2003 춘계학술발표회 논문집
원자력학회

UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 기공율 및 기공분포에 따른 반복 열충격 거동 특성 연구

A study on the Effect of porosity and pore size distributions on the cyclic thermal shock behavior of UO_2-5wt%CeO_2 Pellets

이상철, 이홍림, 정창용*, 이수철*, 김한수*, 이영우*
연세대학교 세라믹공학과, 한국 원자력 연구소*

요 약

UO_2-5wt%CeO_2에 기공형성제인 AZB 분말을 첨가하여 1700°C/4hr 환원 소결한 소결체의 기공율(밀도) 및 기공분포 변화에 따른 반복 열충격 거동 특성 변화를 관찰하였다. 소결체의 반복 열충격 거동 및 냉각 거동을 이용한 열전도도 측정은 1673K까지 소결체를 가열한 후 Ar gas를 이용하여 373K까지 냉각시켜 20-25분간 유지한 후 다시 이를 반복하는 방법으로 실시하였다. UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 기공율이 증가함에 따라 열전도도 값이 감소하였고, 반복 열충격에 의해 균열의 생성 및 진전력의 크기가 증가하였으며, pore 형상 및 크기가 확대되는 경향을 보였다. 이중기공분포를 갖는 97.7 ~ 93.3% T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1400°C에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 1473~1073K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 차이를 나타내지 않았으나, 1073K 이하의 온도영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값이 감소하였다. 단일기공분포 조대기공을 갖는 92.6 ~ 95.8%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1473~473K의 온도 영역에서 반복 열충격에 의해 열전도도 값이 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

The cyclic thermal shock behavior of the UO_2-5wt%CeO_2 pellets were analysed in terms of porosity(density) and pore size distributions for UO_2-5wt%CeO_2 pellets by adding different amount of AZB poreformer to UO_2-5wt%CeO_2 and sintering at 1700°C in reducing atmosphere for 4h. Cyclic thermal shock experiment and thermal conductivity measurements were simultaneously carried out by heating disc-shaped specimens up to 1073 K ~ 1673 K and then cooling down to 343 K with Ar gas. The thermal conductivity values derived from the cooling behavior of sintered pellets are well agreed with those obtained by laser flash method. The sintered pellets show that the thermal conductivity decrease with decrease density, and crack propagation and pore size increases by cyclic thermal shock. The thermal conductivity values of UO_2-5wt%CeO_2 pellets (97.7 ~ 93.3%T.D) with the bi-modal pore size distributions do not change at the temperature range of 1473~1073K for the 30 times of cyclic thermal shock, however, decreased in the range below 1073K. UO_2-5wt%CeO_2 pellets have a mono-modal pore size distribution and the large pore shows that the thermal conductivity slightly decreases with cyclic thermal shock at the temperature range of 1473 ~ 473K.

1. 서론

원자로용 핵연료로 사용되는 UO_2 핵연료 소결체 및 UO_2에 PuO_2를 첨가한 혼합 핵연료 소결체는 밀도, 기공율, 결정립 크기등의 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. 산화물 핵연료에서 열적/기계적 특성에 관련된 문제중의 하나는 열충격에 의한 핵연료 소결체의 파괴인데, UO_2 산화물 핵연료는 원자로 출력 증가시 열전도도가 $K = (0.117 \times 2.65 \times 10^{-4}T) + 2.14 \times 10^{-3} \times (T+273)^3$(W/m°C)로 아주 낮은 값[3]을 나타내기 때문에 소결체의 원주 중심부에는 핵분열에 의해 고온상태로 되고 피복관이 접해 있는 소결체의 원주 표면 부분은 냉각수에 의해 저온상태로 되어 큰 온도차가 발생하고, 이때 핵연료 소결체는 고온에서 저온으로의 급냉에 의한 열충격과 이에 따른 열응력을 받게 된다. 핵연료 소결체의 열충격 거동은 다양한 인자들(밀도, 기공율, 결정립의 크기 및 분포, 열전도도, 첨가물)에 의해 영향을 받게되며, UO_2 단일 핵연료 및 혼합 핵연료 소결체에서 이러한 인자들의 변화에 따른 열적/기계적 특성변화에 대한 연구가 필요하다. 특히 UO_2에 PuO_2를 첨가한 혼합핵연료 소결체는 UO_2 핵연료 소결체에 비해, 낮은 소결 밀도, 결정립 성장의 둔화 및 소결체내 Pu의 불균질한 분포등의 문제[4]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. 소결체의 열전도도는 소결체의 밀도 및 미세구조의 영향을 받으며, 핵연료 소결체의 성능 및 열충격 거동을 결정하는 요소이며, 일반적인 열전도도는 laser flash method를 이용하여 열확산율 및 비열 값을 통해 열전도도 값을 산출하는 방법

이 많이 쓰여지고 있으며, 이외에도 heat source 및 heat sink를 이용한 열전도도의 직접 측정법 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 UO_2에 PuO_2와 고온 물리 화학적인 성질이 유사한 CeO_2를 첨가하고, 여기에 기공형성제를 혼합하여 기공율 및 기공분포를 달리하는 모의 혼합 핵연료 소결체를 제조한 후, 자체 개발한 열전도도 측정 장치를 이용하여 각 온도범위에서의 냉각에 의한 열전도도 값을 측정하고, 소결체에 대해 반복 열충격을 실시한 후, 소결체에 나타나는 열전도도의 변화와 기공 크기 분포의 변화 및 형상 변화를 관찰하여 소결체의 열충격 거동을 분석하였다.

2. 실험방법

(1) 시편제조

(가)단일 기공분포(mono-modal pore size distribution)를 갖는 UO_2-5wt% CeO_2 소결체 제조

① UO_2-5wt%CeO_2 분말에 3.0wt%AZB를 첨가하여 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 3 ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 4시간동안 H_2 분위기에서 환원 소결하여 93.7%T.D의 소결밀도와 mono modal의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림1(a),(d)]

② UO_2-5wt%CeO_2 분말에 1.0wt%AZB를 첨가하여 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 3 ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 4시간동안 H_2 분위기에서 환원 소결하여 95.5%T.D의 소결밀도와 mono modal의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림1(b),(d)]

③ UO_2-5wt%CeO_2 분말을 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 3 ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 4시간 동안 H_2 분위기에서 환원 소결하여 97.6%T.D의 소결밀도와 mono modal의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림1(c),(d)]

(나) 이중 기공분포(bi-modal pore size distribution)를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체 제조

① UO_2-5wt%CeO_2 분말에 1.5wt% AZB를 첨가하여 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 이 분말에 38um의 입자사이즈를 갖는 AZB 1.5%를 첨가하여 다시 2시간동안 tubular mixing하고, 3 ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 4시간동안 H_2 분위기에서 환원 소결하여 93.3%T.D의 소결밀도와 bi-modal의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림2(a),(d)]

② UO_2-5wt%CeO_2 분말에 0.5wt% AZB를 첨가하여 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 이 분말에 38um의 입자사이즈를 갖는 AZB 0.5%를 첨가하여 다시 2시간동안 tubular mixing하고, 3 ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 4시간동안 H_2 분위기에서 환원 소결하여 95.4%T.D의 소결밀도와 bi-modal의 기공 분포를 소결체를

제조하였다. [그림2(b),(d)]

③ UO_2-5wt%CeO_2 분말을 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 이 분말에 38um의 입자사이즈를 갖는 AZB 0.2%를 첨가하여 다시 2시간동안 tubular mixing하고, 3ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 4시간 동안 H_2 분위기에서 환원소결하여 97.7%T.D의 소결밀도와 bi-modal의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림2(c),(d)]

(다) 조대기공(Large pore)을 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체 제조

① UO_2-5wt%CeO_2 분말을 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 이 분말에 38um의 입자사이즈를 갖는 AZB 3.0%를 첨가하여 다시 2시간동안 tubular mixing하고, 3ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 8시간동안 H_2 분위기에서 환원소결하여 92.6%T.D의 소결밀도와 large pore(10㎛이상, mono-modal)의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림3(a),(c)]

② UO_2-5wt%CeO_2 분말을 2시간동안 tubular mixing하고, continuous attrition milling(20분/5회)처리한 후, 이 분말에 38um의 입자사이즈를 갖는 AZB 1.0%를 첨가하여 다시 2시간동안 tubular mixing하고, 3ton/cm^2로 성형하여 ,1700°C에서 8시간동안 H_2 분위기에서 환원소결하여 95.8%T.D의 소결밀도와 large pore(10㎛이상, mono-modal)의 기공 분포를 갖는 소결체를 제조하였다. [그림3(b),(c)]

AZB를 첨가하여 기공율을 변화시킨 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 밀도는 수침법(water immersion)으로 측정하였고, 기공율(porosity%)은 소결밀도를 이용하여 측정하였다. UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1mm의 disk형태로 절단한 후, 절단면의 균열을 제거하기 위해 sand paper(#600)로 연마 한 후 자체 제작한[5] 반복 열충격 장치를 이용하여 열전도도 측정 및 반복 열충격을 실시하였다.

(2) 기공율에 따른 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 변화 관찰 및 이론적 배경

기공율을 달리하는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 측정은 자체 제작한 열전도도 및 반복 열충격 장치를 이용하여 IDR UO_2 소결체(O/U비 2.00)를 reference sample로 선정하여 J.H.Harding과 D.G Martin 등이 제시한 식[6~8]을 이용하여 본 과제에서 개발한 방법[5]을 이용하여 열전도도 값(K)을 산출하였다.

(3) UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복 열충격 거동 실험

93~97%T.D의 소결 밀도(기공율) 및 기공분포를 달리하는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체를 Cyclic thermal shock test furnace를 이용하여 1400°C까지 가열한 후 5000 cc/min의 N_2 Gas로 상

온(50°C)까지 냉각시켜 나타난 소결체의 냉각곡선을 이용하여 본 과제에서 개발된 방법[5]을 이용하여 각 소결체의 열전도도를 산출하였다. 기공분포에 따른 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 특성 변화는 93%T.D, 95%T.D 및 97%T.D의 소결 밀도와 mono- modal 및 bi-modal pore size distribution을 갖는 소결체의 온도에 따른 열전도도 변화를 비교 분석하였고, 기공 크기에 따른 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 특성 변화는 92.6%T.D, 95.8%T.D의 소결 밀도와 modal pore size distribution과 10um이상의 pore를 갖는 소결체의 열전도도 변화와 기공 크기 분포의 변화 및 형상 변화를 관찰하여 소결체의 열충격 거동을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

(1) 단일 기공분포를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 특성

그림4는 반복 열충격 장치를 이용하여 소결체를 1400°C까지 가열한 후 N_2 gas(5000 cc/min)로 50°C까지 냉각시키면서 얻어진 냉각곡선을 이용하여 측정된 93.7~97.6%T.D 범위의 소결밀도를 갖는 단일기공분포(mono -modal pore size distribution) UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 온도에 따른 열전도도(K)값을 나타낸 것이다. 본 과제에서 개발된 방법을 이용하여 측정된 mono -modal pore size distribution UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 값은 일반적으로 활용되는 Laser flash method를 통해 측정된 열전도도 값과 비교했을 때, 오차범위 내에서 잘 일치함을 보여주며, mono -modal pore size distribution UO_2 -5wt%CeO_2 소결체는 473 ~ 1473K의 온도 영역에서 기공율이 증가할수록 열전도도 값이 낮아짐을 알 수 있었다.

(2) 이중 기공분포를 갖는 UO_2 -5wt%CeO_2 소결체 제조의 열전도도 특성

그림5는 반복 열충격 장치를 이용하여 소결체를 1400°C까지 가열한 후 N_2 gas(5000 cc/min)로 50°C까지 냉각시키면서 얻어진 냉각곡선을 이용하여 측정된 93.3~97.7%T.D 범위의 소결밀도를 갖는 이중기공분포(bi -modal pore size distribution) UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 온도에 따른 열전도도(K)값을 나타낸 것이다. 이중기공분포를 갖는 UO_2 -5wt%CeO_2 소결체는 **그림4**의 mono -modal pore size distribution UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 경향과 유사하게, 473 ~ 1473K의 온도 영역에서 기공율이 증가할수록 열전도도 값이 낮아졌으며, 같은 기공율에서는 단일기공분포를 갖는 소결체가 이중기공분포를 갖는 소결체보다 473 ~ 1473K의 온도 영역에서 열전도도 값이 높아짐을 알 수 있다.

(3) 조대기공(Large pore)을 갖는 UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 특성

그림6은 반복 열충격 장치를 이용하여 소결체를 1400°C까지 가열한 후 N_2 gas(5000 cc/min)로 50°C까지 냉각시키면서 얻어진 냉각곡선을 이용하여 측정된 92.6~95.8%T.D 범위의 소결밀도와 조대기공(Large pore, 10*um* 이상)을 갖는 UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 열전

도도(K)값을 나타낸 것이다. 거대기공을 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 그림 4와 5의 mono-modal pore size distribution 및 bi-modal pore size distribution을 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 값에 비해 473 ~ 1473K의 온도 영역에서 상대적으로 낮은 값을 나타냈으며, 95.8%T.D, 거대기공 UO_2-5wt% CeO_2 소결체가 92.6%T.D 소결체보다 상대적으로 높은 열전도도 값을 나타냈다.

(4) 단일 기공분포를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복 열충격 거동

그림7은 93.7~97.6%T.D 범위의 소결밀도를 갖는 단일기공분포(mono-modal pore size distribution) UO_2-5wt%CeO_2 소결체를 Cyclic thermal shock test furnace를 이용하여 1400℃에서 상온까지 가열과 냉각을 30회 반복하여 UO_2-5wt%CeO_2 소결체에 나타나는 반복열충격 전후의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 단일기공분포를 갖는 97.6%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1400℃에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 1473~ 873K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 차이를 나타내지 않았으나, 773K이하 온도 영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값의 감소가 약간 나타났다. 단일기공분포를 갖는 95.5%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1473~1173K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 별다른 차이를 나타내지 않았으나, 1073K 이하의 온도영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값의 감소가 다소 나타났다. 단일기공분포를 갖는 93.7%T.D UO_2-5wt% CeO_2 소결체는 1473~1373K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 별다른 차이를 나타내지 않았으나, 1273K 영역부터 반복 열충격에 따른 열전도도값의 감소가 나타나기 시작하여, 1173K 이하의 온도영역에서는 상대적으로 큰 열전도도의 감소를 나타냈다.

그림8은 단일기공분포 및 93.7%T.D~97.6%T.D의 소결밀도를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후에 나타나는 기공분포 변화를 나타낸 것이다. 단일기공분포 UO_2-5wt% CeO_2 소결체는 1400℃에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 기공의 부피분율 및 기공의 크기가 다소 증가함을 알 수 있었다.

그림9는 단일기공분포 및 93.7%T.D~97.6%T.D의 소결밀도를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격에 따른 소결체 표면의 균열형상 및 균열의 진전 형태를 나타낸 것인데, 93.7%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체가 상대적으로 많은 균열의 생성 및 진전을 나타냈다.

(5) 이중 기공분포를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복 열충격 거동

그림10은 이중기공(bi-modal pore size distribution) 분포 및 93.3~97.7%T.D 범위의 소결밀도를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 이중기공분포를 갖는 97.7%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1400℃에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 1473~873K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 차이를

나타내지 않았으나, 773K이하 온도 영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값의 감소가 다소 나타났다. 이중기공분포를 갖는 95.4%T.D 및 93.3%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1473~1173K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 별다른 차이를 나타내지 않았으나, 1073K 이하의 온도영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값이 상대적으로 크게 감소하였다.

(6) 조대 기공을 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복 열충격 거동

그림11은 단일기공분포 및 조대기공(mono-modal pore size distribution & large pore,10*um* 이상)을 갖는 92.6%T.D, 95.8%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후의 열전도도 변화를 나타낸 것이다. 단일기공분포 및 조대기공을 갖는 92.6%T.D, 95.8%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1400℃에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 1473~473K의 온도 영역 반복 열충격에 의해 열전도도의 약간 감소하는 경향을 나타냈다.

4. 결론

UO_2-5wt%CeO_2에 porefomer인 AZB 분말을 각각 0.3, 0.5, 0.7, 1.0wt% 첨가하여 3 ton/㎠로 성형한 후, 1700℃에서 4시간동안 93%N_2+7%H_2 분위기에서 환원 소결하여, 기공율 및 기공분포를 달리하는 소결체의 반복열충격 거동 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험에서 반복 열충격 장치를 이용하여 측정한 UO_2-5wt% CeO_2 소결체의 열전도도 값은 일반적인 열전도도 측정방법인 laser flash method를 사용해 측정된 동일 시편의 열전도도 값과 오차 범위 내에서 잘 일치함을 알 수 있었다.

(2) UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 기공율이 증가할수록 반복열충격에 의한 균열의 생성 및 진전력의 크기가 증가하였으며, 소결체의 pore의 형상 및 크기가 확대되는 경향을 보였다.

(3) 단일기공분포를 갖는 97.6%T.D UO_2- 5wt%CeO_2 소결체는 1400℃에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 1473~873K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 차이를 나타내지 않았으나, 773K이하 온도 영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값의 감소가 약간 나타났다. 단일기공분포 95.5%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1473~1173K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 별다른 차이를 나타내지 않았으나, 1073K 이하의 온도영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값의 감소가 다소 나타났다. 단일기공분포를 갖는 93.7%T.D UO_2-5wt% CeO_2 소결체는 1473~1373K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 별다른 차이를 나타내지 않았으나, 1273K 영역부터 반복 열충격에 따른 열전도도값의 감소가 나타나기 시작하여, 1173K 이하의 온도영역에서는 상대적으로 큰 열

전도도의 감소를 나타냈다.

(4) 이중기공분포 97.7%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1473~873K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 차이를 나타내지 않았으나, 773K이하 온도 영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값의 감소가 다소 나타났고, 95.4%T.D 및 93.3%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1473~1173K 영역에서는 반복 열충격 전·후의 열전도도 값에 별다른 차이를 나타내지 않았으나, 1073K 이하의 온도영역에서는 반복 열충격에 따른 열전도도 값이 상대적으로 크게 감소히였다.

(5) 단일기공분포 및 조대기공을 갖는 92.6%T.D, 95.8%T.D UO_2-5wt%CeO_2 소결체는 1400℃에서 상온까지 30회 반복 열충격을 실시했을 때, 1473~473K의 온도 영역 반복 열충격에 의해 열전도도의 약간 감소하는 경향을 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] MATPRO-V09, TREE-NURGE-1005., (1976)

[4] S.H.Kim et al., Proceedings of the Korean Nuclear Society Spring Meeting vol.Ⅱ (1998), pp186-191.

[5] S.C. Lee, H.S. Kim and Y.W. Lee., Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting, May, (2002), pp264.

[6] J.H.Harding & D.G.Martin, J. Nucl, Mater. 166 (1989) 223-226

[7] Thermal Conductivity of Uranium Dioxide. Report of the panel on thermal conductivity of uranium dioxide held in Vienna, 1965. Technical report series no.59 (IAEA, Vienna, 1966)

[8] Yildiz Bayazitoglu & M. Necati Ozisik, " Element of Heat transer", Mcgraw-hill(1988)

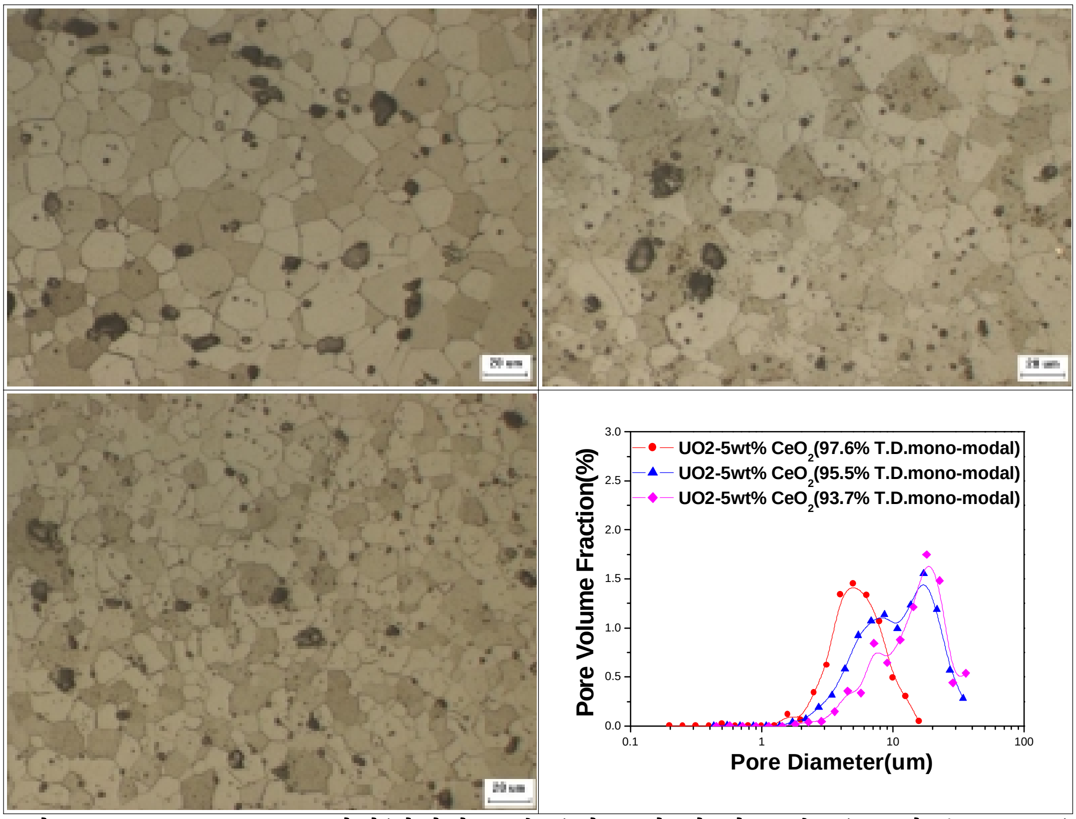


그림1. UO_2 -5wt%CeO_2 소결체(단일기공 분포)의 조직 및 기공 분포(500배, bar:20*um*)
(a) 93.7%T.D, (b) 95.5%T.D, (c) 97.6%T.D, (d) pore size distributions

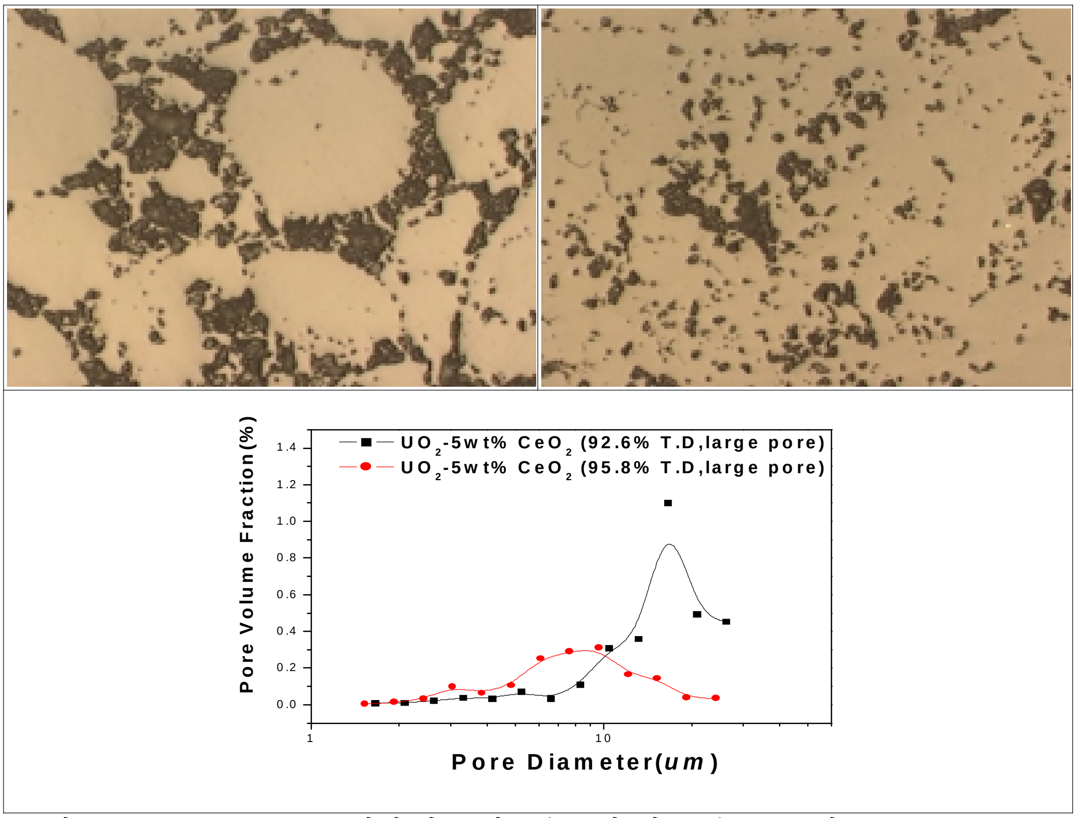


그림2. UO_2 -5wt%CeO_2 소결체(이중 기공분포)의 기공 분포(500배) (a) 92.3%T.D, (b) 95.4%T.D, (c) 97.7%T.D, (d) pore size distributions

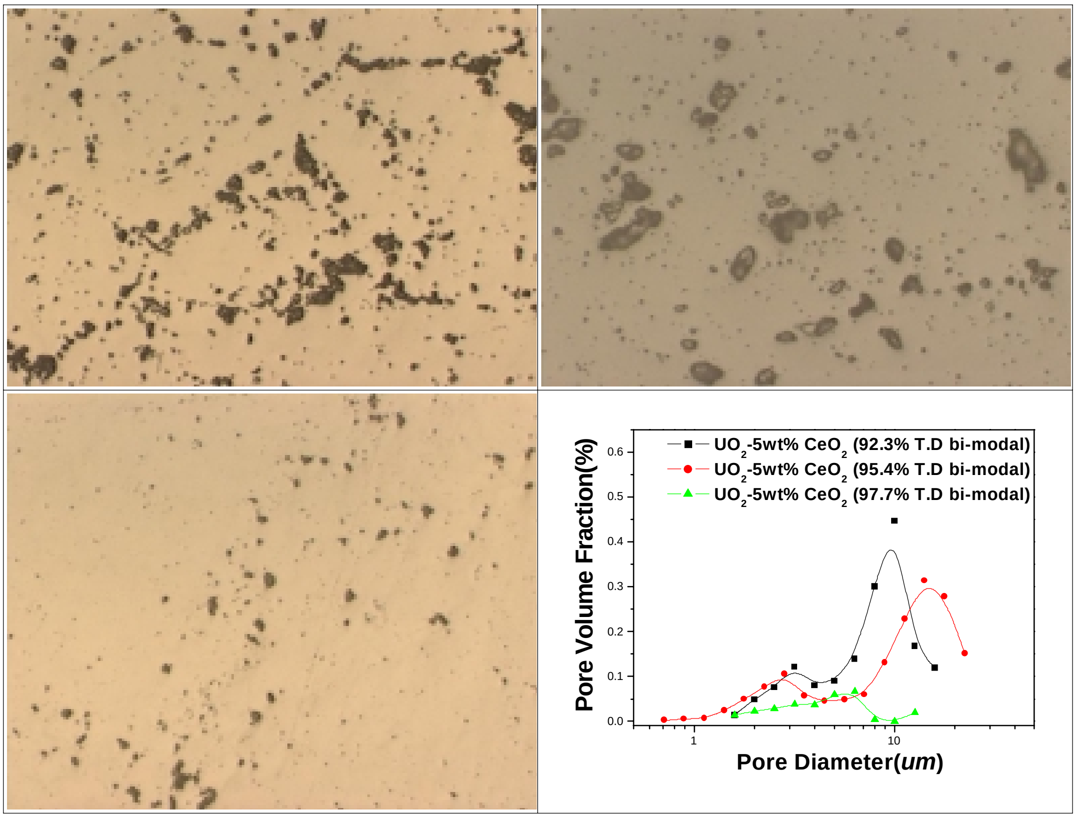


그림3. UO_2-5wt%CeO_2 소결체(단일거대기공 분포)의 기공 분포(500배)
(a) 92.6%T.D, (b) 95.8%T.D, (c) pore size distributions

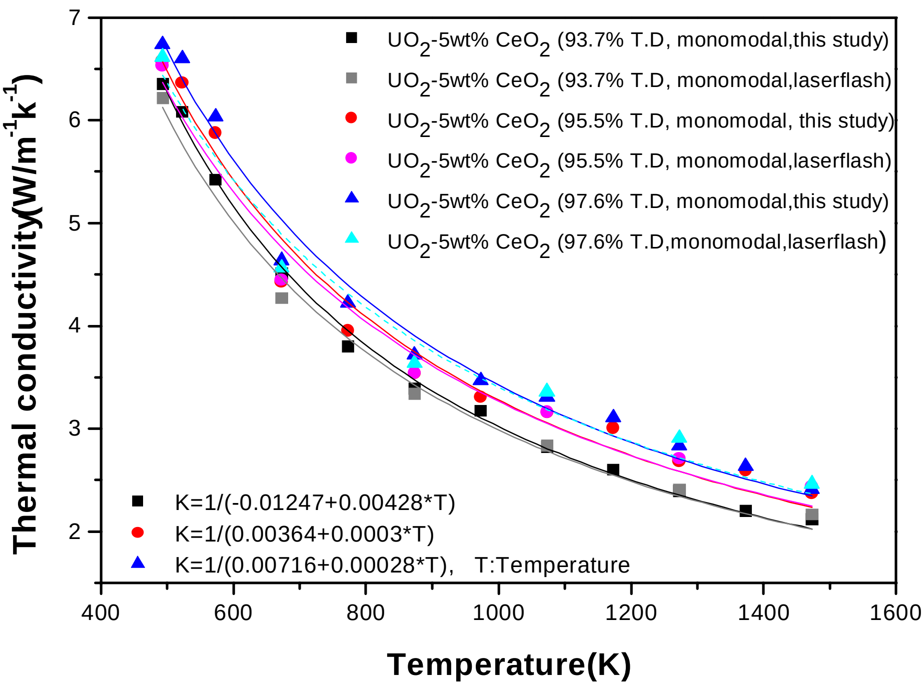


그림 4. 단일기공 분포를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 변화

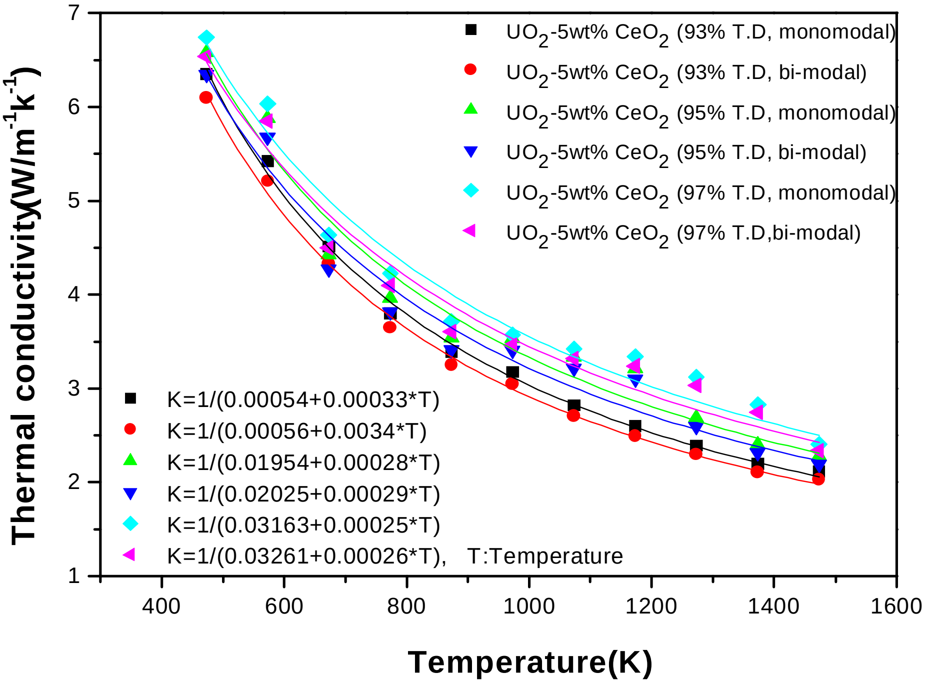


그림5. 이중기공 분포를 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 변화

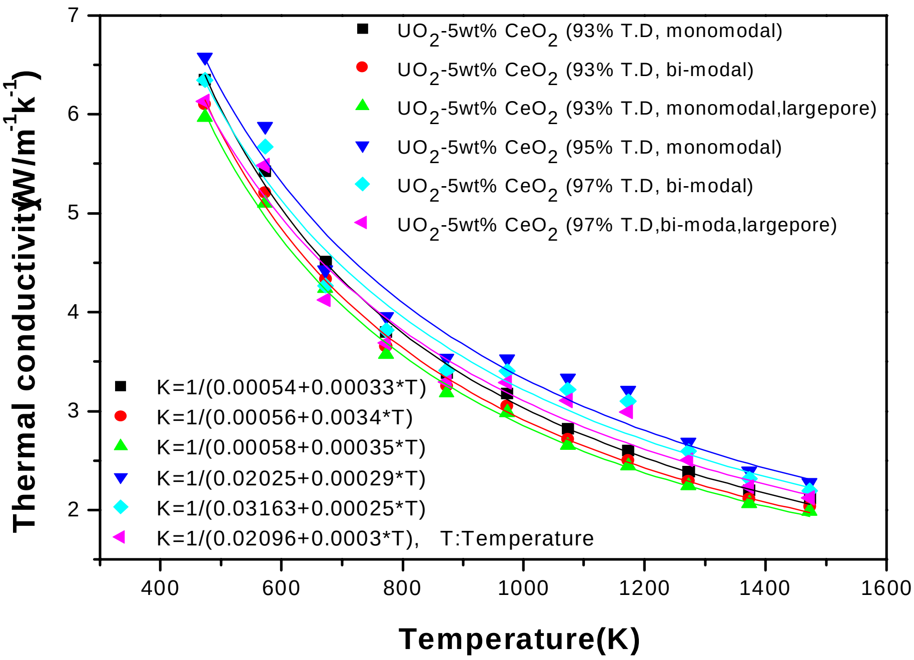


그림6. 단일기공분포 조대 기공을 갖는 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 열전도도 변화

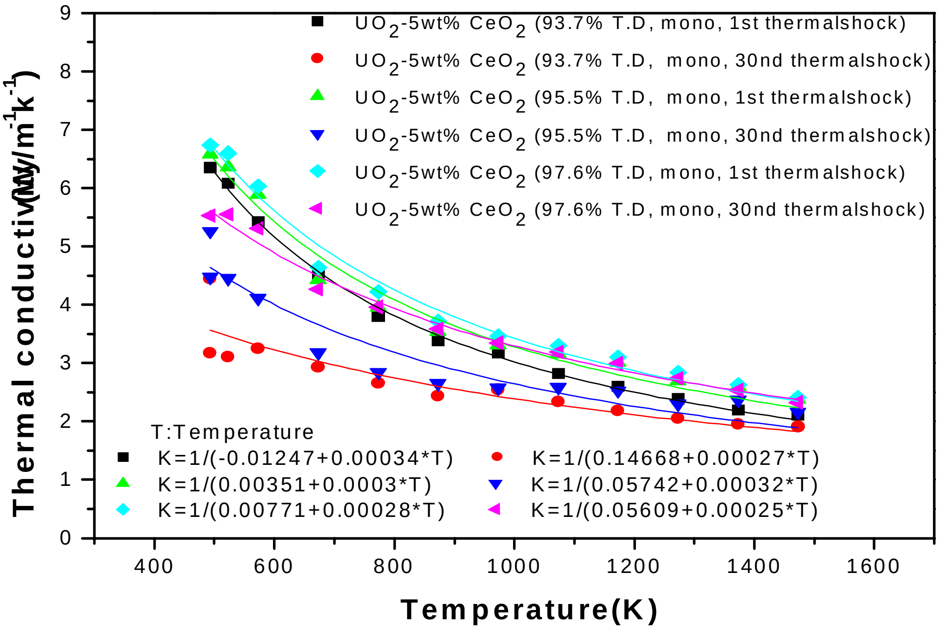


그림 7. 단일기공 분포 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후의 열전도도 변화

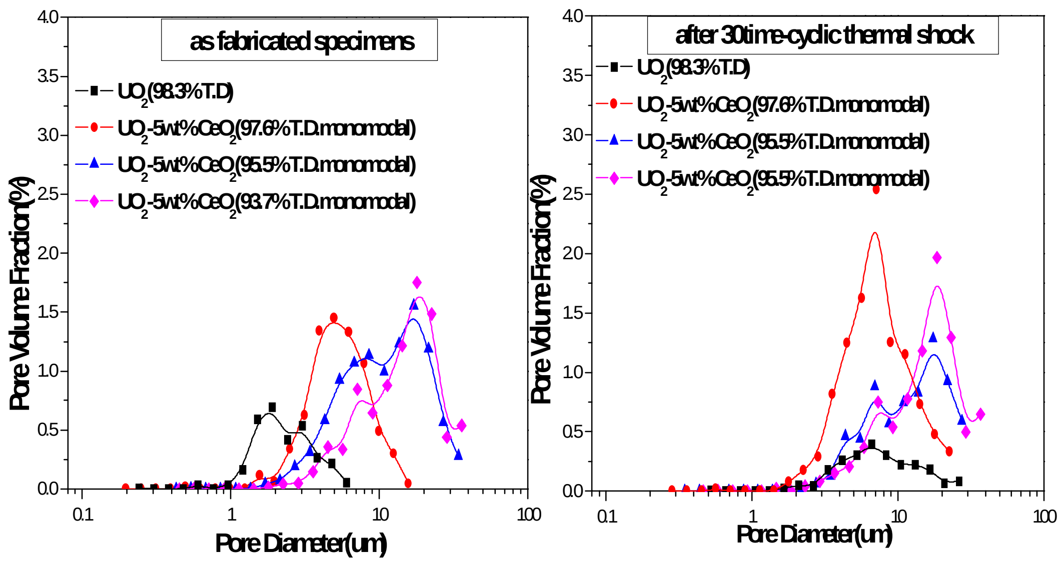


그림 8. 단일기공분포 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후의 기공분포 변화

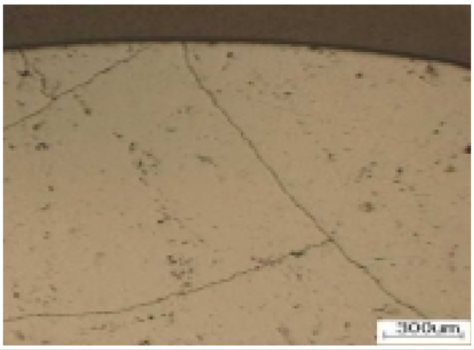
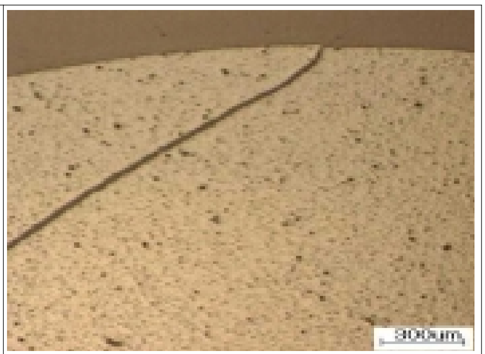
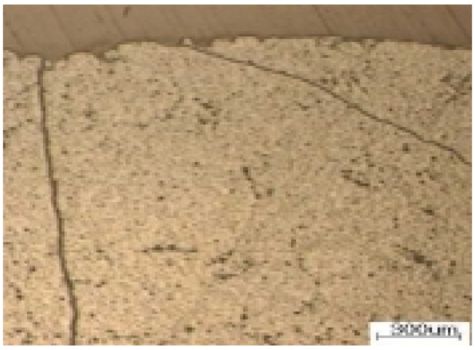
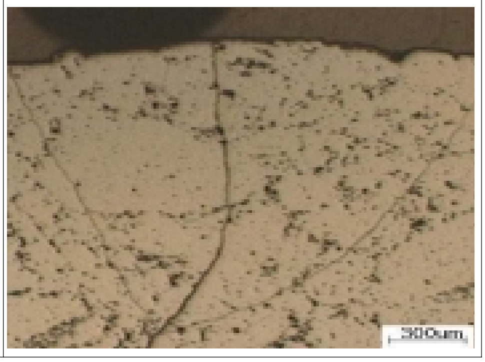
UO_2 (98.3 %TD)		UO_2 - 5wt% CeO_2 (97.6 %TD)	
UO_2 - 5wt% CeO_2 (95.5 %TD)		UO_2 - 5wt% CeO_2 (93.7 %TD)	

그림 9. 단일기공 분포 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격(1400℃~상온 30회)에 따른 균열형상 및 균열진전 형태

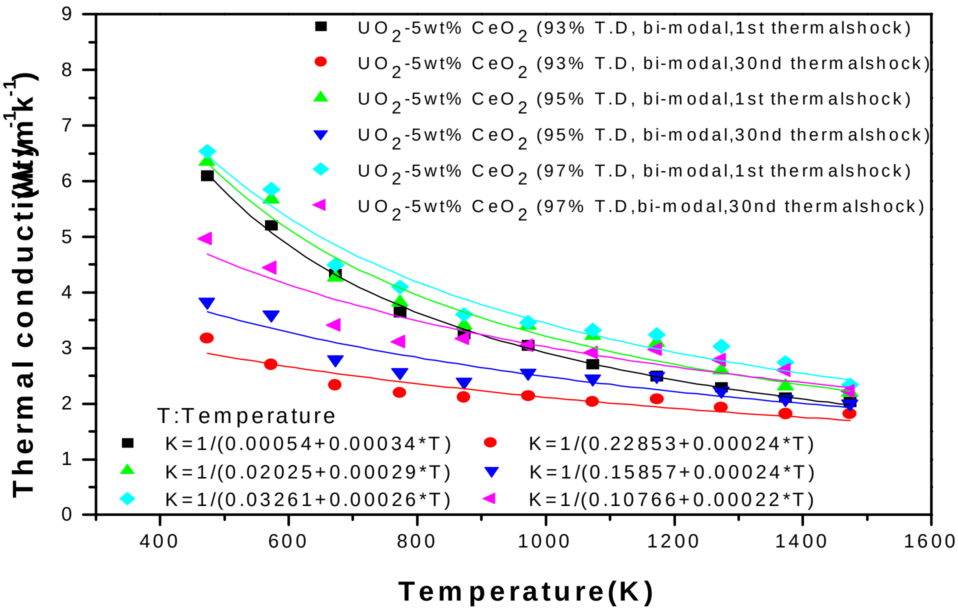


그림 10. 이중기공 분포 UO_2-5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후의 열전도도 변화

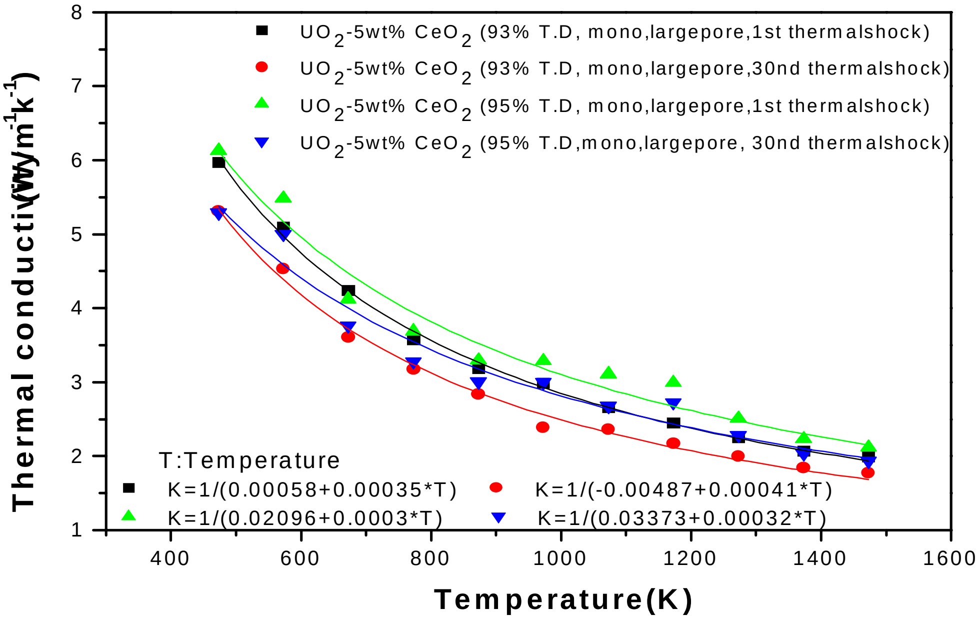


그림 11. 단일기공분포 (조대기공) UO_2 -5wt%CeO_2 소결체의 반복열충격 전·후의 열전도도 변화