

## 가연성 독물질 첨가에 따른 $UO_2$ 및 $UO_2-5wt\%CeO_2$ 소결체의 기계적 특성 변화

### Effect of burnable poison addition on The Thermo-mechanical Properties of $UO_2-5wt\%CeO_2$ Pellets

이상철, 이홍림, 정창용\*, 김시형\*, 이영우\*  
연세대학교 세라믹공학과, 한국 원자력 연구소\*

#### 요 약

$UO_2$  및  $UO_2-5wt\%CeO_2$ 에 가연성 독물질인  $Gd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  및  $Dy_2O_3$ 를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가하여 1700°C/4hr 환원 소결한 소결체의 미세구조 및 열적/기계적 특성 변화를 비교 관찰하였다.  $Gd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  및  $Dy_2O_3$ 의 첨가에 따라  $UO_2$  및  $UO_2-5wt\%CeO_2$  소결체의 소결 밀도 및 결정립 크기는 감소되었고, 소결체의 경도값은 큰 변화를 보이지 않았으며, 파괴인성값은  $UO_2$ 에  $Gd_2O_3$ 와  $Dy_2O_3$ 를 첨가했을 때는 다소 증가하였고,  $Sm_2O_3$  10wt% 첨가시에는 감소했으며,  $UO_2-5wt\%CeO_2$  소결체는  $Gd_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$  및  $Sm_2O_3$  첨가에 따른 파괴인성값의 변화는 없었다.  $UO_2$ 에  $Gd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  및  $Dy_2O_3$ 를 첨가한 소결체는 파괴강도 값의 변화가 없었으나, 낮은 온도영역(80 ~200°C)에서 임계 열충격 온도차의 증가를 나타내었으며,  $UO_2-5wt\%CeO_2$ 의 경우에는 파괴강도 및 임계 열충격 온도차( $\Delta T_c$ )값의 변화가 없었다.

#### Abstract

The microstructural characteristic and the thermo-mechanical properties of the pellets were evaluated and compared for  $UO_2$  and  $UO_2-5wt\%CeO_2$  pellets doped with burnable poisons (5wt% and 10wt% of  $Gd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  and  $Dy_2O_3$ ), sintered in reducing atmosphere for 4h. The sintered density and the grain size of  $UO_2$  and  $UO_2-5wt\%CeO_2$  pellets decreased by adding  $Gd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  and  $Dy_2O_3$  and the Vickers hardness (Hv) of these pellets were found not affected with density and grain size variations. The fracture toughness ( $K_{IC}$ ) of the  $UO_2$  pellets increased with  $Gd_2O_3$  and  $Dy_2O_3$  adding and decreased with 10wt%  $Sm_2O_3$  but that of  $UO_2-5wt\%CeO_2$  pellets were not changed. The fracture strength ( $\sigma_f$ ) of  $UO_2$  and  $UO_2-5wt\%CeO_2$  pellets were not affected by addition of burnable poison material and the critical thermal shock temperature difference( $\Delta T_c$ ) of the pellets increased for  $UO_2$  pellets doped with  $Gd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  and  $Dy_2O_3$  in the low temperature range (80~200°C).

## 1. 서론

UO<sub>2</sub> 소결체 및 UO<sub>2</sub>에 PuO<sub>2</sub>를 첨가한 혼합 핵연료 소결체는 밀도, 기공율, 결정립 크기 등의 미세구조 변화에 따라 여러가지 다양한 특성을 나타내며, 이러한 특성은 핵연료의 성능에 큰 영향을 미친다. 핵연료 소결체의 미세구조는 핵연료가 원자로에서 조사될 때의 열적/기계적 특성 변화로 인한 핵분열생성물의 거동과 관련을 갖기 때문에[1~2], 핵연료 소결체의 미세구조 변화와 이에 따른 열적/기계적 특성 변화에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 특히 UO<sub>2</sub>에 PuO<sub>2</sub>를 첨가한 혼합핵연료 소결체는 UO<sub>2</sub> 핵연료 소결체에 비해, 낮은 소결 밀도, 결정립 성장의 둔화 및 소결체내 Pu의 불균질한 분포등의 문제[3]가 발생하므로, 소결 공정 변화 및 소결 조제를 이용한 소결체의 제조에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이 경우 소결체의 미세구조 변화에 따른 소결체의 열충격 거동과 이에 따른 열적, 기계적 특성에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다. 또한 UO<sub>2</sub>에 가연성 독물질을 함유한 UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, UO<sub>2</sub>-Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 UO<sub>2</sub>-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등에서도 PUO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>를 혼합한 경우와 유사한 미세구조 특성을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>에 PuO<sub>2</sub>와 고온 물리 화학적인 성질이 유사한 CeO<sub>2</sub>를 첨가하고, 여기에 가연성 독물질인 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 혼합하여 소결된 소결체에 대해 미세구조 변화를 관찰하고, 이에 따른 경도, 파괴인성, 파괴강도 및 임계 열충격 온도차를 측정함으로써 이들의 혼합 및 미세구조 변화가 소결체의 열적/기계적 특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

## 2. 실험방법

### (1) 시편제조

IDR공정으로 제조된 UO<sub>2</sub> 분말 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 분말에 가연성 독물질 (burnable poison)인 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가하여 3ton/cm<sup>2</sup>로 성형한 후, 1700°C에서 4시간동안 93%N<sub>2</sub>+7%H<sub>2</sub> 분위기에서 환원 소결하여 소결체를 제조하였다. 소결체의 밀도는 수침법(water immersion)으로 측정하였고, Image analyzer를 이용하여 미세 조직과 기공을 관찰하였다.

### (2) 열적/기계적 물성 측정

가연성 독물질 첨가에 따른 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체의 기계적 물성측정은 경도, 파괴인성 및 파괴강도값을 이용하여 측정하였으며, 열적/기계적 물성은 열충격 저항 parameter인 임계 열충격 온도차( $\Delta T_c$ )이용하여 측정하였다. 균일한 경도(Vickers

hardness, Hv)와 파괴인성(Fracture toughness,  $K_{IC}$ )을 측정하기 위해 각 소결체를 두께 2mm의 disk 형태로 절단하여 mounting한 후, Micro hardness tester(Mitutoyo社, MVK-G1)를 이용하여 일정한 하중에 의해 생긴 압흔의 길이를 측정하여 경도를 산출하였으며, pellet의 원주 표면과 중심부의 경도값 차이를 보정하기 위하여 중심부에서 1mm 간격을 두고 십자 형태로 10회 측정하였다. 파괴인성값은 Indentation Crack Length법을 적용하였으며, 압흔의 길이 (2a)와 균열길이(2c)를 5회 측정하여 다음 식[4]으로 계산하였다.

$$K_{IC} \text{ (MPam}^{1/2}\text{)} = 0.16 \times Hv \times a^{1/2} \times (c/a)^{-2/3}$$

(Hv : 비커스 경도값, a : 압흔길이의 반, c : 균열길이의 반)

UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체의 파괴 강도( $\sigma_f$ )는 소결체를 두께 1mm의 disk형태로 절단한 후, 절단면을 #600의 sandpaper로 연삭하여 절단면의 균열 및 흠을 제거한 후, biaxial flexure technique을 적용하여 자체 제작한 Cup&Corn형 jig를 이용하여 crosshead speed 100 $\mu$ m/min으로 다음 식[5]을 이용하여 산출하였다.

$$\sigma_f = 3P/2\pi h^2 \times \{(1-\nu)b^2 - a^2/2b^2 \times b^2/d^2 + (1+\nu)\ln b/a\}$$

$\sigma_f$ : Fracture strength, P : Load at fracture (N),  $\nu$  : Poisson's ratio

d : specimen radius (mm), h : specimen height (mm)

a : Upper ring tool radius (mm), b : Lower supporting fixture radius (mm) 및

임계열충격 온도차( $\Delta T_c$ ) 측정은 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체를 파괴강도 측정용 시편과 동일하게 가공한 후 80 ~ 160 $^{\circ}$ C까지 가열하여 각 설정 온도에서 30분간 유지한 후 water bath에 떨어뜨려 급냉 시킨 시편에 대한 파괴강도를 측정하여, 파괴강도값의 급격한 저하를 보이는 열충격 온도차를 관찰[6]하여 열충격 저항 parameter 인 임계 열충격 온도차( $\Delta T_c$ )를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

(1) 가연성 독물질 첨가에 따른 소결체의 소결 밀도 및 결정립 크기 변화

**Fig. 1**은 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가하여 소결한 소결체의 밀도 및 결정립 크기 변화를 나타낸 것이다. UO<sub>2</sub> 소결체의 소결밀도는 10.71g/cm<sup>3</sup> 이었으며, UO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가됨에 따라 5wt%까지는 소결밀도의 변화가 없었으나, 10wt% 첨가시 소결 밀도가 감소하여 10.61g/cm<sup>3</sup>을 나타냈고,

Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가됐을 때는 소결밀도가 감소되어서 10wt%가 첨가됐을 때 10.58g/cm<sup>3</sup>을 나타내었으며, UO<sub>2</sub>에 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이 첨가되었을 때에도 소결밀도의 감소를 나타냈다. UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체의 소결밀도 10.26g/cm<sup>3</sup> 이었는데, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 첨가됨에 따라 5wt% 까지는 소결밀도의 감소가 있었으나, 10wt% 첨가시에는 밀도의 증가가 관찰되었으며, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이 10wt% 첨가되면 소결밀도는 10.16g/cm<sup>3</sup>로 감소되었고, UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이 5wt%, 10wt% 첨가되었을 때 소결밀도는 각각 10.14g/cm<sup>3</sup>과 9.95g/cm<sup>3</sup>을 나타내었다.

**Fig. 2**는 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가하여 소결한 소결체의 결정립 크기를 나타낸 것이다. UO<sub>2</sub> 소결체의 평균 결정립 크기는 5.8 $\mu$ m 이었는데, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가에 따른 결정립 크기의 변화는 관찰되지 않았으며, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10wt% 첨가시 결정립이 2.6 $\mu$ m 로 감소하였고, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 첨가시에도 결정립의 감소가 나타났다. UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>의 경우 결정립 크기가 3.1 $\mu$ m 이었는데, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가했을 때는 결정립의 변화가 거의 일어나지 않았으나, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 10wt% 첨가되었을 때 결정립이 1.8 $\mu$ m로 다소 감소하였다.

## (2) 가연성 독물질 첨가에 따른 소결체의 경도 및 파괴인성값의 변화

**Fig. 3**은 Burnable poison첨가에 따른 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체의 경도값을 나타낸 것이다. UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 각각 5wt%, 10wt%를 첨가된 소결체는 밀도의 감소와 결정립 크기의 감소에도 불구하고 경도값의 변화 없이 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체와 비슷한 값을 나타내었다. **Fig. 4**는 소결체의 파괴인성값 변화를 나타낸 것으로 UO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 소결체는 파괴인성값의 증가를 보였으나, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10wt% 첨가시에는 파괴인성값의 감소를 나타냈다. UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 소결체의 경우는 첨가하지 않은 소결체와 비슷한 값을 나타냈고, 첨가량의 증가에 따른 파괴인성값의 변화도 나타나지 않았다. 따라서 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Burnable poison인 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가했을 경우 소결밀도의 감소와 결정립 크기의 감소로 인해 경도와 파괴인성값의 감소를 예상할 수 있었으나, 결과적으로 경도와 파괴인성값의 별다른 변화가 일어나지 않았다. 이것은 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가할 때 밀도 및 결정립 크기의 감소가 있었으나, UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>

결정립 크기 자체가 작은 범위 (5.8~3.1 $\mu\text{m}$ )에 포함되어 있어서, Burnable poison 첨가에 따른 결정립 크기의 감소가 소결체의 경도 및 파괴인성값에는 별다른 영향을 미치는 않은 것으로 생각 할 수 있었다.

(3) 가연성 독물질 첨가에 따른 소결체의 파괴강도( $\sigma_f$ ) 및 임계 열충격온도차( $\Delta T_c$ ) 특성

**Fig. 5**는  $\text{UO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가한 소결체의 파괴강도(Fracture strength,  $\sigma_f$ ) 및 임계열충격 온도차 값(Critical thermal shock temperature difference,  $\Delta T_c$ )을 나타낸 것이다.  $\text{UO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 각각 5wt% 첨가한 소결체와  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  10wt%를 첨가한 소결체는  $\text{UO}_2$ 와 비슷한 파괴강도값을 나타냈고,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ 를 10wt% 첨가한 소결체는  $\text{UO}_2$  소결체에 비해 낮은 파괴강도값을 나타냈다. 열충격 저항성 parameter인 임계열충격 온도차는  $\text{UO}_2$  소결체의 값이  $\Delta T_c=100$  이었는데,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 각각 5wt% 첨가한 소결체와 10wt%  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 를 첨가한 소결체는  $\Delta T_c=140$ 의 값을 나타냈고,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 각각 10wt% 첨가한 소결체는  $\Delta T_c=120$ 의 값을 나타내어,  $\text{UO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 첨가했을 경우 소결체의 임계열충격 온도차값이 증가하는 경향을 보였다. 따라서  $\text{UO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 5wt% 첨가한 소결체는 기계적 물성 값인 파괴강도값의 변화는 일어나지 않았으며,  $\text{UO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 첨가한 소결체는 낮은 온도영역(80~200 $^\circ\text{C}$ )에서 임계 열충격 온도차 값의 상승이 일어남을 알 수 있는데, 이것은  $\text{UO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  첨가할 경우 결정립 미세화가 낮은 온도영역에서 소결체의 열충격 저항성 향상에 관여했을 것으로 추측될 수 있다.

**Fig. 6**은  $\text{UO}_2$ -5wt% $\text{CeO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가한 소결체의 파괴강도(Fracture strength,  $\sigma_f$ ) 및 임계열충격 온도차 값(Critical thermal shock temperature difference,  $\Delta T_c$ )을 나타낸 것이다.  $\text{UO}_2$ -5wt% $\text{CeO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 첨가한 소결체는  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 의 첨가 및 첨가량의 증가에 따른 파괴강도값의 차이는 없었으나, 10wt%  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  첨가시 강도값이 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 임계열충격 온도차는  $\text{UO}_2$ -5wt% $\text{CeO}_2$  소결체의 값이  $\Delta T_c=140$  이었는데,  $\text{UO}_2$ -5wt% $\text{CeO}_2$ 에  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ 를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가한 소결체 모두  $\Delta T_c=140$ 을 나타냈으나, 10wt%  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ 를 첨가했을 경우에만  $T_c=120$ 을 나타내어,  $\text{UO}_2$ -5wt% $\text{CeO}_2$ 의 경우,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  및  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  첨가 및 첨가량에 의한 임계열충

격 온도차의 변화가 관찰되지 않았다.

#### 4. 결론

UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 가연성 독물질(Burnable poison)인 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 각각 5wt%, 10wt%를 첨가하여 소결한 소결체의 미세구조 및 열적/기계적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 소결체는 첨가하지 않은 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체에 비해 소결 밀도 및 결정립 크기는 감소되었다.

(2) UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 소결체는 소결밀도 변화와 결정립 크기의 감소에도 불구하고, 첨가하지 않은 UO<sub>2</sub> 및 UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> 소결체와 비슷한 경도(Hv)와 파괴인성(K<sub>IC</sub>) 값을 나타냈다.

(3) UO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 소결체는 첨가하지 않은 UO<sub>2</sub> 소결체와 비슷한 파괴강도 값을 나타내었고, 낮은 온도영역(80 ~200℃)에서 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가에 의한 임계열충격 온도차의 증가를 나타내었으며, UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub>에 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가한 소결체는 첨가하지 않은 소결체보와 비슷한 파괴강도 및 임계 열충격 온도차(ΔT<sub>c</sub>)값을 나타냈다.

#### ♣ Acknowledgment

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

#### Reference

- [1] M. Oguma, Nucl. Eng. Des. 76 (1983) 35.
- [2] M. Oguma, J. Nucl. Sci. Technol. 19 (1982) 1005.
- [3] S.H.Kim et al., Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting vol. II(1998), pp186-191.
- [4] B.R.Lawn and E.R.Fuller, J. Mater. Sci., 10, (1975) 2016-2024.
- [5] Giovan, M.N., sines, G.: ibid., 62, 510 (1979)
- [6] J.H.Schneibel et al., T. Am. Ceram. Soc., 81(7), 1888-1892 (1998)

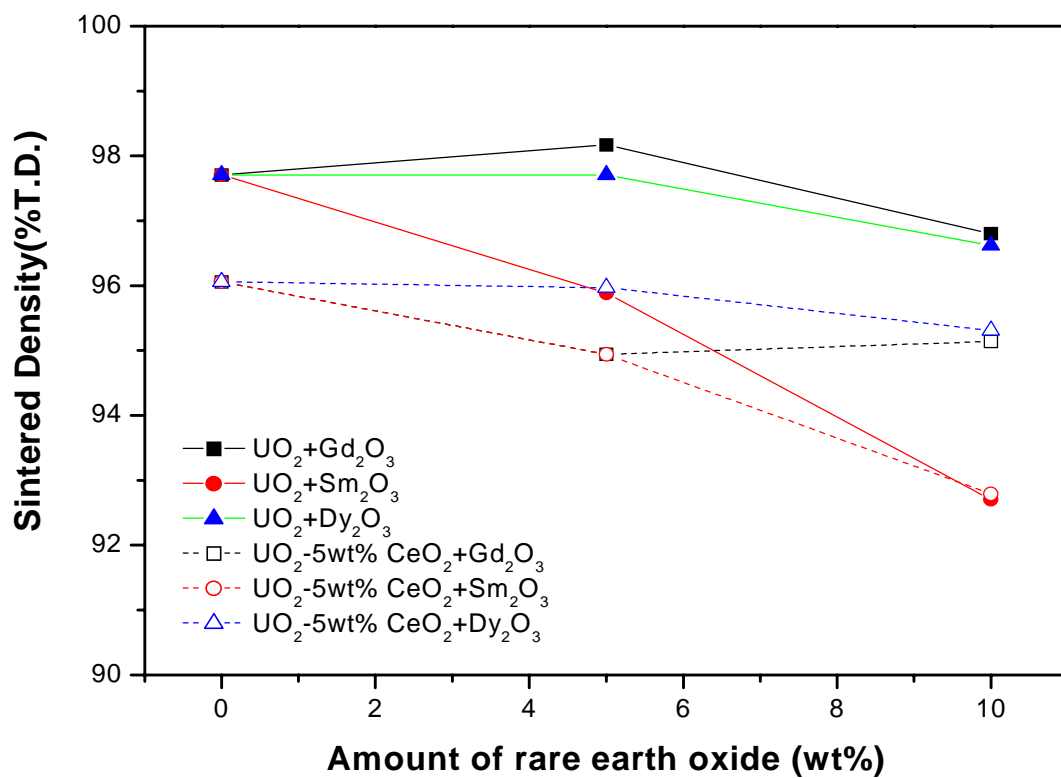


Fig. 1 Variation of sintered density of UO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub> -5wt% CeO<sub>2</sub> sintered at 1700°C in H<sub>2</sub> as a function of burnable poison (Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amount (wt%)

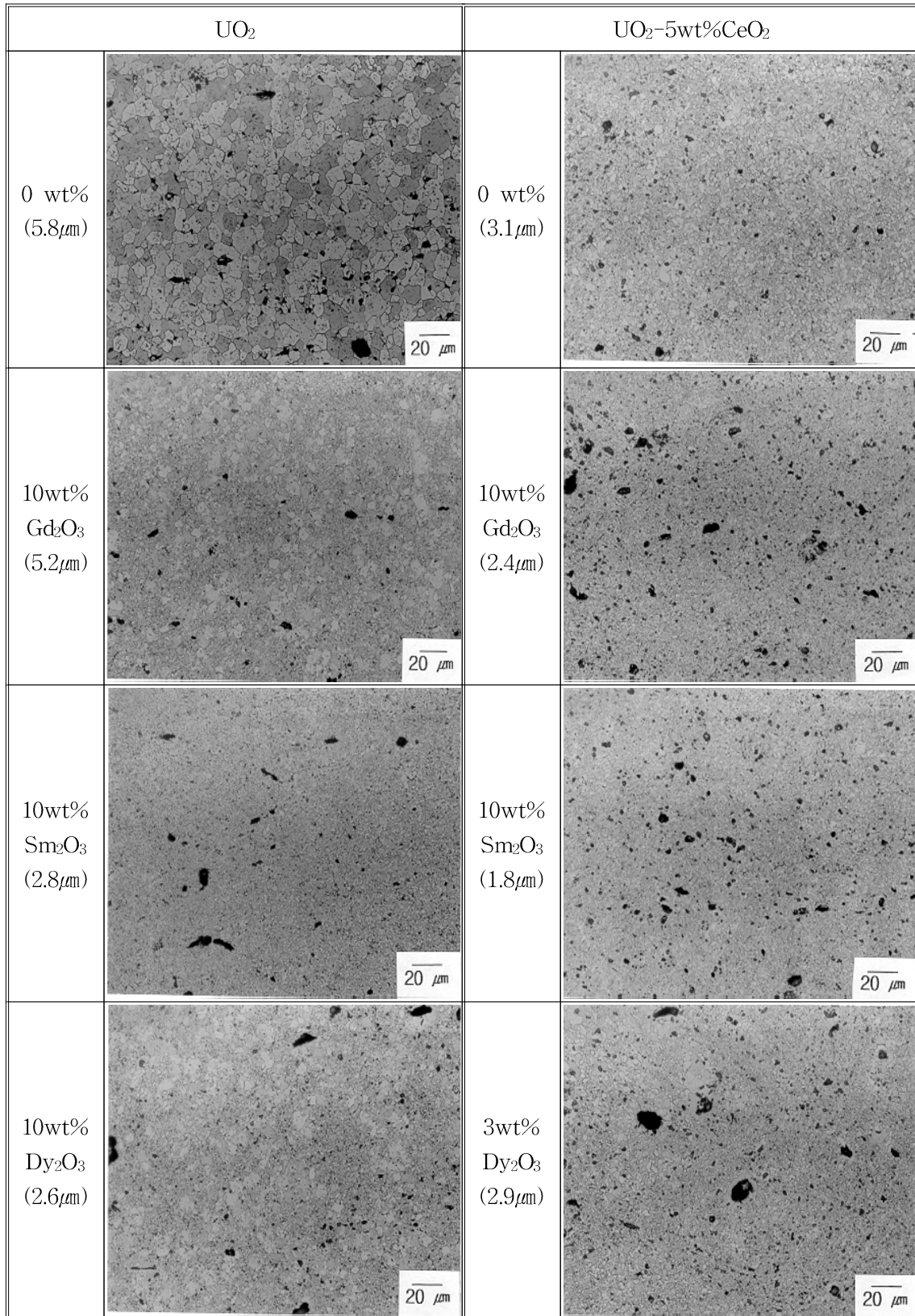


Fig. 2 Optical micrograph of UO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> sintered at 1700°C in H<sub>2</sub> as a function of poison(Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amount



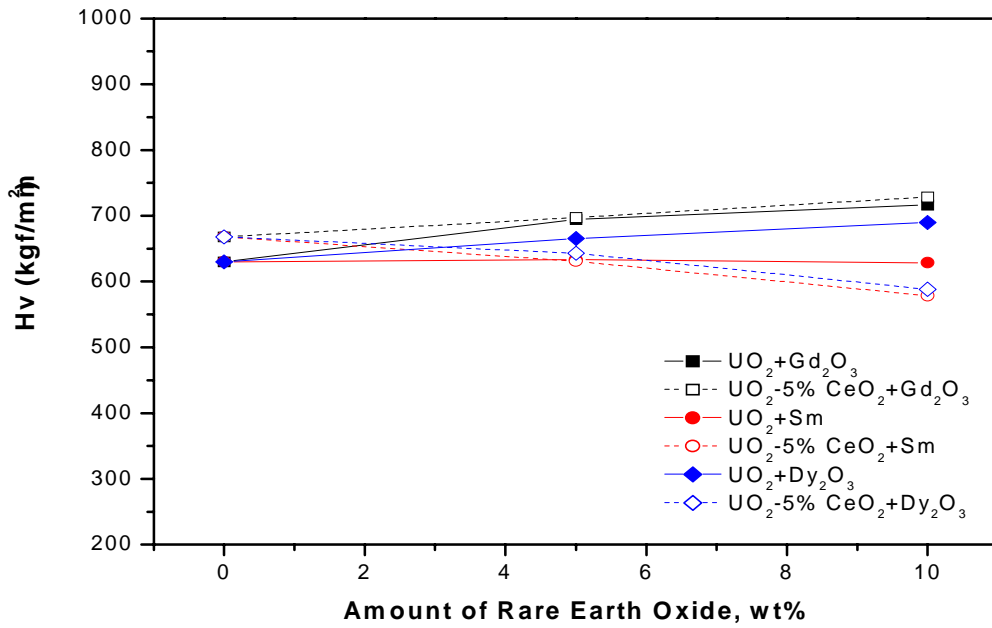


Fig. 3. Change of Vickers hardness for UO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> pellets with the addition of burnable poison amount(wt%).

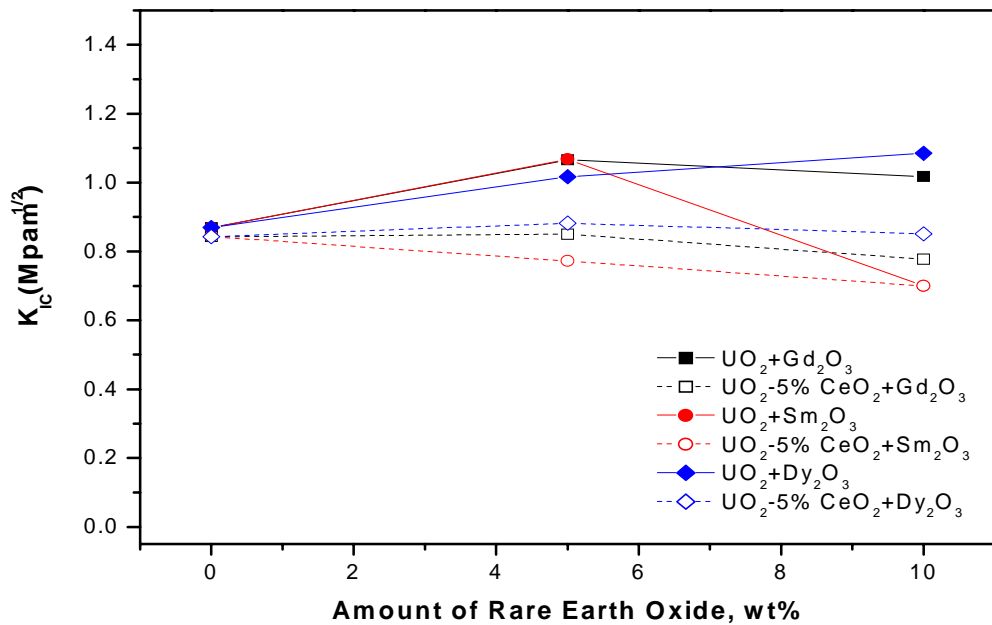


Fig. 4. Change of Fracture toughness for UO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub>-5wt%CeO<sub>2</sub> pellets with the addition of burnable poison amount(wt%).

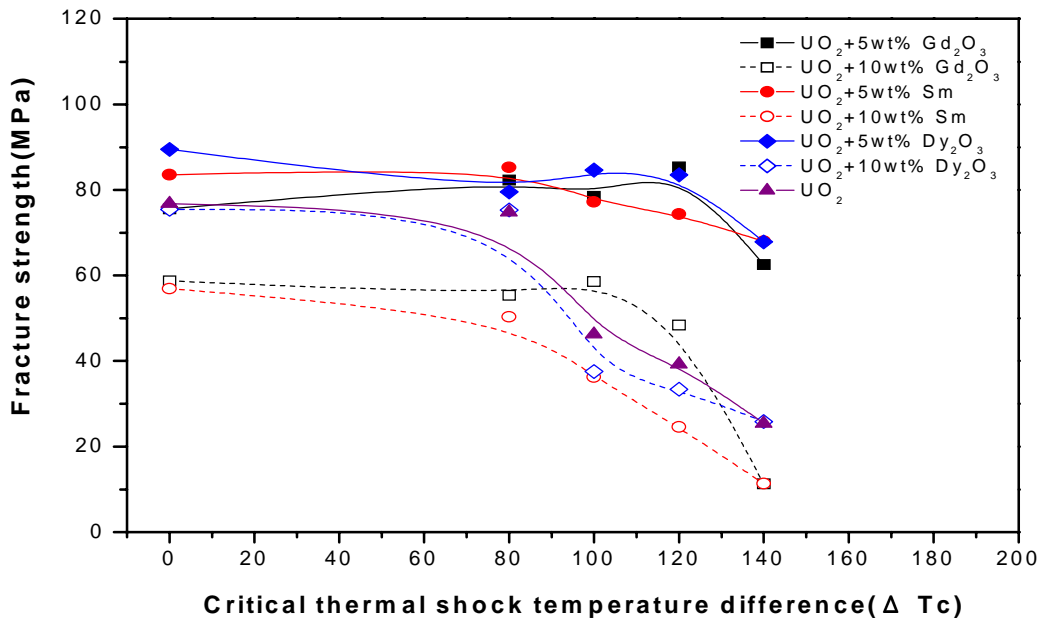


Fig.5. Fracture strength and Critical thermal shock temperature difference( $\Delta T_c$ ) of burnable poison-doped  $UO_2$  pellets.

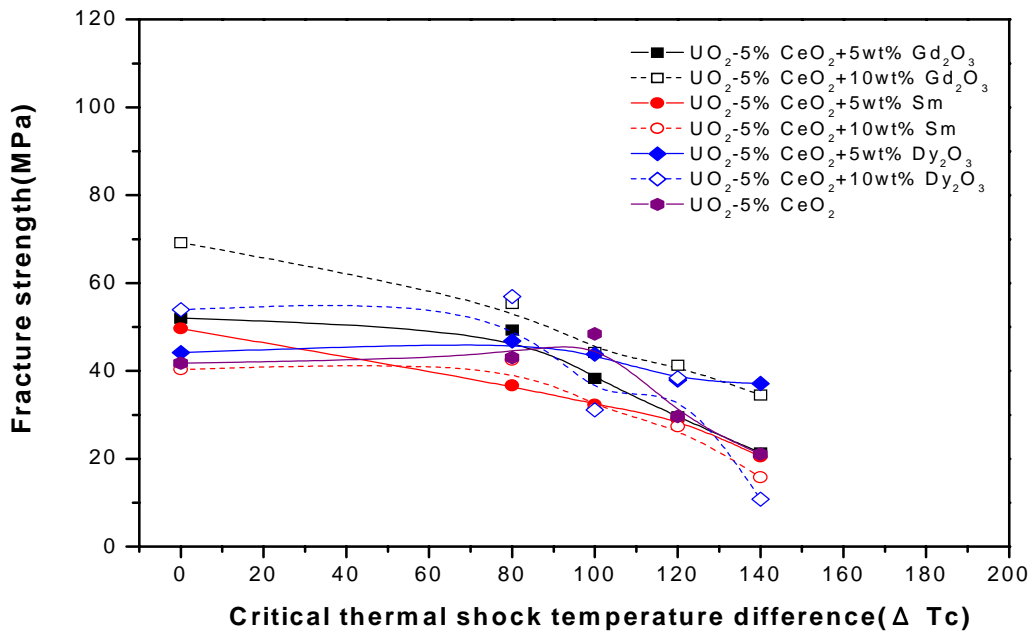


Fig.6. Fracture strength and Critical thermal shock temperature difference ( $\Delta T_c$ ) of burnable poison-doped  $UO_2-5\text{wt}\% \text{ CeO}_2$  pellets.