

모의 사용후핵연료의 특성에 미치는 제조변수의 영향

강권호 · 류호진 · 배정현 · 송기찬 · 양명승

한국원자력연구소

The Effects of Fabrication Variable on the Characteristics of Simulated Spent Fuel

Kweon Ho Kang, Ho Jin Ryu, Jung Hyun Bae, Kee Chan Song
and Myung Seung Yang

Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

본 연구에서는 경수로 사용후핵연료를 모사하는 모의 핵연료 제조 공정 중 소결체 특성에 미치는 변수들의 영향에 관하여 기술하였다. 주로 성형압, 소결 온도 및 시간이 소결체의 밀도에 미치는 영향에 관하여 분석하였다. 성형압은 1 ton/cm²에서 4 ton/cm², 소결 온도는 1670°C, 1730°C, 1780°C, 소결 시간은 4시간, 8시간, 24시간으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 성형밀도는 성형압의 1/3승에 비례하며, 이론 밀도의 약 90.5%에서 99.6%까지의 소결 밀도를 갖는 모의 핵연료를 제조하였다. 결정립 성장지수와 활성화에너지는 각각 2.5와 287.97 kJ/mol 이었다.

Abstract — In this study, the effects of the variables on sintering of simulated fuel to simulate the spent fuel are described. Mainly, the effects of compaction pressure, sintering temperature and time on the density of pellet are described. The experimental is performed with compaction pressure of 1 ton/cm²~4 ton/cm², sintering temperature of 1670°C, 1730°C and 1780°C and sintering time of 4 hr, 8 hr and 24 hr. The green density of simulated fuel is proportional to the one third power of compaction pressure and the sintered density is 90.5~99.6% of theoretical density. The grain growth exponent and activation energy of simulated fuel is 2.5 and 287.97 kJ/mol, respectively.

1. 서 론

원자력을 이용한 발전은 다른 화석연료에 비해 대기의 NO_x, SO_x나 CO₂에 의한 오염인자가 없어 청정에너지로 알려져 있다. 다만 여기서 발생하는 사용후핵연료의 처리가 원자력의 이용에 많은 제약이 되고 있다. 이런 사용후핵연료의 안전한 저장이나 처리를 위해서는 사용후핵연료의 물성에 관한 연구가 필요하지만 높은 방사선 때문에 차폐벽, 원격취급 등 실험실 규모의 연구에는 적합하지 않다. 따라서 사용후핵연료의 물성 및 거동에 관한 연구에 이용하기 위하여 천연우라늄으로 모의 사용후핵연료를 제조하는 연구가 이루어지고 있다. 사용후핵연료의 주요 특징은 핵분열 생성물과 핵분열기체가 UO₂ 내에 존재하는 것이다. 따라서 모의 사용후핵연료는 천연 UO₂에 핵분열 생성물을 첨가하여 사용후핵

연료의 조성과 상을 비슷하게 모사하여 제조할 수 있다. 사용후핵연료에 존재하는 핵분열 생성물은 다음과 같다¹⁾.

- matrix 내에 용해된 원소 : Sr, Zr, Nb, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm;
- 금속 석출물 : Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sb, Te;
- 산화물 석출물 : Ba, Zr, Nb, Mo, (Rb, Cs, Te);
- 기화성 물질 : Kr, Xe, Br, I, (Rb, Cs, Te).

모의 사용후핵연료에 대한 연구는 건식 재처리 및 핵연료 재가공실험을 수행하기 위한 목적으로 1962년부터 연구되었다. 모의 사용후핵연료의 제조^{1)~3)}, 모의 사용후핵연료의 matrix 및 석출상^{4)~6)}과 결정구조에서 산소 potential의 영향⁷⁾에 대한 연구도 수행되었다. 또한, 금속 석출물의 화학적 상태 및 기화압력에 관한 연구^{8)~10)}도 수행되었다. 기체 및 기화성 원소를 이온주입방법^{11)~13)}으로

모의 사용후핵연료에 주입하여 온도에 따른 핵분열생성 기체 방출의 거동을 연구하기도 하였다. 그리고, 연소도에 따른 핵연료의 열전도도를 평가하기 위한 연구¹¹⁰⁾¹¹³⁾¹¹⁴⁾도 수행되었다. 국내에서는 모의 사용후핵연료를 이용하여 사용후핵연료의 산화거동에 관한 연구¹¹⁵⁾와 사용후 경수로핵연료를 중수로에 재사용 하고자 하는 DUPIC(Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU Reactors) 핵연료¹¹⁶⁾의 제조공정연구¹¹⁷⁾¹¹⁸⁾ 및 조사거동연구¹¹⁹⁾를 수행하고 있다. 이와 같이 모의 사용후핵연료는 조사된 핵연료를 대신할 수 있는 유일한 비 방사능 물질로서 쉽고 신뢰성 있는 물성 측정과 원하는 시편을 상대적으로 많이 가질 수 있는 이점이 있다. 사용후핵연료의 물성에는 연소도, 밀도, 온도, 결정립 크기 등이 변수로서 영향을 미치며, 모의 사용후핵연료를 이용하여 물성을 측정할 때는 이들 변수를 원하는 대로 제조할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 핵연료의 물성에 영향을 미치는 변수 중에서 모의 핵연료의 밀도, 결정립 크기 등 소결체의 특성에 미치는 제조공정의 영향에 관하여 연구하였다.

2. 실험

2-1. 재료

본 연구에서 모사한 사용후핵연료는 DUPIC 핵연료 제조시 기준이 되는 표준 DUPIC 핵연료의 재료로서, U-235와 Pu-239의 농도가 각각 1.0%와 0.45%가 되게 여

Table 1. Contents of fission products added in UO₂ powder.

Element	Chemical form	Contents (g)	Weight of oxide (g)	% of element
Rb	Rb ₂ O ₃	278.6	356.83	0.031
Sr	SrO	541.7	640.62	0.055
Y	Y ₂ O ₃	355.0	450.84	0.039
Zr	ZrO ₂	2888.4	3901.65	0.338
Mo	MoO ₃	2636.7	3955.05	0.342
Tc	RuO ₂	612.0	822.61	0.071
Ru	RuO ₂	1724.5	2270.50	0.196
Rh	Rh ₂ O ₃	330.0	406.97	0.035
Pd	PdO	1109.3	1276.11	0.110
Te	TeO ₂	379.6	474.80	0.041
Ba	BaCO ₃	1493.2	2145.70	0.186
La	La ₂ O ₃	957.7	1123.18	0.097
Ce	CeO ₂	1854.6	2278.15	0.197
Pr	Nd ₂ O ₃	877.6	1047.81	0.091
Nd	Nd ₂ O ₃	3157.2	3682.52	0.319
Sm	Nd ₂ O ₃	693.0	775.41	0.067
U	UO ₂	991154	1124402	97.29
Pu(Ce)	CeO ₂	7361.9	5193.16	0.449
Am	La ₂ O ₃	720.1	482.73	0.042

러 가지 연소도의 사용후핵연료를 혼합한 것이다¹²⁰⁾. 이런 표준 DUPIC 핵연료의 재료가 되는 사용후핵연료 내에 존재하는 핵분열 생성물은 ORIGEN-2 코드를 이용하여 계산하였으며, 휘발성 물질은 배제하고 함량이 높은 18개 원소를 선정하여 첨가하였다. 이 중에서 확보가 힘든 Pr, Sm은 특성이 비슷한 Nd로, Pu는 Ce로, Tc는 Ru로, Am은 La로 대체하여 첨가하였으며, 첨가된 핵분열 생성물의 양은 Table 1에 나타내었다.

2-2. 분말 처리

사용후핵연료내의 핵분열 생성물은 핵연료 전체에 균질하게 분포되어 평형상태를 이루고 있다. 따라서 모의 사용후핵연료 제조를 위하여 첨가된 핵분열 생성물을 UO₂ 분말에 균질하게 혼합하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 안정된 형태의 핵분열 생성물을 UO₂ 분말과 tubular mixer에서 약 24시간 혼합하였다. 혼합된 분말은 attrition mill에서 약 2시간 동안 습식 밀링 처리하였으며, 40°C 오븐에서 약 5일간 건조시켰다. 건조 후 분말은 딱딱하게 서로 들러붙어 있어, 이를 35번 체로 분말화 하였다. 이 분말을 1 l 용기에 담아 tubular에서 4시간 동안 회전시키면서 분말간의 마찰을 이용하여 분쇄하였다. 분말간 그리고 성형체와 성형 다이간 마찰을 줄이기 위한 윤활제로서 Zn stearate를 약 0.2 wt% 첨가하여 tubular mixer에서 약 30분간 혼합하였다.

2-3. 실험방법

소결 밀도와 결정립 성장에 가장 큰 영향을 미치는 제조 조건중 성형압, 소결 시간, 소결 온도를 변수로 실험하였다. 성형압을 1 ton/cm²에서 4 ton/cm², 소결 시간을 4시간, 8시간 및 24시간, 소결온도를 1670°C, 1730°C 및 1780°C로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 분말의 특성분석은 습식 밀링 후 그리고 tubular mixer에서 분쇄 후 분말의 형상과 입자크기를 중심으로 분석하였다. 분말의 형상 및 크기는 주사 전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 파악하였으며, 비표면 및 입자크기는 각각 laser-light scattering method와 B.E.T. (Brunauer, Emmett and Teller) 방법으로 측정하였다. 소결체의 특성은 성형압, 소결 시간 및 온도에 따른 소결체의 결정립 크기, 밀도변화를 중심으로 분석하였다. 소결체의 밀도는 수침법(immersion method)으로, 결정립 크기는 선형 교차법(linear intercept) 방법으로 측정하였다.

3. 실험 결과

3-1. 분말 특성

Fig. 1은 습식 밀링한 분말과 tubular mixer를 이용

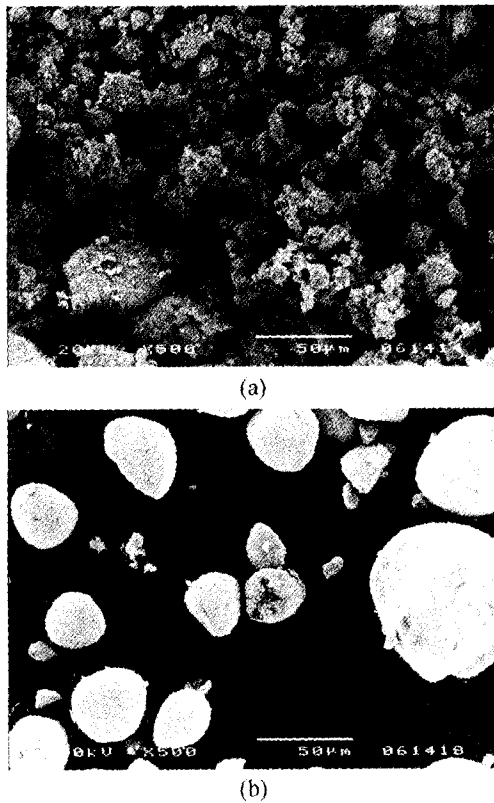


Fig. 1. Microstructures of powder a) after wet milling, b) after tubular grinding.

하여 분쇄한 분말의 모양을 나타낸 것이다. 습식 밀링한 분말은 크기가 균일하지 않고 입자들이 엉켜있는 형상을 나타내고 있으나 tubular mixer에서 분쇄한 분말은 둥근 형태를 나타내고 있다. 습식 밀링한 분말을 tubular mixer에서 분쇄하여 유동도 및 충전율을 높일 수 있을 것으로 생각된다. 실제로 겉보기 밀도(apparent density)는 습식 밀링 처리된 분말의 경우 약 1.3444 g/cm³였으며, tubular mixer 분쇄 후 2.3352 g/cm³으로 증가하였다. 이로서 분말의 충전율 및 유동도를 높이기 위한 분말의 조립화(granulation)를 tubular mixer 분쇄로 대신 할 수 있다. 분말의 입자크기는 원료분말과 습식 밀링 후 그리고 tubular mixer 분쇄 후 각각 3.28 μm, 0.45 μm 및 0.37 μm로서, 습식 밀링 후 분말의 크기는 약 86.3% 줄어들었고, tubular mixer 분쇄에 의해 약 18% 추가로 줄어들었다.

3-2. 성형 특성

성형압에 따른 성형체의 성형밀도를 파악하기 위해 성형압을 1 ton/cm²에서 4 ton/cm²까지 변화시키면서 성형

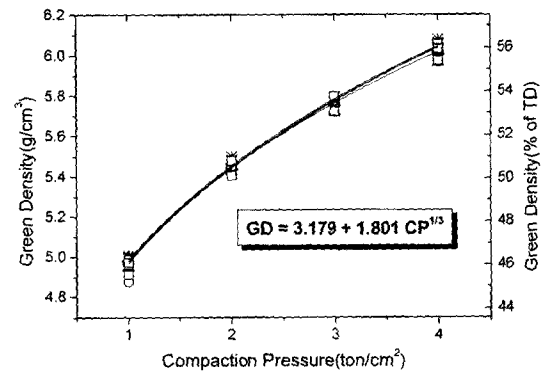


Fig. 2. Green density due to the variation of compaction pressure.

하였다. 5회에 걸쳐 같은 압력에서 27회 성형을 수행하였으며, 성형압이 1 ton/cm²에서 4 ton/cm²으로 증가함에 따라 성형밀도는 평균 4.95 g/cm³(45.9% of TD)에서 6.04 g/cm³(56.0% of TD)까지 증가하였다. Fig. 2는 성형압에 따른 성형밀도를 나타낸 것이다. 성형압이 증가할수록 성형밀도 역시 증가하였으나, 성형압이 높아질수록 증가폭은 줄어들었다. 성형압과 성형밀도와의 관계는 분말의 고유 특성과 처리방법에 따라 멱함수, 지수함수 또는 로그함수로 나타난다. 본 연구에서 사용한 분말의 경우, 성형밀도는 성형압의 1/3승에 비례하며, 다음과 같은 식으로 가장 잘 나타낼 수 있다. 즉,

$$\rho = (3.179 \pm 0.027) + (1.801 \pm 0.020) P^{1/3} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 성형밀도, P 는 성형압을 나타낸다.

3-3. 소결 밀도

성형압, 소결 온도 및 시간에 따른 소결 특성을 파악하기 위하여 성형압을 1 ton/cm²에서 4 ton/cm²으로, 소결 온도는 1670°C, 1730°C 및 1780°C에서 그리고 소결 시간은 4시간, 8시간, 24시간(1730°C에서는 14시간) 변화시키면서 실험을 수행하였다. Table 2와 Fig. 3은 소결 밀도에 미치는 성형압, 소결 온도 및 소결 시간의 영향을 나타낸 것이다. 성형압과 소결 시간에 따라 소결 밀도는 증가하였다. 성형압이 증가할수록 소결 시간에 따른 소결 밀도의 차이는 줄어들었으며, 소결 시간이 증가할수록 성형압에 따른 소결 밀도의 차이 역시 줄어들었다. 소결 밀도는 소결 온도 1670°C에서 소결 시간과 성형압에 따라 9.754 g/cm³(90.452% of TD)에서 10.602 g/cm³(98.314% of TD)로 증가하였으며, 1730°C에서 소결 시간과 성형압에 따라 10.248 g/cm³(95.025% of TD)에서 10.559 g/cm³(97.915% of TD)로 증가하였으며, 1780°C에서 소결 시간과 성형압에 따라 10.443 g/cm³

Table 2. Sintered density of simulated spent fuel due to the variation of compaction pressure, soaking time and temperature.

Soaking temp. (°C)	Soaking time (hrs)	Sintered density (g/cm ³)(괄호안은 상대밀도 %)			
		1(ton/cm ²)	2(ton/cm ²)	3(ton/cm ²)	4(ton/cm ²)
1670	4	9.754(90.452)	9.959(92.348)	10.057(93.262)	10.121(93.851)
	8	9.948(92.244)	10.144(94.063)	10.211(94.682)	10.259(95.128)
	24	10.479(97.175)	10.552(97.854)	10.572(98.039)	10.602(98.314)
1730	4	10.248(95.025)	10.352(95.993)	10.403(96.465)	10.447(96.874)
	8	10.379(96.246)	10.464(97.033)	10.511(97.467)	10.535(97.686)
	14	10.438(96.759)	10.509(97.449)	10.539(97.730)	10.559(97.915)
1780	4	10.443(96.838)	10.536(97.695)	10.563(97.954)	10.582(98.120)
	8	10.560(97.923)	10.650(98.759)	10.656(98.816)	10.677(99.006)
	24	10.710(99.286)	10.737(99.564)	10.729(99.487)	10.746(99.648)

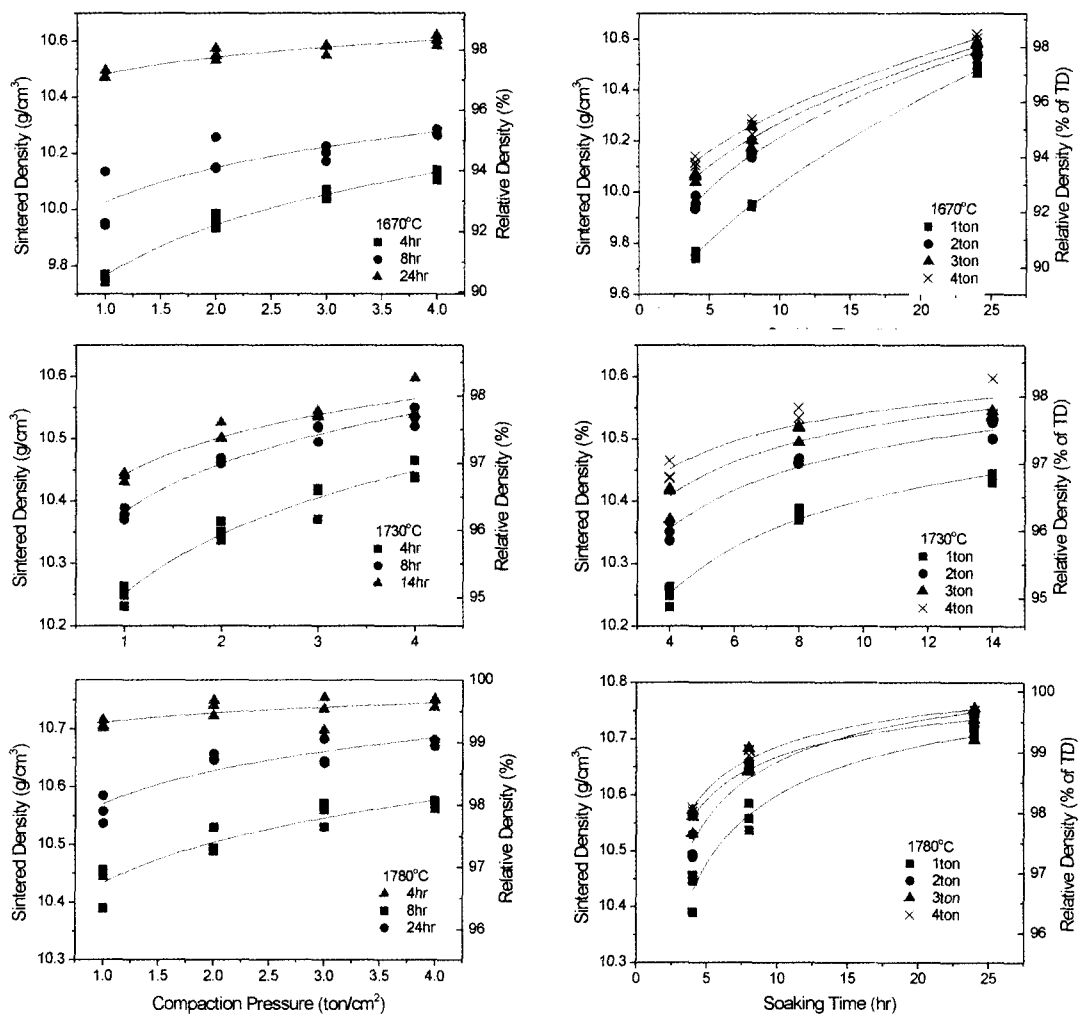


Fig. 3. Sintered density due to the variation of compaction pressure and soaking time.

(96.838% of TD)에서 10.746 g/cm^3 (99.648% of TD)로 증가하였다. 본 연구에서 수행한 소결 조건으로 이론 밀도의 약 90.5%에서 99.6%까지의 소결 밀도를 갖는 모의 핵연료를 제조할 수 있다. 이는 물성에 미치는 밀도의 영향을 관찰하기에 충분할 것으로 생각된다. 또한 CANDU 핵연료의 사양중 소결 밀도의 기준은 10.3 g/cm^3 에서 10.6 g/cm^3 으로 본 실험에서는 1670°C 에서는 1 ton/cm^2 에서 3 ton/cm^2 의 압력조건에서 24시간 소결하여야 한다. 1730°C 에서는 모든 압력 및 소결 시간에서 기준조건을 만족하였으며, 1780°C 에서는 4시간 소결할 때 기준조건을 만족하였다. 따라서 1730°C 에서 소결하는 것이 가장 바람직 할 것으로 생각된다.

3-4. 소결체의 미세구조

Fig. 4는 1670°C 에서 소결한 소결체의 소결 시간과 온도에 따른 기공분포를 나타낸 것이다. 4시간 소결한 경우 작은 기공이 많이 분포되어 있는 반면, 소결 시간이 길어질수록 작은 기공들은 소멸되고 큰 기공이 많이 분포되어 소결이 많이 진행되었음을 알 수 있다. 또한 소결 온도의 증가에 따라서 기공들이 많이 감소되는 것으로 나타났으며, 소결 시간을 늘리는 것 보다 소결 온도를 높이는 것이 기공의 감소에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 소결 밀도가 고온에서 장시간 소결할 때

증가하는 것은 이처럼 기공의 소멸 때문으로 생각된다. 그림에서 하얀 점들이 발견되었는데 이는 금속 석출물로 확인되었다^[18]. 하얀점의 금속 석출물이 소결 온도가 높을수록, 소결 시간이 길수록 많이 관찰되는 것은 고온에서 석출물들의 확산이 빨라져 결정립계에서 서로 조대화 되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 소결 온도 변화와 소결 시간 변화에 따른 소결체의 미세 구조를 나타낸 것이다.

소결 온도를 1670°C , 1730°C , 1780°C 로 변화시키면서 8시간 소결했을 때와 소결 시간을 4시간, 8시간, 24시간 변화시키면서 1780°C 에서 소결했을 때의 미세구조를 나타내었다. 소결 시간을 8시간으로 하고 소결 온도를 1670°C 에서 1780°C 로 증가시킬 경우 결정립의 크기는 $2.299 \mu\text{m}$ 에서 $4.598 \mu\text{m}$ 로 약 100% 증가하였으며, 소결 온도를 1780°C 로 하고 소결 시간을 4시간에서 24시간으로 증가시켰을 경우 결정립은 $3.605 \mu\text{m}$ 에서 $5.287 \mu\text{m}$ 로 약 46.66% 증가하였다. 이로서 소결 온도가 결정립 성장에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. Beck 등^[21]은 소결 시간과 결정립 크기와의 관계를 다음의 식으로 나타낼 수 있음을 보였다.

$$d=kt^{1/n} \quad (2)$$

여기서 d 는 결정립 크기이며, k 와 n 은 상수, t 는 소결 시

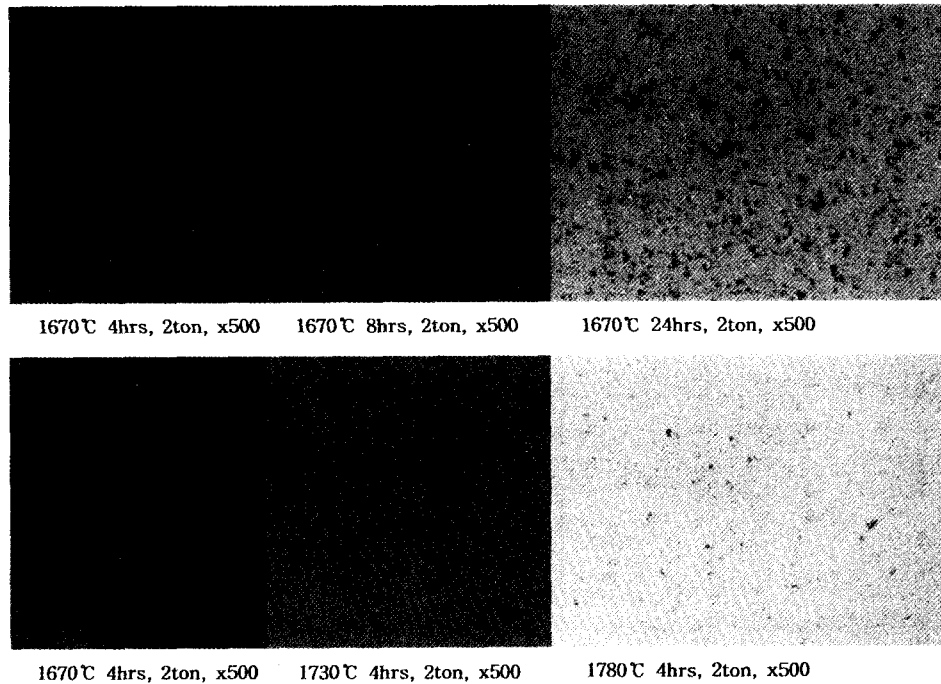


Fig. 4. Pore structures of sintered pellets.

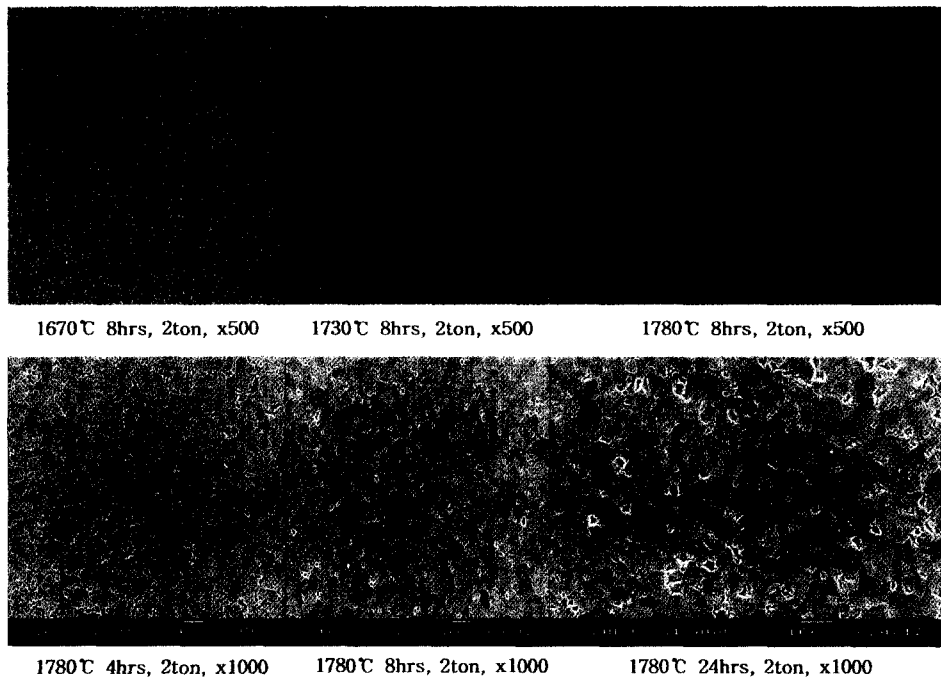


Fig. 5. Microstructures of sintered pellets due to the variation of sintered temperature and soaking time.

간을 나타낸다.

UO₂의 경우는 약 1550°C에서 2000°C의 온도범위에서 시간지수, 1/n이 0.4에 가장 잘 부합되는 것으로 알려져 있다^[22]. 따라서 본 연구에서도 시간지수를 0.4로 하여 소결 시간에 따른 결정립 크기를 Fig. 6에 나타내었으며, 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$d = 1.086 + 0.568t^{0.4} \quad (T=1670^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$d = 1.852 + 0.587t^{0.4} \quad (T=1730^\circ\text{C}) \quad (4)$$

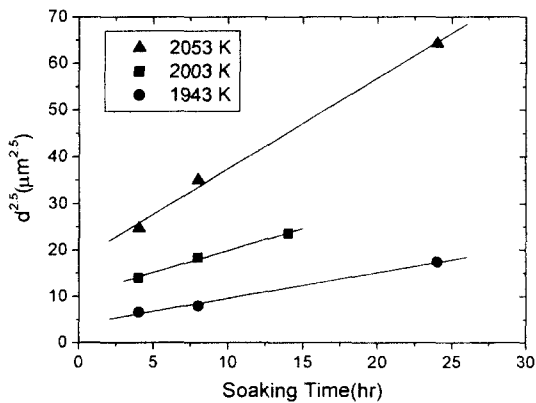


Fig. 6. Grain size with soaking time.

$$d = 2.325 + 0.857t^{0.4} \quad (T=1780^\circ\text{C}) \quad (5)$$

또한 시간과 온도에 따른 결정립 성장은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다^[24].

$$d^n - d_0^n = C_1 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot \Delta t \quad (6)$$

여기서 d는 결정립의 크기, d₀는 초기 결정립 크기, T

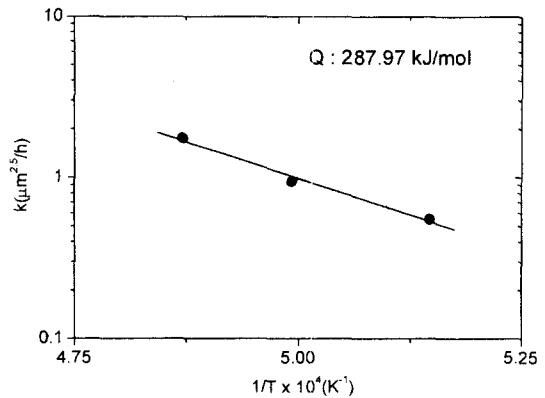


Fig. 7. Arrhenius plot, log k versus reciprocal absolute temperature.

는 소결 온도, t_n 는 소결 시간, Q 는 결정립성장 활성화 에너지, R 은 기체상수 그리고 n 과 C_1 은 상수를 나타낸다. UO_2 의 경우 지수, n 은 2~5, 활성화에너지, Q 는 240~620 kJ/mol 그리고 성장계수 C_1 은 $4 \times 10^6 \sim 7 \times 10^{15}$ 로 보고 되고 있다^{[23][25]}. 여기서 Q 와 C_1 은 지수 n 에 따라 크게 변할 수 있다. 본 연구에서는 핵연료의 성능해석 코드에서 사용하고 있는 $n=2.5$ 를 이용하여 결정립 성장율과 온도의 역수와의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7로부터 활성화에너지, Q 와 상수 C_1 은 각각 287.97 kJ/mol 과 3.05×10^7 로서 UO_2 의 경우와 유사하게 나타났다.

4. 결 론

표준 모의핵연료를 제조하기 위하여 성형압, 소결 시간 및 소결 온도를 변화시키면서 소결체의 밀도 변화를 관찰 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 습식 밀링한 분말은 크기가 균일하지 않고 입자들이 엉켜있는 형상을 나타내고 있으나 turbular mixer에서 분쇄한 분말은 둥근 형태를 나타내고 있다. 겉보기 밀도(apparent density)는 습식 밀링 처리된 분말의 경우 약 1.3444 g/cm³ 였으며, turbular 분쇄 후 2.3352 g/cm³으로 증가하였다. 이로서 분말의 충전율 및 유동도를 높이기 위한 조립화를 turbular 분쇄로 대신할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 성형밀도의 성형압은 1/3승에 비례한다.

3. 본 연구에서 수행한 소결 조건으로 이론 밀도의 약 90.5%에서 99.6%까지의 소결 밀도를 갖는 모의 핵연료를 제조할 수 있다. 이는 물성에 미치는 밀도의 영향을 관찰하기에 충분할 것으로 생각된다.

4. 시간과 온도에 따른 결정립 성장은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$d^{2.5} - d_0^{2.5} = 3.05 \times 10^7 \exp\left(-\frac{287.97 \text{ kJ/mol}}{RT}\right) \cdot t$$

여기서 d 는 결정립의 크기, d_0 는 초기 결정립 크기, T 는 소결온도, t 는 소결시간, R 은 기체상수 그리고 n 과 C_1 은 상수를 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Kleykamp, H.: J. Nucl. Mater. 167, 49 (1985).
2. Muromura, T., Adachi, T., Takeishi, H., Yoshida, Z.,

- Yamamoto, T. and Uno, K.: J. Nucl. Mater., 151, 318-326 (1988).
3. Adachi, T., Muromura, T., Takeishi, H. and Yamamoto, T.: J. Nucl. Mater., 160, 81 (1988).
4. Lucuta, P.G., Palmer, B.J., Matzke, H.J. and Hartwig, D.S.: "Preparation and characterization of SIMFUEL; Simulated CANDU high-burnup nuclear fuel", Proc. Second Int. Conf. CANDU Fuel, Ed. I.J. Hastings, CNS, Toronto (1989), also AECL-10117 (1989).
5. Une, K. and Oguma, M.: J. Nucl. Sci. Technol., 20, 844 (1983).
6. Paschoal, J.O., Kleykamp, H., Thummler, F. and Metallk, Z.: 74, 652 (1983).
7. Naito, K., Tsuji, T., Matsui, T. and Date, A.: J. Nucl. Mater., 154, 3 (1988).
8. Ugajin, M., Shiratori, T. and Shiba, K.: J. Nucl. Mater., 84, 26 (1979).
9. Ugajin, M. and Shiba, K.: J. Nucl. Mater., 91, 227 (1980).
10. Lucuta, P.G., Verrall, R.A., Matzke, H.J. and Palmer, B.J.: J. Nucl. Mater., 178, 48 (1991).
11. Ogawa, T., Verrall, R.A., Schreiter, M.D. and Westcott, M.O.: "Dose effect on release of ion-implanted noble gases from oxide fuel", Proc. of Int. Conference on CANDU Fuel, Chalk River, CNS, Ed. I.J. Hastings, 543-557 (1986).
12. Verrall, R.A., Matzke, H.J., Ogawa, T. and Palmer, B.J.: "Iodine release and bubble formation in oxide fuels", Proc. of Int. Conference on CANDU Fuel, Chalk River, CNS, Ed. I.J. Hastings, 558-572 (1986).
13. Matzke, H.J., Ray, I.L.F. and Verrall, R.A.: "Diffusion and behaviour of iodine and rubidium in UO_2 and ThO_2 ", IAEA, IWGFOT/27, 183-196 (1987).
14. Lucuta, R.A., Verrall, R.A., Matzke, H.J. and Hastings, I.J.: "Thermal conductivity and gas release from SIMFUEL", Fission gas release and fuel rod chemistry related to extended burnup, Proc. of a Committee Mtg., Pembroke, Ontario, Canada, (1992).
15. Kang, K.H., Bae, K.K., Moon, J.S., Kim, B.K. and Yang, M.S.: J. of Korean Powder Metallurgy Institute 6, 209 (1999).
16. 양명승외: "경중수로 연계 핵연료주기 기술개발", KAERI/RR-1311/93 (1993).
17. Kang, K.H., Song, K.C., Park, H.S., Moon, J.S. and Yang, M.S.: Metals and Materials 6, 583 (2000).
18. Kang, K.H., Bae, K.K., Moon, J.S., Kim, B.K. and Yang, M.S.: J. of Korean Powder Metallurgy Institute, 7, 123 (2000).
19. Bae, K.K., Kang, K.H., Yang, M.S. and Park, H.S.: Proc. 6th Int. Conf. on CANDU Fuel, p. 460, Niagara

- Falls, Canada (1999).
20. Hangbok Choi and Gyuhong Roh: "A sensitivity study on DUPIC fuel composition", KAERI/TR-942/98 (1998).
 21. Beck, P.A., Kremer, J.C., Kremer, L.J. and Holtzworth, M.L.: Trans. AIME 175, 372 (1948).
 22. Hastings, I.J., Scoberg, J.A., MacKenzie, K. and Walden: "Grain growth in UO_2 : studies at Chalk River nuclear laboratories", AECL-6411 (1979).
 23. Ainscough, J.B., Oldfield, B.W. and Ware, J.O.: J. Nucl. Mater., 49, 117 (1973/74).
 24. MacEwan, J.R. and Hayashi, J.: Proc. Brit. Ceram. Soc., 7 (1967) 245.
 25. Singh, R.N.: J Nucl. Mater., 64, 174 (1977).