadmium 합금은 제어봉 물질로서 요구되는 성질을 절충적으로 만족하나 두 원소가 형성하는 고용체의 상태를 고려하면 cadmium의 첨가량에 한계가 있다.<sup>1)</sup> Boron carbide는 <sup>10</sup>B 동위원소의 (n, α)-reactions에 의해 헬륨이 형성, 축적되어 팽윤을 일으키는 문제점이 있다.<sup>1,2)</sup>

최근 (n, α)-absorber가 아닌 산화물을 제어봉 물질로서 대체하기 위한 시도로서 V. D. Risovany 등<sup>3)</sup>이 여러 가지 중성자 흡수 산화물에 대한 핵적 특성과 물성을 조사하였으며, 후보물질로서 dysprosium titanate (Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · TiO<sub>2</sub>)를 추천한 바 있다.

본 연구는 dysprosium titanate 소결체를 powder process<sup>4,6)</sup>

<sup>†</sup>Corresponding author : Han Soo Kim

E-mail : hskim4@kaeri.re.kr

Tel : +82-42-868-2262 Fax : +82-42-868-8868

에 의해 제조하였다. Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub> 혼합분말의 소결성과 고용체의 상을 연구하였으며, 소결체의 비열과 열확산계수를 측정하여 열전도도를 구하였다.

2. 실험방법

고순도의 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ALDRICH, 99.9%, 희토류원소 불순물; 최대 2000 ppm)분말과 TiO<sub>2</sub>(ALDRICH, 99.9%, 평균입자 크기; 1 μm, 금속불순물; 최대 1000 ppm)을 원료분말로 사용하였다.

소결체에서 Dy의 함량이 3.0, 4.0, 4.5, 또는 5.1 g이 되도록 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub> 혼합비를 계산하여 계량하였다. 두 분말을 turbula mixer에서 1시간 동안 혼합한 후 planetary mill(zirconia crucible, φ10 mm zirconia ball)을 사용하여 350 rpm으로 30분 동안 밀링하였다.

혼합분말을 double action hydraulic press에서 300 MPa로 압분하여 직경 φ10.0 mm의 압분체를 준비하였다.

압분체를 TMA(SETERAM Thermal Mechanical Analyzer)에 장입하고 아르곤 분위기에서 소결성을 시험하였다. 압분체를 3°C/m의 가열속도로 가열하여 1350°C, 1450°C, 1600°C에서 4시간 동안 유지하였으며, 전체 heating cycle에 걸쳐서 압분체의 길이변화를 측정하였다.

TMA 소결성시험 결과를 고려하여, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> 압분체를 아르곤 분위기의 1550°C와 1600°C에서 각각 4시간 동안 소결하였다.

소결체의 밀도를 침적법으로 측정하였으며, Dy의 함량이 다른 각 소결체에 대해 XRD 분석을 하였다. XRD 분석에서 사용된 target은 Cu(Kα 1.54056 Å)이며 sampling width는 0.0200 deg, scanning speed는 4.00 deg/min이었다.

소결체를 직경 4 mm×두께 1.5 mm의 disc 모양으로 가공하고 calorimeter(NETZSCH DSC 404C)를 이용하여 25°C~780°C 범위에서 비열을 측정하였다. 또한 직경 10 mm×두께 1.5 mm의 disc 시편을 가공하여 laser flash method(KRISS)에 의해 25°C~1400°C 범위에서 열확산계수를 측정하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1. Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> 혼합분말의 소결성

64.8 g Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+35.2 g TiO<sub>2</sub> 무게비로 혼합하여 압분체를 준비하여 3°C/min으로 가열하고 1350°C, 1450°C 및 1600°C의 각 소결 온도에서 4시간 동안 유지하면서 수축율을 측정하여 그 결과를 Fig. 1에서 나타내었다. 압분체가 약 1100°C에서 수축이 시작되었으며 1300°C 부근에서 가장 빠른 수축을 보였다. 1350°C와 1450°C의 경우 각각의 소결온도에 도달하면서 수축이 감소하여 곡선의 기울기가 둔화되기 시작하였다. 후자의 경우 전

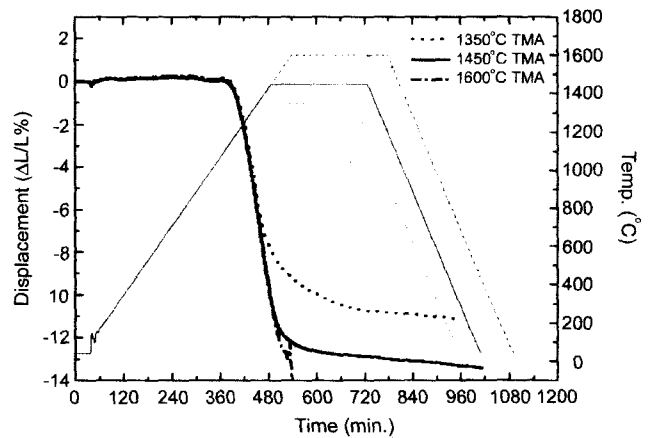


Fig. 1. Shrinkage of Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> compacts at different sintering temperatures in argon.

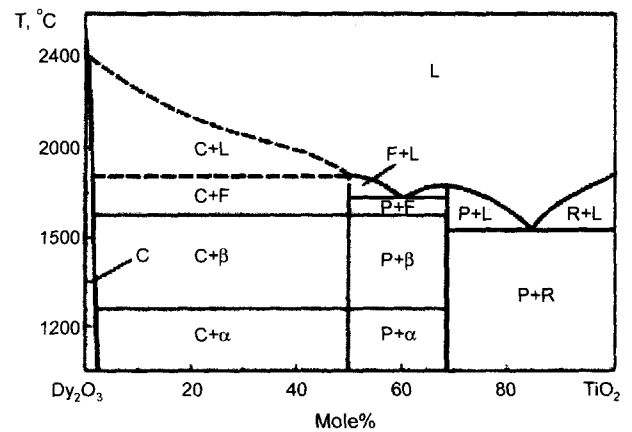


Fig. 2. The phase diagram of Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>: C-solid solution based on Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, L-liquid, α-orthorhombic Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>, β-hexagonal Dy<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>, F-cubic solid solution (fluorite structure), P-Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Pyrochlore), R-TiO<sub>2</sub> (Rutile).

자 보다 상대적으로 많이 수축하였고 소결 밀도 또한 높게 나타났다. 1450°C에서 4시간 동안 소결된 소결체의 밀도는 상분석기를 이용한 기공분을 측정결과와 비교하였을 때 이론밀도의 95%이며, 이 소결체에서 Dy의 함량은 약 3 g Dy/cm<sup>3</sup> Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>이다. 1600°C의 경우 압분체가 1100°C에서 수축이 시작되어 온도가 계속 상승함에 따라 직선적인 수축을 일으키며 1580°C에 도달하였을 때 용융이 일어났다.

Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub>의 상태도<sup>3)</sup>에서 TiO<sub>2</sub>의 농도가 68.6 mole% 이상이 되면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 약 1620°C에서 공정반응이 일어난다. TMA실험 시편은 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-72 mol% TiO<sub>2</sub>의 조성을 갖기 때문에 공정반응에 의해 용융이 일어났으며, 열전대의 보정 또는 시료온도의 측정오차로 인하여 상태도와 TMA실험에서 나타난 용융점 사이에 약 40°C의 온도차이가 있다.

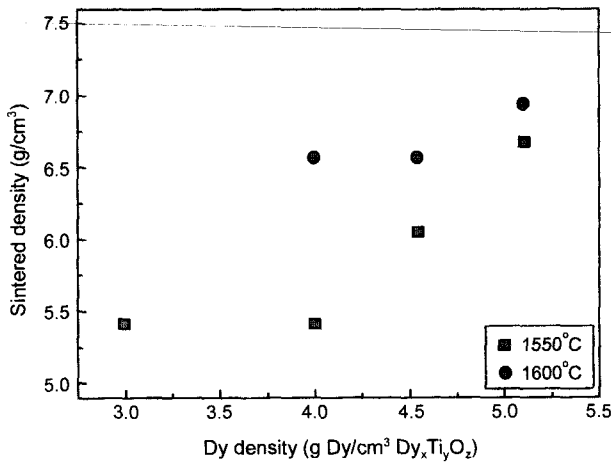


Fig. 3. Densities of  $Dy_xTi_yO_z$  pellets sintered at 1550°C and 1600°C as a function of Dy content.

### 3.2. $Dy_2O_3+TiO_2$ 압분체의 소결거동

$Dy_2O_3+TiO_2$  압분체에서 소결온도와 소결체에서의 Dy 농도에 따른 소결밀도를 Fig. 3에서 나타내었다. 소결온도 1550°C의 경우 Dy 농도가 3.0~4.0 g/cm<sup>3</sup> 사이에서는 밀도차이가 없으나 4.0 g/cm<sup>3</sup> 이상에서는 Dy 농도에 대해 직선적으로 소결밀도가 증가하였다. 소결온도 1550°C와 1600°C 사이의 소결밀도는 Dy 농도가 낮은 조성에서 1.0 g/cm<sup>3</sup> 이상의 큰 소결밀도 차이를 보이며, Dy 조성이 증가하면 소결온도에 따른 밀도의 차이가 줄어든다. Fig. 2의 상태도에서 보는 바와 같이  $Dy_2O_3+x$  mol%  $TiO_2$ 의 소결체에서 x에 따라서 여러 가지의 상이 나타나기 때문에 혼합분말의 소결성과 소결밀도가 달라지게 된다.  $Dy_2O_3$ -50 mol%  $TiO_2$ 와  $Dy_2O_3$ -68 mol%  $TiO_2$ 의 경우 각각의 소결체는  $Dy_2TiO_5$ (orthorhombic)와  $Dy_2Ti_2O_7$ (hexagonal)의 단일상을 갖는다. 한편  $TiO_2$ 의 혼합비가 68 mole% 이상이 되면 약 1620°C에서 공정반응이 일어나기 때문에 고용체의 용융점이 낮아져서 68 mole% 미만인 경우 보다 소결온도를 낮추어도 소결이 가능하다.

$Dy_2O_3+TiO_2$  압분체는 소결분위기에 따라서 소결밀도에 차이가 있었다. Fig. 4와 같이 소결밀도가 환원성 분위기에서 소결하면 가장 낮았고 air flow와 아르곤 분위기에서는 큰 차이가 없었다. 소결로 입구를 단열한 상태의 open air 분위기에서는 소결밀도가 다른 분위기 보다 가장 높게 나타났다. 소결체의 표면색깔 또한 소결분위기와 사용하는 crucible 및 소결체 조성에 따라서 차이가 있었다.

### 3.3. XRD 분석

Dy 밀도가 다른 소결체의 X-ray 회절 실험결과를 Fig. 5에서 나타내었다. Dy 밀도가 4.00 g Dy/cm<sup>3</sup>인 소결체에는  $Dy_2TiO_5$ 와  $Dy_2Ti_2O_7$ 의 혼합된 상이 존재하며 4.54 g Dy/cm<sup>3</sup> 소결체의 경우  $Dy_2TiO_5$ 의 단일상만이 존재하는 결과

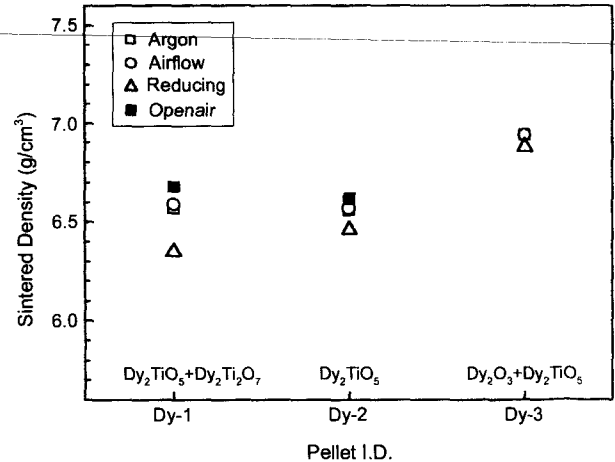


Fig. 4. Density change of  $Dy_xTi_yO_z$  pellets sintered in different atmospheres.

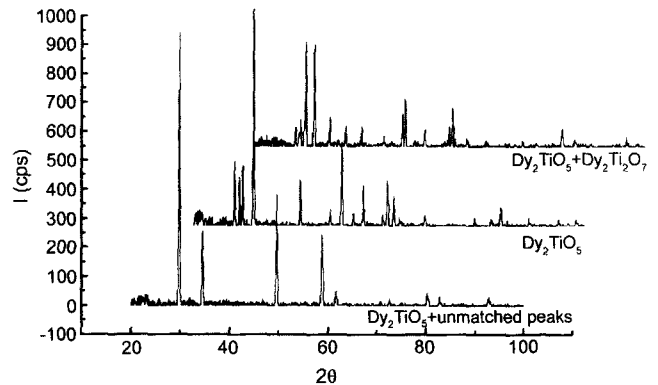


Fig. 5. XRD peaks of  $Dy_xTi_yO_z$  with different Dy contents.

를 보였다. 5.10 g Dy/cm<sup>3</sup>인 소결체에서는 몇 개의  $Dy_2TiO_5$  peaks가 나타났고 나머지 peaks는 존재 가능한 상들과 전혀 일치하지 않는 결과를 보였다. 5.10 g Dy/cm<sup>3</sup>의 소결체는 분말의 혼합조성이 60 mole%  $Dy_2O_3+40$  mole%  $TiO_2$ 로서, Fig. 2의  $Dy_2O_3-TiO_2$  상태도에 따르면  $Dy_2TiO_5+Dy_2O_3$ 의 혼합 상이 존재해야 하나 XRD peaks의 분석결과는  $Dy_2TiO_5$  상과 불분명한 어떤 상이 존재하는 것으로 나타났다.

### 3.4. 열전도도

Dy의 밀도가 4 g/cm<sup>3</sup>인  $Dy_xTi_yO_z$  소결체의 열전도도를 분석하기 위해 먼저 비열( $C_p$ )과 열확산계수( $\alpha$ )를 측정하였다. 1550°C와 1600°C에서 각각 소결된 소결체의 비열은 Fig. 6과 같다. 소결밀도가 높은 1600°C 소결체의 비열이 1550°C 소결체의 값 보다 높고, 측정온도(T°C)에 따라 그 값이 증가하여 300°C 이상에서 곡선의 기울기가 완만해지는 경향을 보였다. 두 곡선에 대한 최적 curve fitting 결과는 Fig. 6의 상단에 표시된 바와 같이 1550°C 소결체

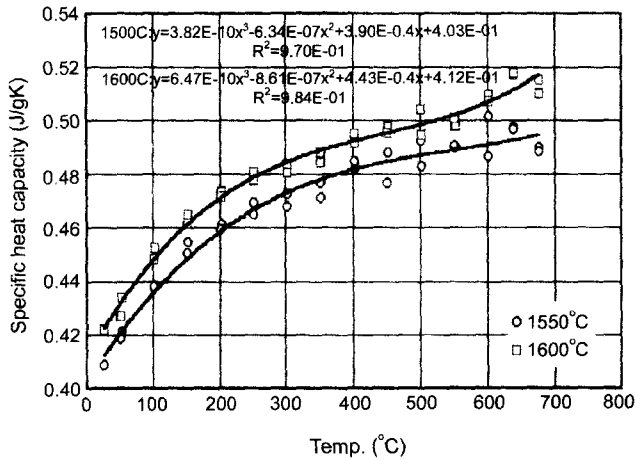


Fig. 6. Specific heat capacities of Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> pellets sintered at 1550°C and 1600°C.

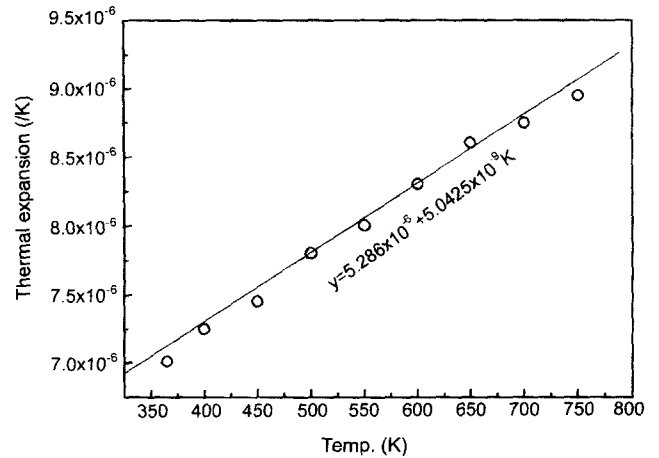


Fig. 8. Relation between thermal expansion and temperature for Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> pellet.

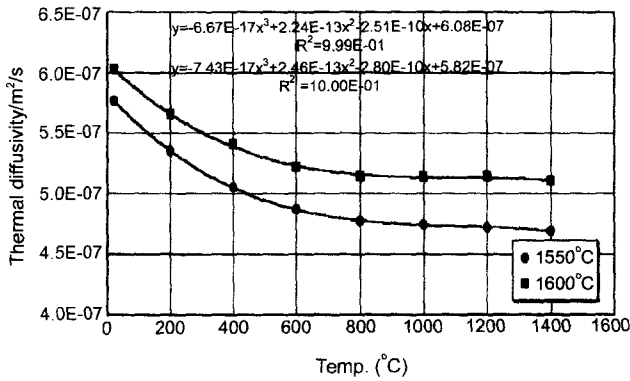


Fig. 7. Thermal diffusivities of Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> pellets sintered at 1550°C and 1600°C.

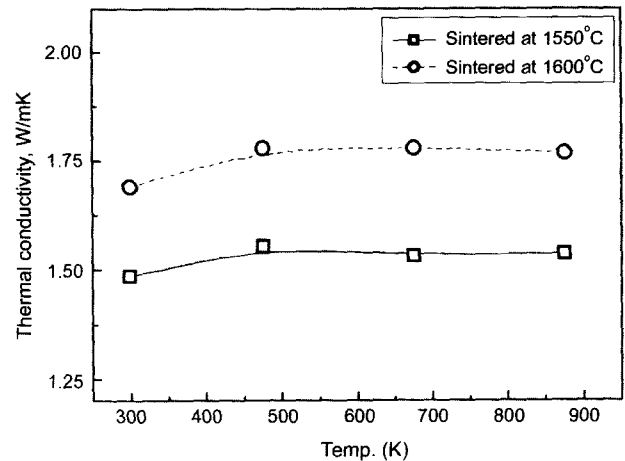


Fig. 9. Thermal conductivity of Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> pellets as a function of temperature.

의 경우  $C_p = 3.82 \times 10^{-10} T^3 - 6.34 \times 10^{-7} T^2 + 3.90 \times 10^{-4} T + 4.03 \times 10^{-1}$  ( $R^2 = 9.70 \times 10^{-1}$ ), 1600°C 소결체의 경우  $C_p = 6.47 \times 10^{-10} T^3 - 8.61 \times 10^{-7} T^2 + 4.43 \times 10^{-4} T + 4.12 \times 10^{-1}$  ( $R^2 = 9.84 \times 10^{-1}$ )이다.

두 소결체의 열확산계수는 Fig. 7과 같이 온도가 상승함에 따라서 그 값이 감소하고 약 600°C 이상에서 그 감소가 둔화되는 경향을 보였다. 비열 값과 마찬가지로 고밀화된 소결체의 열확산계수가 밀도가 낮은 소결체의 경우 보다 더 높은 값을 보였다. 두 곡선의 Curve fitting 결과는 1550°C 소결체의 경우  $\alpha = -6.67 \times 10^{-17} T^3 + 2.24 \times 10^{-13} T^2 - 2.51 \times 10^{-10} T + 6.08 \times 10^{-7}$  ( $R^2 = 9.99 \times 10^{-1}$ )이며, 1600°C 소결체의 경우에는  $\alpha = -7.43 \times 10^{-17} T^3 + 2.46 \times 10^{-13} T^2 - 2.80 \times 10^{-10} T + 5.82 \times 10^{-7}$  ( $R^2 = 10.00 \times 10^{-1}$ )이다.

Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> 소결체의 선팽창율(y)은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 온도(K)에 따라서 직선적으로 증가하며  $y = 5.286 \times 10^{-6} + 5.0425 \times 10^{-9} K$ 의 관계식을 갖는다. 실온에서부터 750°C의 온도범위에서 선팽창율은  $7.0 \times 10^{-6} \sim 8.95 \times 10^{-6}$  범위 내에서 변화하며, 이 범위에서 선팽창에 의한 소결체의 밀

도 변화는  $\pm 0.005 \text{ g/cm}^3$ 로서 열전도도에 큰 영향이 미치지 않는 것으로 나타났다.

소결체의 열전도도는 열확산계수( $\alpha$ )와 비열( $C_p$ ) 및 소결체 밀도( $\rho$ ) 사이의 관계식,  $K_{th} = \alpha \cdot C_p \cdot \rho$ 에 의해 결정된다. Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub> 소결체의 열전도도는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 25~600°C 범위에서 온도에 따라 큰 변화가 없으며 1600°C 소결체가 1.69~1.78 W/mK, 1550°C 소결체의 경우에는 1.49~1.55 W/mK의 열전도도를 갖는 것으로 나타났다. Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>의 열전도도와 핵연료 소결체의 열전도도를 200~700°C 온도범위에서 비교하면 Dy<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub>O<sub>z</sub>의 값이 UO<sub>2</sub><sup>7,9)</sup> 보다는 약간 낮으나 MOX 핵연료<sup>8)</sup> 보다는 높았다. 특히 UO<sub>2</sub> 또는 그 고용체는 낮은 온도에서 열전도도가 높은 편이지만 온도가 증가함에 따라 거의 지수함수적으로 열전도도가 감소한다. 또한 (U, Y)O<sub>2</sub>,<sup>9)</sup> (U, Nd)O<sub>2</sub>,<sup>9)</sup> (U, Sm)O<sub>2</sub>,<sup>9)</sup> (U, Gd)O<sub>2</sub>,<sup>10)</sup> 등과 같이 첨가체를 포함

하는 핵연료나  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ <sup>11)</sup> 등의 열전도도 보다  $\text{Dy}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$ 의 열전도도가 더 높은 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

$\text{Dy}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  압분체는 약  $1100^\circ\text{C}$ 에서 수축이 시작되었으며  $\text{Dy}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$ 에서 Dy의 농도에 따라 소결성과 밀도가 변하였고  $3\text{ g Dy/cm}^3$   $\text{Dy}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$ 의 경우  $1580^\circ\text{C}$ 에서 용융이 일어났다.

$4.00\text{ g Dy/cm}^3$  소결체에는  $\text{Dy}_2\text{TiO}_5+\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 의 두 상이 존재하며  $4.54\text{ g Dy/cm}^3$  소결체의 경우  $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$ 의 단일 상만이 존재한다.  $5.10\text{ g Dy/cm}^3$  소결체에는  $\text{Dy}_2\text{TiO}_5$  peaks와 더불어 불분명한 peaks가 나타났다.

$\text{Dy}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$  압분체는 소결분위기에 따라 밀도에 차이가 있으며 환원성, 아르곤, 공기 분위기의 순으로 소결밀도가 높게 나타났다.

$\text{Dy}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$ 는 온도가 상승함에 따라 비열이 증가하였고, 열확산계수는 감소하는 경향을 보였다.  $\text{Dy}_x\text{Ti}_y\text{O}_z$ 의 열전도도는  $25\sim 600^\circ\text{C}$  범위에서 온도에 따라 큰 변화가 없으며  $1600^\circ\text{C}$  소결체가  $1.69\sim 1.78\text{ W/mK}$ ,  $1550^\circ\text{C}$  소결체의 경우에는  $1.49\sim 1.55\text{ W/mK}$ 이었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

1. B. Kopelman, "Materials for Nuclear Reactors," McGraw-Hill Book Co. Inc, New York, London, Toronto, 1959.

2. O. Gebhardt and D. Gavillet, "SIMS Imaging Analyses of In-reactor Irradiated Boron Carbide Control Rod Samples," *J. Nucl. Mater.*, **279** 368-71 (2000).
3. V. D. Risovany, E. E. Varlashova and D. N. Suslov, "Dysprosium Titanate as an Absorber Material for Control Rods," *J. Nucl. Mater.*, **281** 84-9 (2000).
4. Y. I. Cho, S. G. Chung, S. Y. Cho, S. J. Kim, N. Shinohara and M. Okumiya, "Influence of Granules Characteristics and Compaction Pressure on the Microstructure and Mechanical Properties of Sintered Alumina," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [3] 212-17 (2001).
5. J. C. Baung, Y. G. Choi, E. S. Kang, Y. K. Baek, S. W. Jung and S. J. L. Kang, "Effects of the Sintering Atmosphere and Ni Content on the Liquid Phase Sintering of  $\text{TiB}_2\text{-Ni}$ ," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [3] 207-11 (2001).
6. K. W. Chae, "Densification Behavior of Fine SiC Particle-dispersed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composite by Sinter Plus HIP," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [2] 179-82 (2001).
7. L. A. Goldsmith and J. A. M. Douglas, "Measurements of the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide at 670-1270 K," *J. Nucl. Mater.*, **47** 31-42 (1973).
8. H. Elbel and D. Vollath, "Experimental Correlations Between Pore Structure and Thermal Conductivity," *J. Nucl. Mater.*, **153** 50-8 (1988).
9. S. Fukushima, T. Ohmichi, A. Madea and M. Handa, "Thermal Conductivity of Near-stoichiometric (U, Nd) $\text{O}_2$ , (U, Sm) $\text{O}_2$  and (U, Eu) $\text{O}_2$  Solid Solutions," *J. Nucl. Mater.*, **114** 312-25 (1983).
10. S. Fukushima, T. Ohmichi, A. Maeda and H. Watanabe, "The Effect of Gadolinium Content on the Thermal Conductivity of Near-stoichiometric (U, Gd) $\text{O}_2$  Solid Solutions," *J. Nucl. Mater.*, **105** 201-10 (1982).
11. B. H. Son, G. T. Kim, S. H. Hyun and D. J. Seong, "Mechanical Strength and Thermal Conductivity of Silica Aerogels Opacified by Adding Oxides," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **36** [8] 829-34 (1999).