

## 마이크로파를 이용한 $UO_2+5\text{ wt}\%$ $CeO_2$ 성형체의 소결특성

정창용<sup>†</sup> · 이수철 · 김시형 · 김한수 · 이영우  
한국원자력연구소 미래형원자로연료개발부  
(2004년 4월 1일 접수; 2004년 10월 1일 승인)

### Sintering Properties of $UO_2+5\text{ wt}\%$ $CeO_2$ Compacts Using Microwave

Chang-Young Joung,<sup>†</sup> Su-Cheol Lee, Si-Hyung Kim, Han-Soo Kim, and Young-Woo Lee

Advanced Nuclear Fuel Department, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea  
(Received April 1, 2004; Accepted October 1, 2004)

#### 초 록

마이크로파 가열장치를 이용하여 마이크로파 조사에 따른 SiC와  $MO_2$  시료에 대한 발열실험을 수행하였고, 이 실험에서 얻은 발열특성 결과들을 고려하여  $UO_2+5\text{ wt}\%$   $CeO_2$  성형체에 대한 산화소결 실험을 수행하였다. 그리고 마이크로파와 전기로에서 각각 소결된  $MO_2$  소결체의 특성변화를 비교분석하였다. 마이크로파 조사에 따른  $MO_2$  시료의 발열온도는 입력전력의 증가에 따라서 급속히 증가하였으며, 출력전력은 주로 보조가열재인 SiC와  $MO_2$  시료가 마이크로파와 반응하는 정도에 따라서 변하였다. 마이크로파에 의하여 소결된 소결체의 밀도는 전기로에서 동일한 조건으로 소결된 소결체의 밀도보다 약 2% T.D. 낮았다. 소결체의 미세조직은 전기로에서 제조된 소결조직에 비하여 마이크로파에 의해 제조된 소결체의 기공분포가 불규칙적이었으나, 평균결정립 크기는 크게 나타났다.

#### ABSTRACT

The heat generation tests of SiC and  $MO_2$  samples by use of a microwave heating system were carried out and  $UO_2+5\text{ wt}\%$   $CeO_2$  pellets were sintered in a microwave furnace in an oxidizing atmosphere, by taking into account the characteristics of the microwave heating obtained from the heat generation tests. The characteristics of pellets sintered in a microwave furnace were analysed and compared with those of the pellets sintered in a conventional electrical furnace. The temperature of  $MO_2$  pellets with microwave heating increased quickly with input power and the variation of output power depended on the reaction characteristics of SiC and  $MO_2$  with microwave. The sintered density of  $UO_2+5\text{ wt}\%$   $CeO_2$  pellets sintered in the microwave furnace was lower about 2% T.D. than that of the pellets sintered in an electrical furnace with sintering parameters. The microstructure of pellets sintered in microwave furnace has a broader pore distribution but has a larger grain size than that of the pellets sintered in the electrical furnace.

**Key words :** Microwave sintering,  $UO_2+5\text{ wt}\%$   $CeO_2$  pellets, Oxidizing atmosphere

#### 1. 서 론

원자력발전소에서 사용되고 있는 세라믹핵연료는 소결체의 밀도, 기공 및 결정립의 크기와 분포 등이 열적-물리적 특성과 직접적인 관계가 있으며, 원자로내에서 핵연료의 고밀화, 부피팽창, 핵분열물질의 이동 등에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 일반적으로, 핵연료 소결체 제조공정에서 사용되는 소결로는 전기로이다. 이 전기로에 핵연료 산화물 성형체를 장입하고 환원성 분위기에서 1700°C 이상의 고온으로 4시간 이상 유지하여 소결체를 제조한다. 이러한 간접가열에 따른 소결방식은 에너지 소비가 많고, 소결시간이 장시간 소요되기 때문에

경제적이지 못하다. 그러나 새로운 가열방식인 마이크로파를 이용한 소결방법은 기존의 전열가열 방법과 다르게 유전성질을 가지고 있는 세라믹재료에 마이크로파를 조사하여 쌍극자회전이나 진동으로 인해 시료 자체가 직접 발열하기 때문에 에너지 소비가 적고 소결시간을 단축시킬 수 있는 등, 많은 장점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

핵연료로 사용되고 있는 우라늄산화물은 마이크로파의 조사에 대해 매우 강하게 발열을 하고, 짧은 시간 안에 높은 온도까지 발열을 할 수 있는 큰 유전손실인자를 가지고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> T. Subramanian 등<sup>5)</sup>은  $UO_2$ 의 마이크로파 소결실험에서  $UO_2$  분말을 단열재료 이용하였고 가열속도를 제어하였으나 소결체에서 균열이 발견되었다. 이러한 균열은 시료의 자체발열에 따른 온도 제어의 어려움과 시료에서 온도분포가 불균일하여 발생되었다. 고온 발열이 요구되는 마이크로파 소결에서는 보

<sup>†</sup>Corresponding author : Chang-Young Joung  
E-mail : joung@kaeri.re.kr  
Tel : +82-42-868-2519 Fax : +82-42-868-8868

조가열재 또는 단열재의 구성 및 마이크로파가 국부적으로 집중되지 않도록 시료를 배치하여 온도분포를 균일하게 하는 것이 중요하다.<sup>6)</sup> 핵연료소결체 제조에서 산화소결 공정은 산화성 분위기에서 소결한 다음 소결체의 O/M 비를 2.00으로 환원하는데, 산화소결 시 과잉산소에 의해 우라늄이온의 확산계수 증가로 소결이 촉진되므로 환원소결공정에 비하여 낮은 온도에서 소결이 가능하며, 산소분압에 따라서 소결밀도와 결정립 크기를 용이하게 제어할 수 있는 이점이 있는 것으로 알려져 있다.<sup>7,8)</sup> 이러한 산화소결 공정을 마이크로파 소결에 적용할 경우, 보다 안정적인 소결이 가능하다.

본 연구에서 마이크로파 소결실험은 마이크로파 가열 조건에 맞게 구성된 가열장치에서  $MO_2(M=U+Ce)$  소결체 시료에 가해지는 마이크로파 조사에 따른 발열실험을 수행하였다. 여기서 얻어진 마이크로파 발열특성을 참고하여,  $UO_2+5\text{ wt}\% CeO_2$  성형체를 가열속도, 소결온도 및 소결시간 등의 변수를 적용하여 산화성 분위기에서 마이크로파 소결실험을 수행하였다. 소결된 시료는 소결밀도 및 결정립 크기 등의 물성을 측정하여 전기로에서 동일한 변수로 소결된 시료의 물성과 비교분석 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 마이크로파 실험 장치의 구성

실험에 사용된 마이크로파 소결로는 온도 제어기, 마그네트론, 마이크로파 도파관 및 cavity로 구성된다. Cavity 내부에 온도측정과 온도제어를 위한 열전대를 설치하였고, 단열재로서 다공성 알루미나판과 보조가열재(susceptor)로서 SiC 및  $MO_2$  소결체를 사용하여 만든 다중모드 가열기(multi-mode applicator)를 장착하였다. 마이크로파 발생장치에는 최대출력 6 kW의 마그네트론(National Electronics YJ1600 model)이 장착되었고, 이 장치는 2.45 GHz 주파수의 마이크로파를 방출한다. Fig. 1은 시료 장착을 위해 사용된 다중모드 가열기 내의 구조를 나타낸 것이다. 마이

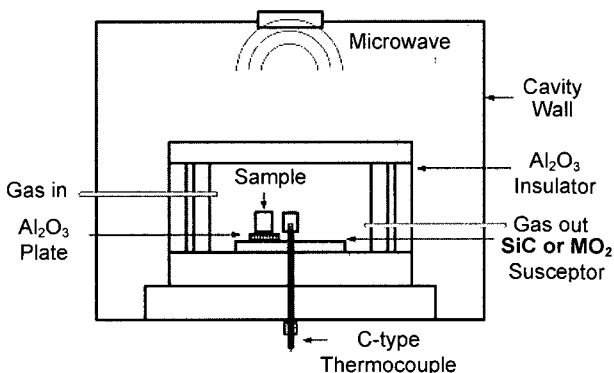


Fig. 1. Configuration of multi-mode cavity used in microwave heating.

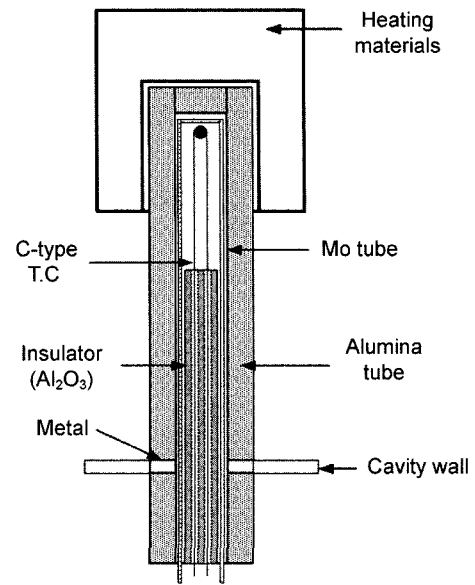


Fig. 2. Configuration of thermocouple used in microwave furnace.

크로파 가열에서 단열재로는 마이크로파와 발열반응이 적고 유전손실이 적은 다공성의 알루미나 판재를 사용하였다. 보조가열재는 가열공간의 온도제어가 용이하고 마이크로파와 반응성이 좋은 SiC 및  $MO_2$  소결체를 사용하였다. 그리고 시료의 온도측정은 Fig. 2와 같은 구조의 C-type 열전대를 사용하였다. 온도측정 중 기전력이 발생하는 열전대 접점은 마이크로파를 차단하기 위해서 폴리브덴관으로 보호하였고, 이 보호관의 외피에는 산화 및 환원성 분위기에서도 사용할 수 있도록 알루미나 보호관으로 피복하였다. 마이크로파 가열 및 소결 실험에서 직경 10 mm의  $MO_2$  소결체에 직경 4 mm의 구멍을 뚫고, 열전대 접점을 그 속에 삽입하여 시편의 온도를 측정하였다. 마이크로파로의 온도보정을 위해서 수축율에 따라서 가열 온도를 환산할 수 있는 PTCR(Process Temperature Control Ring)을 사용하였다. 마이크로파로에서 PTCR을 소결한 후 수축율을 측정하였고, 전기로에서 동일한 소결 프로그램에 따라 PTCR을 소결하여 그 수축율로부터 시편온도를 환산한 결과 마이크로파로의 시편온도가  $10^{\circ}C$  낮게 나타났으며, 이 온도차를 보정하여 소결프로그램에 적용하였다.

### 2.2. 분말준비

실험에서 사용된  $UO_2$  분말은 IDR(Integrated Dry Route) 공정에 의해 제조된 분말로서 O/U 비가 2.13이고, 분말의 평균입자 크기와 비표면적은 각각  $2.24\ \mu m$ 와  $2.27\ m^2/g$ 이다. 이 분말은 겉보기밀도(pour density)와 탭밀도(tap density)가 매우 낮으며 유동도가 나쁘다.  $PuO_2$ 의 대체 물질로 사용된  $CeO_2$  분말은 Aldrich 회사 제품으로 평균입자 크기

가  $6.66\ \mu\text{m}$ 이고, 순도는 99.9%이다.  $UO_2+5\text{ wt\% } CeO_2$  혼합분말은  $UO_2$ 에  $CeO_2$  분말을 5 wt% 첨가하여 turbula mixer로써 2시간동안 혼합한 다음, 연속형 아트리션밀에서 2분간 밀링 후 10분간 배출하는 과정을 10회 반복하여 분말처리를 하였다.

### 2.3. 발열 및 소결 실험

마이크로파 조사(irradiation)에 따른 발열실험과 소결실험은 다음과 같은 두 가지 방법으로 수행되었다. 먼저 발열실험을 위해  $UO_2+5\text{ wt\% } CeO_2$  혼합분말을 직경 100 mm의 원주형 성형체로 성형한 후,  $1700^\circ\text{C}$ 에서  $H_2+93\text{ vol\% } N_2$  환원성 분위기로 소결하여  $MO_2$  소결체 시료를 제작하였다.  $MO_2$  시료와 동일한 직경의 SiC 시료를 준비하여  $CO_2$  분위기에서 마이크로파 입력전력과 시료체적에 따른 발열실험을 수행하였다. 소결실험은  $UO_2+5\text{ wt\% } CeO_2$  혼합분말로부터 약 4g의 분말을 zinc stearate가 도포된 금형에 장입한 후, 유압프레스로써 200~400 MPa의 압력으로 성형하였다.  $UO_2+5\text{ wt\% } CeO_2$  성형체의 직경과 길이는 각각 10 mm와 8 mm이며, 성형밀도는  $6.0\sim 6.5\text{ g/cm}^3$ 이었다. 성형체를 마이크로파 소결로의 보조가열재(SiC) 상부에 위치한 도가니에 장입하고 소결변수(가열속도, 소결 온도 및 소결시간)에 따라 소결하였다.  $CO_2$  분위기에서  $5\sim 20^\circ\text{C/min}$ 의 가열속도로  $1200\sim 1500^\circ\text{C}$ 의 온도까지 가열하여 1~4시간동안 산화소결한 다음,  $H_2+93\text{ vol\% } N_2$  환원성 분위기에서 소결온도와 동일한 온도로 1시간동안 환원하였다. 마이크로파 소결로와 기존의 전기로에서 제조된 소결체의 특성을 서로 비교하기 위해 동일한 분말을 사용하였고, 같은 조건으로 성형한 다음 소결하였다. 소결체의 밀도는 침적법에 의해 측정하였고, 소결체를 길이 방향으로 절단하여 일련의 현미경 시편 준비과정을 거친 다음 단면의 기공과 결정립 조직을 관찰하였다. 소결체의 기공분포를 분석하기 위해서 소결체의 단면으로부터 부위별로 기공의 영상을 선택하여 상분석기로서 등가원직경을 측정하였으며, 이 데이터를 Saltykov 방법<sup>9)</sup>으로 분석하여 기공의 분포를 구하였다. 평균결정립 크기는 linear intercept 방법으로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 마이크로파의 발열특성

마이크로파 조사에 따른 시료의 발열특성을 확인하기 위해서 보조가열재를 사용하지 않은 가열기 내에 가열하고자 하는  $MO_2$  시료(160g)를 설치한 다음, 마이크로파의 입력전력(1~3 kW)을 변수로 하여 시간경과에 따른 온도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 가열 초기의 온도는 시료에 가해지는 마이크로파 입력전력이 증가함에 따라서 급속하게 상승하였고, 시간이 경과함에 따라서 온도상승

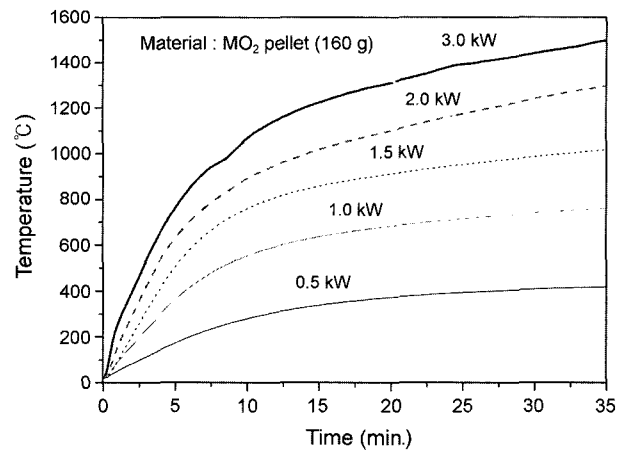


Fig. 3. Variation of temperature profiles as a function of time for  $MO_2$  pellet with different input power during microwave irradiation.

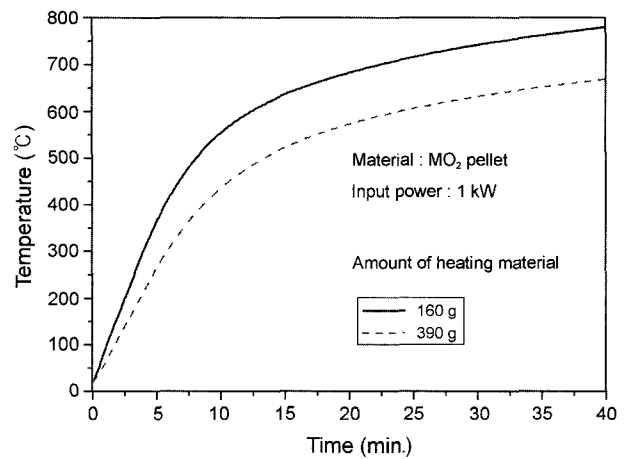


Fig. 4. Temperature profiles vs. time of  $MO_2$  pellets with sample weights during microwave irradiation.

은 완만해지는 경향을 나타내었다. 또한 가열 초기의 마이크로파 입력전력을 0.5 kW로 가할 경우의 온도는 약  $40^\circ\text{C/min}$ 으로 상승하였고, 3 kW로 가할 경우 온도는 약  $160^\circ\text{C/min}$ 으로 급속 가열이 가능하였다.

시료의 크기에 따른 마이크로파의 발열특성을 확인하기 위해서 160 g과 390 g의  $MO_2$  시료에 대해 마이크로파 입력전력을 1 kW로 일정하게 가할 때, 시간경과에 따른 온도의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 시료에 가해지는 온도 상승율은 시료의 무게가 큰 경우보다 작은 경우에서 더 높은 것으로 나타났고, 마이크로파를 각각의 시료에 조사하여 10분이 경과한 다음, 두 시료간의 온도차는 약  $120^\circ\text{C}$  이상 크게 나타났다. 기존 전기로에서는 발열체에 가열된 열이 시료에 전달되어 가열되는 간접가열이지만, 마이크로파 가열에서는 시료자체가 발열을 하는 직접가열이기 때문에 시료의 모양과 크기에 따라서 온도분포와 가열속도가 다르게 나타난다.

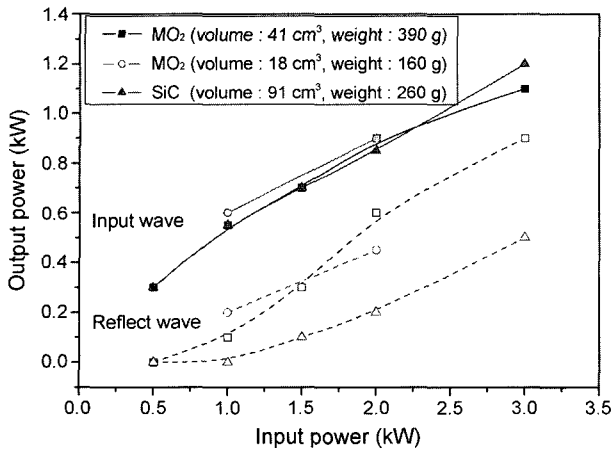


Fig. 5. Variation of output power of incident wave and reflected wave depending on input power for different samples.

마이크로파를 조사하여 출력전력을 나타내는 입사파와 반사파의 반응특성을 확인하기 위해서 마이크로파 입력 전력을 0.5~3 kW로 MO<sub>2</sub> 시료와 SiC 시료에 가하여 약 5 분 후에 나타난 입사파와 반사파의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 시료에 가해지는 마이크로파의 입력전력 증가에 따른 입사파는 시료의 크기와 종류에 따라서 큰 차이를 보이지 않았으나, 반사파는 마이크로파의 입력전력이 증가할수록 SiC 시료보다 MO<sub>2</sub> 시료에서 크게 증가하였다. 이러한 것은 마이크로파가 시료에 흡수되는 정도를 잘 나타내는 것으로서, 시료의 종류와 크기 및 가열기의 구조 등에 따라 영향을 많이 받은 것으로 나타났다. 그리고 MO<sub>2</sub> 시료에 대한 마이크로파 반응특성에서, 입사파를 1.5 kW 이하로 조사할 경우 크기가 작은 시료보다 큰 시료에서 반사파는 적게 나타났으나, 입사파를 1.5 kW 이상으로 조사시킬 경우 큰 시료에서 반사파는 크게 증가 하였다. 이와 같이 시료에 일정한 마이크로파를 조사할 경우 시료의 종류와 크기 및 온도에 따른 발열정도는 가열되는 시료의 유전율 및 유전손실율과 관련이 큰 것으로 알려져 있다.<sup>10)</sup>

마이크로파 소결에서 시료 내부에 C-type 열전대를 삽입하여 온도를 측정한 결과와 변수에 따라서 다중모드 가열기에 가해지는 마이크로파 출력전력의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 일정하게 설정된 PID 값에서 다중모드 가열기에 마이크로파를 조사하여 1500°C까지 가열속도에 따라서 소비되는 출력전력의 변화를 나타낸 것이다. 평균출력 전력은 약 1.5 kW이고, 가열속도의 증가에 따른 첨두전력(peak power)과 출력전력의 기울기는 크게 증가하였다. 특히, 가열속도를 20°C/min으로 급속하게 상승시킨 경우의 첨두전력은 설정온도의 평균출력 전력에 비해서 약 0.5 kW 이상 높게 나타났다. 가열속도를 고온의 소결온도까지 급속하게 증가시킬 경우, 임계온도 이상에서 다중모드 가열기를 구성하는 시료 또는 단열재의

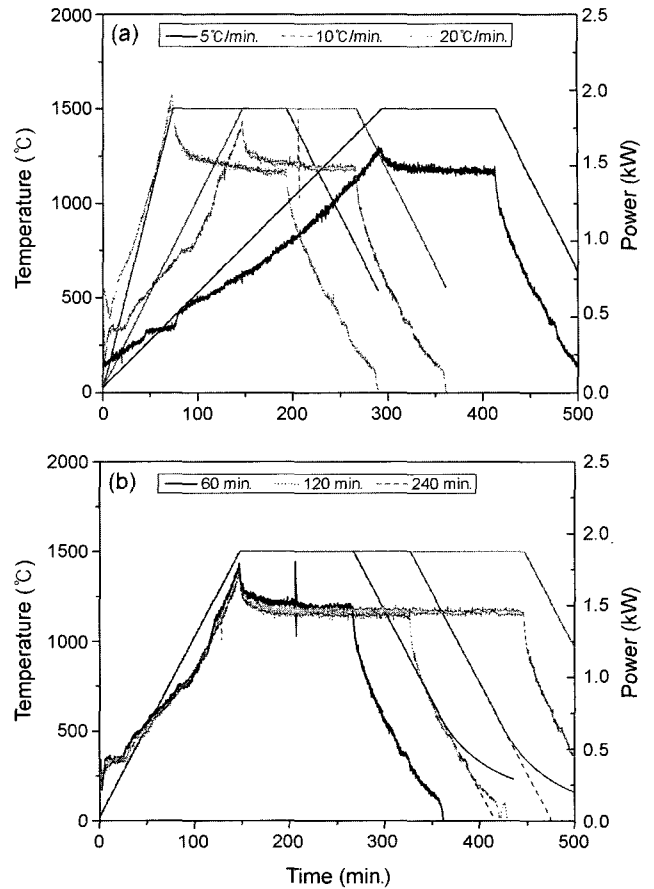
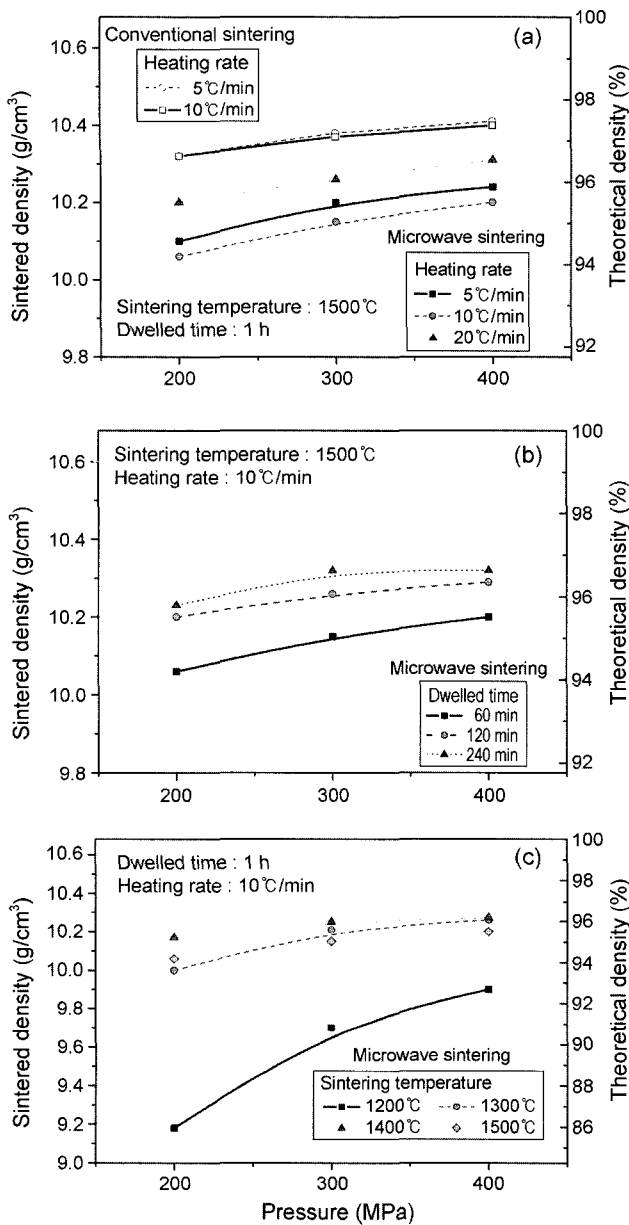


Fig. 6. Variation of temperature profiles as a function of time for UO<sub>2</sub>+5 wt% CeO<sub>2</sub> compacts during microwave irradiation with : (a) heating rate and (b) dwelled time.

유전율 및 유전손실의 급격한 증가로 인하여 온도제어를 불가능하게 하는 열폭주(thermal runaway)현상이 발생 될 수 있다.<sup>11)</sup> Fig. 6(a)에서 1500°C까지 20°C/min의 속도로 다중모드 가열기를 가열시켰으나 열폭주현상은 나타나지 않았다. Fig. 6(b)는 소결 유지시간에 따른 마이크로파 출력전력의 변화이다. 마이크로파의 출력전력이 안정화되는 때에는 1500°C 설정온도에 도달한 후, 약 1시간 소요되었으나, 열전대에서 감지된 시료의 온도는 소결프로그램으로부터 ±5°C 이내에서 안정화되었다. Fig. 6(b)에서 소결 유지시간에 따른 마이크로파 출력전력의 변화는 시료보다 부피가 크고 유전율이 높은 SiC와 마이크로파의 반응에 의해 결정되며, 시료의 온도는 단열재와 보조가열재가 완충역할을 함으로써 마이크로파 출력에 민감하게 변하지 않고 소결프로그램에 거의 일치하였다.

### 3.2. 소결

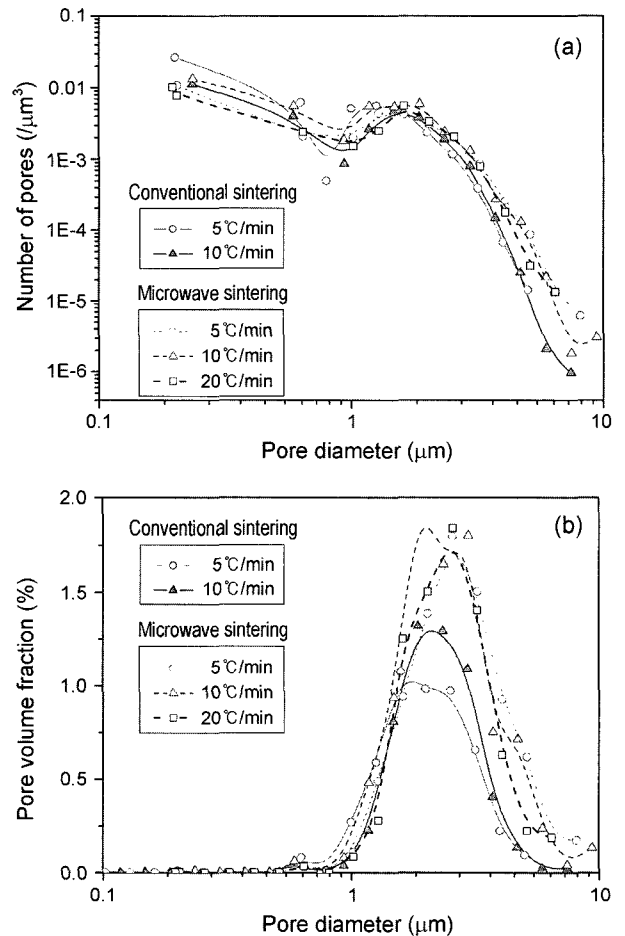
성형압력, 가열속도, 소결온도 및 소결유지시간 등의 변수를 적용하여 UO<sub>2</sub>+5 wt% CeO<sub>2</sub> 성형체를 산화성 분위기에서 마이크로파 소결하였다. Fig. 7(a)에서 성형압력과



**Fig. 7.** Density variation of  $MO_2$  pellets sintered with different sintering parameters : (a) heating rate, (b) dwelled time, and (c) sintering temperature.

가열속도를 변수로 마이크로파로와 전기로에서 각각 소결된 시료의 소결밀도 변화를 나타내었다. 전기로에서 소결된 시료의 경우 성형압력이 200~400 MPa로 증가함에 따라서 소결밀도는 일정하게 증가하였으나, 가열속도는 소결밀도 변화에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이에 반하여 마이크로파로에서 소결된 시료는 가열속도와 성형압력 모두 소결밀도에 영향을 미쳤으며, 가열속도가 빠른 경우 오히려 소결밀도가 높게 나타났다. 급속 소결은 통상의 소결에 비하여 가열속도를 훨씬 빠르게 하여 입자성장을 억제하고 치밀화를 촉진시킬 수 있

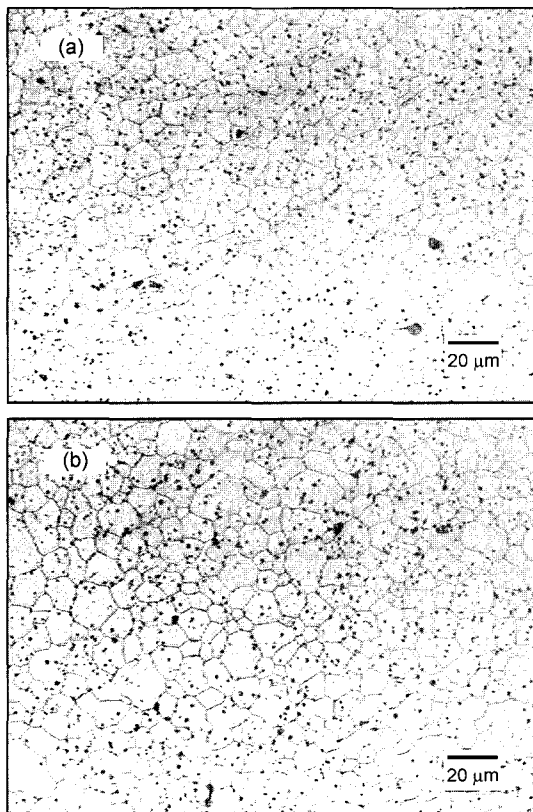
는 방법으로서, 치밀화의 활성화 에너지가 입자성장의 활성화 에너지보다 클 때 치밀화율/입자성장율의 상대적 비는 소결온도가 낮은 온도에서는 낮고 소결온도가 높아질수록 높아지게 되며, 이러한 것은 치밀화의 활성화 에너지가 입자성장의 활성화 에너지보다 큰 경우에는 항상 적용될 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>12,13)</sup> 따라서 산화성 분위기 1500°C 소결은 통상의 소결온도보다는 높은 온도일 것으로 사료되며, 가열속도를 20°C/min으로 급속 가열한 경우에는 일어날 수 있는 입자성장보다 상대적으로 치밀화가 더 잘 일어나게 되어 소결밀도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 또한 동일한 소결조건으로 마이크로파로와 전기로에서 각각 제조된 소결체의 밀도를 비교하면 전자의 경우 후자보다 약 2% T.D. 정도 낮게 나타났다. Fig. 7(b)는 마이크로파로에서 소결유지시간과 성형압력이 증가함에 따라서 소결밀도가 증가하는 경향을 나타내었다. 성형압력이 200 MPa, 300 MPa 및 400 MPa로 증가하거나 소결시간이 60분에서 120분으로 증가함에 따라서 소결밀도는 약 1% T.D.씩 높아졌다. Fig. 7(c)는 1200~1500°C



**Fig. 8.** Pore distribution of  $MO_2$  pellets depending on sintering and heating rates. (a) number of pores per pore diameter and (b) pore volume fraction per pore diameter.

온도범위에서 마이크로파로의 소결온도에 따른 소결밀도 변화를 나타낸 것으로서 소결온도가 1200°C일 경우 성형 압력에 따른 밀도 차이가 크다. 또한 1200°C와 1300°C 사이에서 소결밀도가 크게 차이가 나는 것으로 보아 이 온도구간에서 고밀화가 급격히 일어나고 있음을 알 수 있다.

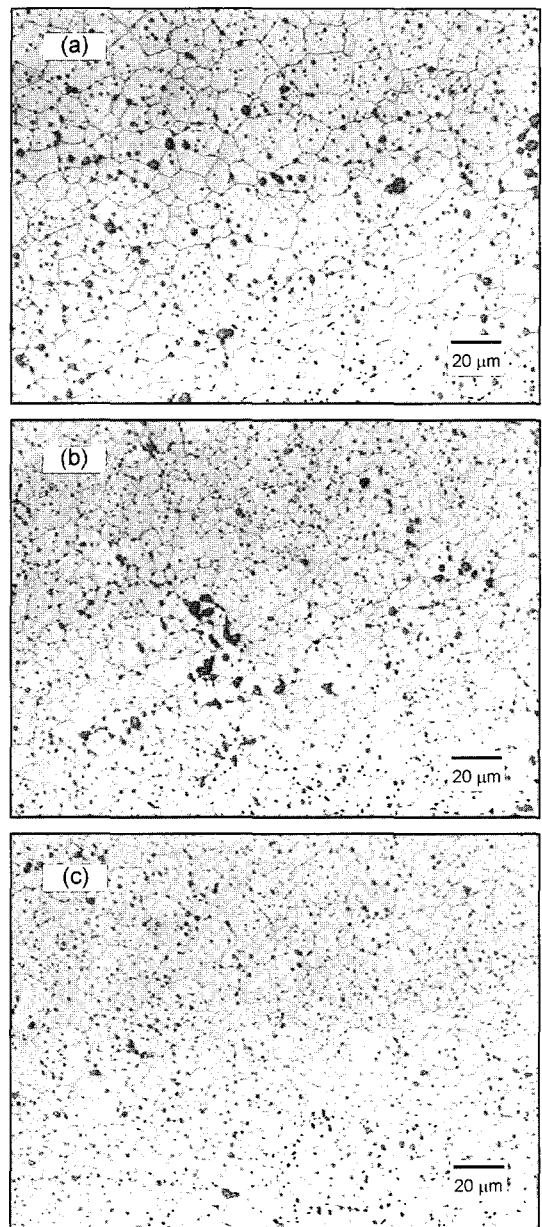
마이크로파로와 전기로에서 제조된 소결체의 기공분포를 Fig. 8에서 나타내었다. 마이크로파로에서 제조된 소결체가 전기로의 경우보다 직경 2  $\mu\text{m}$  이상의 큰 기공이 많이 분포되어 있다. 또한 소결체의 기공분포는 마이크로파로 소결의 경우 가열속도 차이에서 거의 변화가 없으나, 20°C/min에서 평균기공 크기가 약간 작아지는 경향이 있고, 전기로의 경우 시료의 가열속도가 빠르면 직경 2~3  $\mu\text{m}$  크기의 기공이 차지하는 체적분율이 증가하였다. 마이크로파로와 전기로에서 동일한 가열속도로 소결을 해도 실제 시료의 온도는 두 소결로의 가열방식이 다르기 때문에 차이가 있을 것이다. 전기로는 발열체의 열이 시편과 열전대로 전달되기 때문에 시편과 열전대에서 나타나는 실제의 가열속도가 같지만, 마이크로파로는 시료 자체가 발열하여 그 열이 열전대로 전달되어 온도가 감지되므로 실제 시료의 가열속도는 전기로의 경우보다 빠르



**Fig. 9.** Microstructures of MO<sub>2</sub> pellets sintered by the conventional method at 1500°C for 1 h with different heating rates : (a) 5°C/min(Grain size : 11  $\mu\text{m}$ ) and (b) 10°C/min(Grain size : 9  $\mu\text{m}$ ).

다. 가열속도가 빠르면 실제 소결온도보다 높은 첨두온도가 나타나게 되고, 이 온도에서 기공의 채널이 조기에 닫히게 된다. 시료 내부에 갇힌 기공은 소결이 진행되더라도 고밀화가 늦어지게 되고, 결정립성장과 더불어 기공이 성장한다.

전기로와 마이크로파로를 이용하여 1500°C에서 1시간 동안 소결하여 얻은 MO<sub>2</sub> 시료의 미세조직사진을 Figs. 9와 10에 나타내었다. 가열속도를 느리게 할수록 전기로에



**Fig. 10.** Microstructures of MO<sub>2</sub> pellets sintered by the microwave method at 1500°C for 1 h with different heating rates : (a) 5°C/min (Grain size : 13  $\mu\text{m}$ ), (b) 10°C/min (Grain size : 10  $\mu\text{m}$ ), and (c) 20°C/min (Grain size : 9  $\mu\text{m}$ ).

서 소결한 경우는 Fig. 9(a), (b)와 같이 기공은 미세하나 결정립은 크게 성장하였고, Fig. 10(a), (b), (c)와 같이 마이크로파로의 경우에는 기공과 결정립이 모두 성장하였다. 이러한 두 장치에서 제조된 소결체의 미세조직을 비교하여 볼 때, 전기로에서 제조된 소결조직에 비하여 마이크로파에 의해 제조된 소결체의 기공분포가 불규칙적이었으나, 평균결정립 크기는 크게 나타났다.

#### 4. 결 론

마이크로파 가열장치에서  $UO_2+5\text{ wt\% CeO}_2$  혼합분말의 산화소결 특성을 분석하기 위해서 마이크로파로와 전기로 내에  $CO_2$  분위기를 조성하고 발열실험과 소결실험을 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. SiC 보조가열재를 사용하지 않고 다중모드 가열기에  $MO_2$  시료만 장입하여 3 kW의 마이크로파 입력전력을 인가한 경우 약  $160^\circ C/min$ 으로 급속 가열이 가능하였고, 마이크로파 입력전력에 따른 입사파는 시료에 따라서 큰 변동이 없었으나, 반사파는 SiC 시료보다  $MO_2$  시료에서 크게 증가하였다.

2. 마이크로파로에서 소결된 시료는 동일한 소결프로그램을 적용하여 전기로에서 소결된 시료에 비해 소결밀도가 약 2% T.D. 정도 낮았고, 기공분포는 직경  $2\mu m$  이상의 큰 기공이 많이 존재하였다.

3. 마이크로파에 의해 제조된 소결체의 미세조직은 전기로에서 소결된 시료에 비하여 기공분포가 불규칙적이었으나, 평균결정립 크기는 조대한 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

#### REFERENCES

1. C. C. Dollins and F. A. Nichols, "In-Pile Intragranular Densification of Oxide Fuels," *J. Nucl. Mater.*, **78** 326-35 (1978).
2. M. H. Wood and J. R. Mathews, "A Simple Operational Gas Release and Swelling Model," *J. Nucl. Mater.*, **91** 35-40 (1980).
3. Z. Xie, J. Yang, X. Huang, and Y. Huang, "Microwave Processing and Properties of Ceramics with Different Dielectric Loss," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **19** 381-87 (1999).
4. C. E. Holcombe, "Method for Heat Treating and Sintering Metal Oxides with Microwave Radiation," US Patent 4880578 (1989).
5. T. Subramanian, P. Venkatesh, K. Nagarajan, and P. R. V. Rao, "A Novel Method of Sintering  $UO_2$  Pellets by Microwave Heating," *Mater. Lett.*, **46** 120-24 (2000).
6. P. D. Ramesh, D. Brandon, and L. Schchter, "Use of Partially Oxidized SiC Particle Bed for Microwave Sintering of Low Loss Ceramics," *Mater. Sci. Eng.*, **A266** 211-20 (1999).
7. H. Assmann, W. Doerr, and M. Peehs, "Oxide Fuels with Controlled Microstructure," *J. Nucl.*, **140** 1-6 (1986).
8. Y. Harada, " $UO_2$  Sintering in Controlled Oxygen Atmospheres of Three-Stage Process," *J. Nucl.*, **245** 217-23 (1997).
9. S. A. Saltykov, "The Determination of the Size Distribution of Particles in an Opaque Material from a Measurement of the Size Distribution of their Sections," Stereology Ed. by H. Elias, Proc. 2nd Int. Cong. for Stereology, New York; Springer-Verlag, 163 (1967).
10. D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Mile, "Microwave Heating Applications in Environmental Engineering-A Review," *Resources, Conservation and Recycling*, **34** 75-90 (2002).
11. Committee on Microwave Processing of Materials, "Microwave Processing of Materials," NMAB-473 National Academy Press Washington, D.C. (1994).
12. M. P. Harmer and R. J. Brook, "Fast Firing-Microstructural Benefits," *J. Br. Ceram. Soc.*, **80** 147-48 (1981).
13. R. M. German, "Sintering Theory and Practice," 170-71, John Wiley & Sons. Inc. New York, 1996.