

산화성 기체분위기에서 $UO_2-Gd_2O_3$ 소결체의 밀도감소

Decrease in Sintered Density of $UO_2-Gd_2O_3$ pellets under an oxidizing atmosphere

송근우, 김건식, 양재호, 강기원

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

UO_2 와 Gd_2O_3 분말 혼합체를 성형한 후 $1680^\circ C$ 에서 여러 소결분위기에서 소결했다. $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 소결체의 밀도는 소결분위기의 산소포텐셜이 증가하면서 감소했다. Dilatometer와 X-선 회절연구 결과 치밀화 억제와 $(U,Gd)O_2$ 형성이 $1300-1500^\circ C$ 구간에서 함께 일어남을 확인하였다. UO_2 속에 Gd_2O_3 의 고용도가 반대의 경우보다 매우 크므로 Gd가 일방적으로 UO_2 속으로 확산해서 새로운 기공을 형성한다. 이 새로운 기공은 산화 성분위기에서는 거의 수축하지 않아서 밀도감소를 초래하게 된다.

Abstract

A powder mixture of UO_2 and Gd_2O_3 powders was pressed into compacts and sintered at $1680^\circ C$ under various sintering atmospheres. The sintered density of $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ pellets decreases with increasing the oxygen potential of a sintering atmosphere. Dilatometry and X-ray studies indicate that the delay of densification takes place in the temperature range $1300-1500^\circ C$, along with the formation of $(U,Gd)O_2$. A very large solubility of Gd_2O_3 in UO_2 relative to the reverse solubility may cause Gd ions to diffuse directionally into UO_2 so that new pores are produced at the places of Gd_2O_3 particles. The new pores may be hardly shrinkable and thus lead to the density decrease under an oxidizing atmosphere but not under a reducing atmosphere, because a driving force for the shrinkage of new pores may be smaller under an oxidizing atmosphere than under a reducing atmosphere.

1. 서론

$UO_2-Gd_2O_3$ 소결체는 경수로에서 주기초 잉여반응도를 억제하기 위한 가연성흡수재로서 널리 사용되고 있다. $UO_2-Gd_2O_3$ 소결체의 제조방법은 근본적으로 UO_2 소결체의 제조방법을 기초로 개발되었고 따라서 분말혼합 또는 분쇄, 성형, 소결공정을 포함하고 있다 [1,2]. 그렇지만, $UO_2-Gd_2O_3$ 소결체를 UO_2 소결체와 비교해서 결정립 크기가 작고 Gd 분포가 불균일해지기 쉽기 때문에 제조가 까다롭다.

$UO_2-Gd_2O_3$ 소결체의 특성을 개선하기 위해서 제조방법이 많이 연구되고 있다. 분말 성질에 따른 소결밀도, 결정립 크기, Gd 균질도가 연구되었다[3,4]. Riella 등[4]은 공침전 방법으로 제조한 $(U,Gd)O_2$ 분말이 Gd 균질도를 얻는데 다른 방법보다 우수하다고 발표하였다. 소결분위기의 영향은 열려 연구자에 의해서 발표되었다[5,6,7]. 발표된 결과에 따르면, 소결밀도는 소결분위기의 산소포텐셜이 증가하면 감소하는 경향을 보였다.

Yuda and Une [6] 는 이러한 밀도감소와 부합하는 기공이 새롭게 형성되는 현상을 관찰하였다. 그리고 산화성분위기에서는 UO_2 와 UO_2 입자 사이에 소결이 UO_2 와 Gd_2O_3 입자 사이의 소결보다 매우 빠르게 일어나므로 Gd_2O_3 입자 주위에 기공이 형성된다고 설명하였다. 기공형성에 대한 더 깊은 연구는 아직까지 발표되지 않고 있다.

본 연구의 목적은 $UO_2-Gd_2O_3$ 소결거동에 미치는 소결분위기의 산소포텐셜의 영향을 이해하는데 있다. 밀도감소, $(U,Gd)O_2$ 고용체 형성, 미세조직의 변화 등을 연구하고, 또한 밀도감소에 관련된 기구를 제안하고 토의하고자 한다.

2. 실험 방법

소결체 제조의 출발물질로서 UO_2 와 Gd_2O_3 혼합분말을 준비하였다. UO_2 분말은 AUC (Ammonium Uranyl Carbonate) 공정으로 제조하였고 [8], 분말은 구형이고 BET 비표면적은 $5 \text{ m}^2/\text{g}$ 이다. 분말의 입자크기는 레이저 광 산란법으로 측정하였고, UO_2 와 Gd_2O_3 입자크기는 각각 17 과 $4.1 \mu\text{m}$ 이다. UO_2 와 Gd_2O_3 분말을 tumbling mixer에서 2 시간 동안 혼합하여 $UO_2-10\text{wt}\%$ Gd_2O_3 혼합분말을 얻었다. 3개의 시료를 채취하여 Gd 농도를 분석한 결과 농도차이는 0.2 wt% 이하였다.

혼합분말을 압축하여 $6.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 밀도를 갖는 성형체를 제조하고, 분당 5°C 로 1680°C 까지 가열하여 4시간 유지하여 소결하였다. 소결분위기 기체로는 수소, 수소와 이산화탄소의 혼합기체를 사용하였다. 수소의 이슬점은 -30°C 로서 수분함량은 $5 \times 10^{-2} \%$ 이다. 한편 수소와 이산화탄소의 혼합기체 (CO_2/H_2 기체)에서 CO_2 대 H_2 비는 0.05, 0.15, 0.30 으로 3 종류이다.

CO_2/H_2 혼합기체는 열역학 평형상태에서 CO , H_2O , O_2 기체가 존재하는데, 여기서 O_2

기체의 반응량을 SOLGASMIX program [9]으로 계산하여 산소포텐셜(RT ln p(O₂)) 을 구했다. 계산결과를 온도의 함수로 그림 1에 나타낸다. 산소포텐셜은 CO₂ 대 H₂ 비가 높아질수록 증가한다. 소결체 밀도는 물부력법으로 측정하였고, UO₂-10wt% Gd₂O₃ 의 이론밀도는 다음식을 이용하여 10.56 g/cm³ 으로 계산하였다 [1]: TD (g/cm³)= 10.96-0.04 • wt% of Gd₂O₃. 소결체는 길이방향으로 절단하고 미세조직을 관찰하였다.

치밀화의 온도 의존성을 파악하기 위해서 성형체의 수축량을 push-rod type의 dilatometer에서 LVDT를 이용해서 측정하였다. UO₂-10wt% Gd₂O₃ 및 UO₂ 성형체를 5°C/min 로 1650°C까지 두 종류 분위기에서 가열하였다. 사용된 기체는 수소 그리고 CO₂/CO 혼합 기체 이다. CO₂ 대 CO 의 비는 0.15 이고, 이 기체의 산소포텐셜은 CO₂ 대 H₂ 비가 0.3 인 기체와 유사하다 (그림 1 참조)

성형체를 수소 그리고 CO₂/CO 혼합기체에서 1400°C 및 1600°C 까지 각각 가열하고 냉각하여 반소결체를 제조하였다. 반 소결체에 대해서 X-선 회절분석을 실시하였다. 성형체, 반소결체 및 소결체에 대해서 EPMA를 사용하여 Gd 농도를 분석하였다.

3. 결과 및 토의

UO₂-10wt% Gd₂O₃ 성형체에서 EPMA로 구한 Gd 농도분포를 그림 2에 나타냈다. Gd 농도의 profile은 간격을 두고 높은 peak을 보였다. Peak 사이의 간격은 약 20 μm 이고 AUC 공정으로 제조한 UO₂ 입자크기와 일치한다. AUC-UO₂ 입자는 성형 중에 거의 부서지지 않는 것으로 알려져 있다. 예리한 Gd peak는 Gd₂O₃ 입자의 응집체를 나타낸다. UO₂-Gd₂O₃ 분말 성형체는 미세적으로 불균일하다고 할 수 있다.

UO₂-10wt% Gd₂O₃ 소결체의 밀도를 CO₂ 대 H₂ 기체비에 대해서 그림 3에 도시하였다. 소결밀도는 온도가 낮았기 때문에 전반적으로 낮은 값을 보인다. 소결밀도는 CO₂/H₂ 기체비가 0.05에서 약간 증가하는 결향을 보이고, 그 이상의 기체비에서는 밀도가 점진적으로 감소한다. 기체비가 0.3일 때 밀도의 총 감소량은 2.5 %TD에 이른다. 산화성분위기에서 일어나는 밀도감소는 다른 연구자에 의해서도 관찰되었다 [6, 10]. Yuda와 Une [6]는 밀도가 특정 산소포텐셜 이상에서 감소하기 시작한다고 주장하였다. 그림 3으로부터 UO₂-10wt% Gd₂O₃ 소결체의 밀도는 CO₂/H₂ 비가 0.05-0.15 사이에서 감소하기 시작하였고 이 값은 1680°C에서 -370 and -330 kJ/mole에 해당한다.

4 종류의 소결분위기에서 얻는 소결체의 미세조직을 그림 4a-4d에 보였다. 미세조직에서 기공의 수는 CO₂ 대 H₂ 비가 높아질수록 현저하게 많아진다. 밀도감소는 새로운 기공의 형성 때문으로 생각된다. Gd 농도에 대한 EPMA 분석 결과 [7] 새로운 기공은 Gd 농도가 높은 영역에서 우선적으로 형성되는 것으로 나타났다.

UO₂-10wt% Gd₂O₃ 성형체를 수소 및 CO₂/CO 혼합기체에서 가열했을 때 얻는 수축량을 온도에 따라서 그림 5a에 나타낸다. 비교를 위해서 UO₂ 분말 성형체의 수축량도 함께 나타

났다. 모든 성형체는 약 800°C에서 치밀화가 시작하지만, 전 온도구간에서는 개개의 성형체가 매우 다른 치밀화 거동을 보인다. 환원성 기체 (수소) 분위기에서는 $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 성형체는 UO_2 보다 천천히 치밀화 하며 둘 사이의 차이는 1000-1300°C 온도구간에서 점점 커진다. 둘 사이의 차이는 1300-1500°C에서 가장 크게 나타나는데, 이것은 $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 성형체의 치밀화가 이 온도구간에서 현저하게 억제되기 때문이다. $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 성형체의 치밀화는 약 1500°C 이상에서 다시 진행된다.

산화성 기체분위기(CO_2/CO 혼합기체)에서는 $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 성형체가 UO_2 보다 치밀화가 덜 일어난다. 산화성분위기에서도 환원성분위기와 거의 동일한 온도구간에서 치밀화가 억제된다. 그렇지만, 치밀화 억제가 일어나는 수축량은 큰 차이가 있다. 산화성분위기에서는 약 12%이고, 반면 환원성분위기에서는 4-6%이다. 따라서 환원성분위기에서는 소결중간단계에서 치밀화 억제가 일어나고, 산화성분위기에서는 최종소결단계 근처에서 치밀화 억제가 일어난다.

그림 5a에서 $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 성형체는 환원성분위기보다 산화성분위기에서 더 크게 치밀화 한다. 그렇지만, 그림 3a에서는 소결밀도가 산화성분위기에서 더 낮다 이러한 불일치는 소결온도에서 holding 중에 성형체의 치밀화가 환원성분위기에서 더 많이 진행된다고 가정하면 이해할 수 있다.

그림 5b에는 그림 5a로부터 구한 치밀화 속도를 나타냈다. UO_2 성형체는 산화성분위기에서는 1100°C, 환원성 분위기에서는 1300°C에서 최대 속도를 보인다. 반면에 $UO_2-Gd_2O_3$ 성형체는 산화성분위기에서 1100/1600°C에서 환원성분위기에서 1200/1600°C에서 double peak를 보인다. $UO_2-Gd_2O_3$ 성형체는 치밀화의 지연 때문에 1400-1450°C 구간에서 최소 치밀화 속도를 나타낸다. 산화성 기체분위기에서 UO_2 성형체의 peak와 $UO_2-Gd_2O_3$ 성형체의 첫 번째 peak는 온도와 속도가 유사하다. 그러나 환원성분위기에서는 UO_2 성형체의 peak는 $UO_2-Gd_2O_3$ 보다 속도가 매우 크다.

수소기체에서 소결할 때 중간온도에서 얻는 반소결체의 X-선 회절 pattern을 그림 6에 나타낸다. UO_2 와 Gd_2O_3 상은 1200°C까지 유지하며, 1450°C에서 Gd_2O_3 상이 사라지고 추가로 다른 상이 형성되는 것처럼 나타났다. 따라서 UO_2 와 Gd_2O_3 사이의 반응이 1200-1450°C 구간에서 시작되며, 이 온도구간은 $UO_2-Gd_2O_3$ 치밀화가 현저히 억제되는 구간과 일치한다. UO_2 와 Gd_2O_3 사이의 반응은 초기에는 $(U,Gd)O_2$ 고용체의 형성 또는 UGd_6O_{11} [11, 12]의 형성을 포함한다. UGd_6O_{11} 상은 $UO_2-10wt\% Gd_2O_3$ 조성에서 평형상은 아니므로 일시적으로 형성될 것으로 추정된다. 따라서 치밀화의 억제는 주로 $(U,Gd)O_2$ 형성과 관련이 있을 것으로 생각된다. 1680°C/4h에서 $(U,Gd)O_2$ 상의 세기가 크고 UO_2 상의 세기가 약한 것으로부터 $(U_{0.86},Gd_{0.14})O_2$ 고용체가 아직 완전히 형성되지 않은 것을 알 수 있다. $(U,Gd)O_2$ 고용체 형성 전에는 치밀화가 대부분 UO_2 와 UO_2 입자 사이의 소결에 의해서 발생한다. 그림 6에 보여준 X-선 회절결과는 Manzel 과 Doerr [13]의 결과와 일치하고 있다. 그들은 성형체의 치밀화가 초기에는 UO_2 와 UO_2 입자 사이에서 일어나고 그

후 (U,Gd)₂O₂ 고용체 형성에 의해서 치밀화가 억제된다고 보고하였다.

CO₂/CO 혼합기체에서 소결할 때 중간온도에서 얻는 반소결체의 X-선 회절 pattern을 그림 7에 나타낸다. UO₂ 와 Gd₂O₃ 상은 1100℃까지 유지하며, 1400℃에서 Gd₂O₃ 상이 세기는 약간 감소한다. 따라서 UO₂ 와 Gd₂O₃ 사이의 반응 - 주로 (U,Gd)₂O₂ 고용체 형성- 은 산화성 분위기에서는 1400℃ 근처에서 시작된다고 볼 수 있다. 이 온도는 치밀화의 억제가 현저하게 관찰되는 온도이다. 1650℃/4h에서 (U,Gd)₂O₂ 와 UO₂ 상이 유사한 세기를 갖고 있는데 이것은 (U_{0.86},Gd_{0.14})₂O₂ 고용체가 아직 완전하게 형성되지 않았음을 보여준다. 산화성분위기에서도 환원성분위기와 동일한 결과를 볼 수 있다. 즉, 치밀화의 억제가 (U,Gd)₂O₂ 형성과 관련이 있으며 고용체 형성 전까지의 치밀화는 UO₂ 와 UO₂ 입자의 소결에 의한 것이다.

치밀화가 억제되는 온도구간은 소결분위기에 의해서 아주 조금 영향을 받지만, 치밀화 억제 전까지 UO₂ 와 UO₂ 입자 소결은 환원성분위기보다 산화성분위기에서 훨씬 많이 진행된다. UO₂ 입자 사이의 소결은 U 확산을 통해서 일어나고 치밀화 억제와 관계이 있는 (U,Gd)₂O₂ 형성은 본질적으로 Gd 이온의 확산을 필요로 한다. UO₂에서 우라늄 확산은 산소포텐셜이 높아지면 빠라진다는 사실은 잘 알려져 있다 [14]. 그렇지만, Gd 이온은 3+ 산화가 만을 가지므로 Gd 이온의 확산은 산소포텐셜에 의해서 변하지 않을 것이다. 따라서 Gd 이온의 확산은 주로 온도에 의해서 결정되고 결과적으로 (U,Gd)₂O₂가 환원성 및 산화성분위기에서 서로 비슷한 온도에서 형성하는 이유라고 생각된다.

성형체를 수소기체에서 1400℃ 그리고 1600℃까지 소결해서 얻는 미세조직을 그림 8a 및 8b에 각각 나타낸다. 동일한 온도에서 CO₂/CO 혼합기체에서 열처리한 미세조직을 그림 9a 및 9b에 보였다. 그림 8과 그림 9의 차이로부터 UO₂ 입자의 소결이 산화성분위기에서 더욱 많이 진행된 것을 알 수 있다. 따라서 UO₂ matrix는 산화성분위기에서 밀도가 높고 환원성분위기에서는 밀도가 낮다.

1400℃에서 얻는 반소결체는 마치 성형체와 마찬가지로 UO₂ 와 UO₂ 입자 사이에서 Gd 농도의 peak이 좁고 높은 세기를 갖는 것을 볼 수 있다 (그림 8a 과 9a 참조). 1600℃에서 얻는 반소결체는 UO₂ 입자 사이에서 Gd 농도의 peak이 넓어지고 세기가 감소한 것을 볼 수 있다 (그림 8b 및 9b 참조). 따라서 1600℃에서는 Gd 이온이 주위의 UO₂로 일부 확산한 것으로 추정된다. 온도가 높아지면 하나의 Gd 농도 peak은 너비가 증가하고 여러 개의 peak으로 분리되는 경향이 관찰된다. 좀더 자세하게 설명하면, 하나의 peak이 점유하고 있는 영역 안에서 기공이 있는 곳은 세기가 낮고 기공 사이의 matrix에서는 세기가 높다. 전체 영역은 소결 전에는 Gd₂O₃ 입자로 구성되었을 것이고, 기공들은 (U,Gd)₂O₂ 가 형성되면서 새롭게 형성된 것으로 생각된다. Flipot와 Delbrassine [15]은 UO₂-Dy₂O₃를 소결하면서 이와 유사한 현상을 관찰했다고 보고하였다.

UO₂-Gd₂O₃ 계 상태도에 따르면 [11, 16], UO₂ 와 Gd₂O₃ 는 전율 고용체를 형성하지 않는다. Gd₂O₃ 는 UO₂ 에 높은 농도까지 고용되지만, UO₂ 는 Gd₂O₃ 에 매우 적은 농도만이

공요할 수 있다. 이러한 사실로부터 (U,Gd) O_2 고용체를 형성할 때 Gd 이온이 UO_2 속으로 확산하는 과정이 반대의 확산보다 훨씬 용이하다고 판단할 수 있다. UO_2/Gd_2O_3 확산쌍을 수소기체에서 1700°C로 100시간 열처리 했을 때 Gd 이온은 UO_2 속으로 확산하지만 U 이온은 Gd_2O_3 속으로 전혀 확산하지 않는 실험결과가 있다 [17]. 따라서 Gd 이온은 UO_2 속으로 일방적으로 확산한다고 - 적어도 (U,Gd) O_2 형성의 초기에는 - 생각된다. 이러한 일방적인 Gd 이온의 확산은 Gd_2O_3 입자가 있던 자리에 새로운 기공을 형성하게 한다 (Kirkendall 기공). 일반적으로 확산계수 또는 고용도가 크게 차이가 나는 두 물질을 소결하면 Kirkendall 효과에 의해서 새로운 기공이 형성된다고 알려져 있다 [18].

치밀화 곡선과 상분석 결과로부터 치밀화의 억제는 (U,Gd) O_2 형성과 함께 일어난다고 할 수 있다. (U,Gd) O_2 형성은 새로운 기공의 형성을 수반하므로 치밀화를 억제하는 효과를 갖게 되고, 따라서 관찰되는 치밀화 억제는 새로운 기공 때문으로 생각된다.

4. 결론

소결분위기의 산소포텐셜이 높아짐에 따라서 UO_2 -10wt% Gd_2O_3 소결체의 밀도는 감소하였고 또한 새로운 기공이 형성되었다. 치밀화 거동과 상분석 결과로부터 소결 중 1300-1500°C 구간에서 환원성 및 산화성 분위기 모두 치밀화 억제와 (U,Gd) O_2 형성이 함께 관찰되었다. 그렇지만 치밀화 억제 전까지 UO_2 입자 사이의 소결은 산화성분위기에서 많이 진행되어 치밀한 matrix를 갖고 환원성분위기에서는 조금 진행되어 porous matrix를 갖는다.

UO_2 - Gd_2O_3 소결체에서 산화성분위기에서 밀도가 감소하는 메커니즘을 제안한다. (U,Gd) O_2 고용체 형성이 진행되는 동안, Gd_2O_3 입자가 존재하던 자리에서 새로운 기공이 형성된다. 이것은 UO_2 속에 Gd_2O_3 의 고용도가 반대의 경우보다 매우 커서 Gd 이온이 UO_2 속으로 일방적으로 확산하면서 Kirkendall 효과에 의한 것이다. 소결 중 치밀화의 억제는 이러한 기공 형성 때문으로 생각된다. 새로운 기공의 치밀화(수축)을 위한 구동력은 다음과 같은 이유로 산화성분위기에서 작고 따라서 안정하게 잔류하게 된다. 첫째, 산화성분위기에서는 새로운 기공이 최종소결단계 근처에서 형성되지만 환원성분위기에서는 중간단계에서 형성된다. 둘째, 새로운 기공과 matrix 기공 사이의 상대적인 크기차이는 산화성분위기(dense matrix)가 환원성분위기(porous matrix) 보다 크다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구개발 사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. Assmann and J.P. Robin, in: Guidebook on Quality Control of Mixed Oxides and Gadolinium Bearing Fuels for Light Water Reactors (IAEA, Vienna, 1983), IAEA-TECDOC-584, p. 51.
- [2] H. Assmann, M. Peehs and H. Roepenack, J. Nucl. Mater. 153 (1988) 115 .
- [3] H.H. Davis, and R.A. Potter, Mater. Sci. Res. 11 (1974) 515.
- [4] H.G. Riella, M. Durazzo, M. Hirata and R.A. Nogueira, J. Nucl. Mater. 178 (1991) 204.
- [5] S.M. Ho, and K.C. Radford, Nucl. Tech. 73 (1986) 350.
- [6] R. Yuda, and K. Une, J. Nucl. Mater. 178 (1991) 195.
- [7] K.W. Song, K.S. Kim, Y.S. Yoo and Y.H. Jung, J. Korean Nucl. Soc. 30 (1998) 128.
- [8] C.S. Choi, J.H. Park, E.H. Kim, H.S. Shin and I.S. Chang, J. Nucl. Mater. 153 (1991) 148.
- [9] HSC Chemistry for Windows, 1994, Outokumpu research.
- [10] T. Nishida and R. Yuda, "Effect of particle size and oxygen potential on UO_2 - Gd_2O_3 pellet sintering," presented at the IAEA technical committee meeting on Advances in Pellet Technology for Improved Performance at High Burnup, Tokyo, Japan, October, 1996.
- [11] R.J. Beals and J.H. Handwerk, J. Amer. Ceramic Soc. 52 (1969) 578.
- [12] D. Balestrieri, Y. Philipponneau, Y. Jorand and Fantozzi, " A study of the UO_2/Gd_2O_3 composite fuel," presented at the IAEA technical committee meeting on Advances in Pellet Technology for Improved Performance at High Burnup, Tokyo, Japan, October, 1996.
- [13] R. Manzel and W.O. Doerr, Am. Ceram. Soc. Bull. 59 (1980) 601.
- [14] H.J. Matzke, in: Diffusion processes in Nuclear Materials, ed. R.P. Agarwala (Elsevier Science, 1992) p. 9.
- [15] A.J. Flipot and A Delbrassine, Powder Metall. International 4 (1972) 134.
- [16] R.S. Roth, J.R. Dennis and H.F. McMurdie, in: Phase Diagrams for Ceramists (American Ceramic Society, 1975) p. 152.
- [17] J.H. Yang and K.W. Song, unpublished work.
- [18] R.M. German, in: Sintering Theory and Practice (John Wiley & Sons, New York, 1996) p. 197.

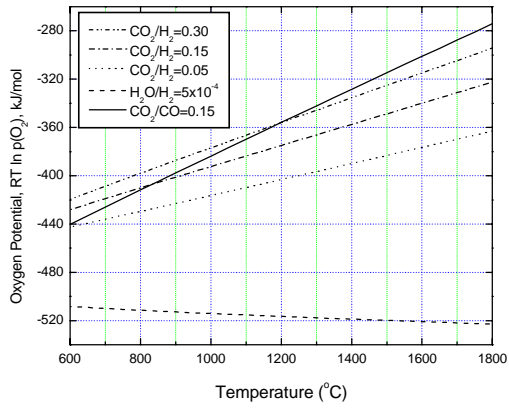


그림 1. 실험에 사용된 소결기체의 온도에 따른 산소포텐셜.

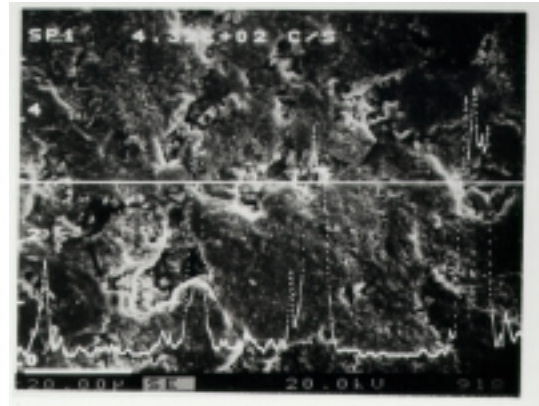


그림 2. 성형체 단면의 Gd 농도 profile.

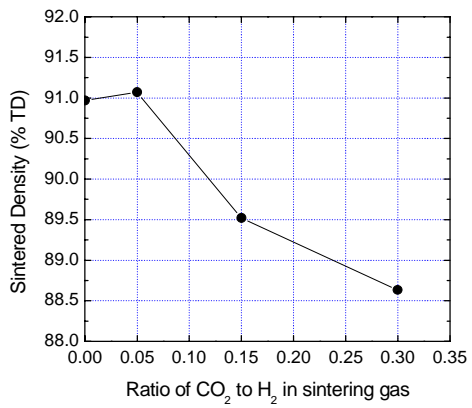


그림 3. 소결기체의 산소포텐셜에 따른 소결밀도 변화.

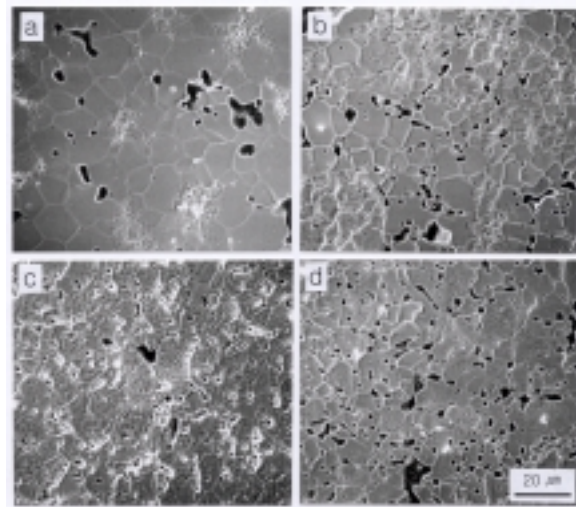


그림 4. 소결분위기와 소결체 미세조직
 (a)수소, (b)CO₂/H₂=0.05
 (c)CO₂/H₂=0.15, (d)CO₂/H₂=0.3

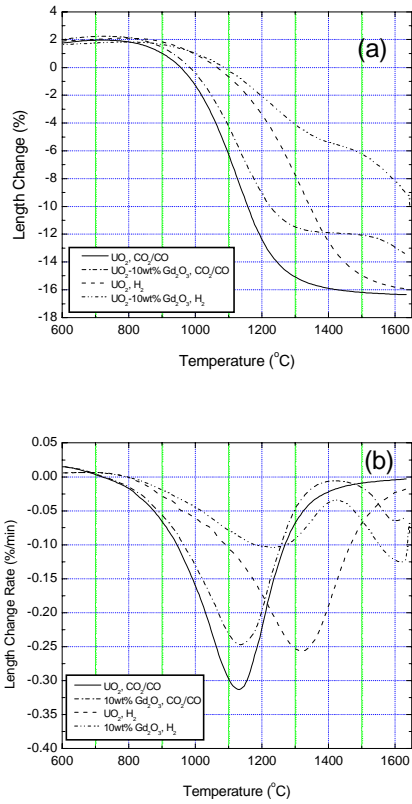
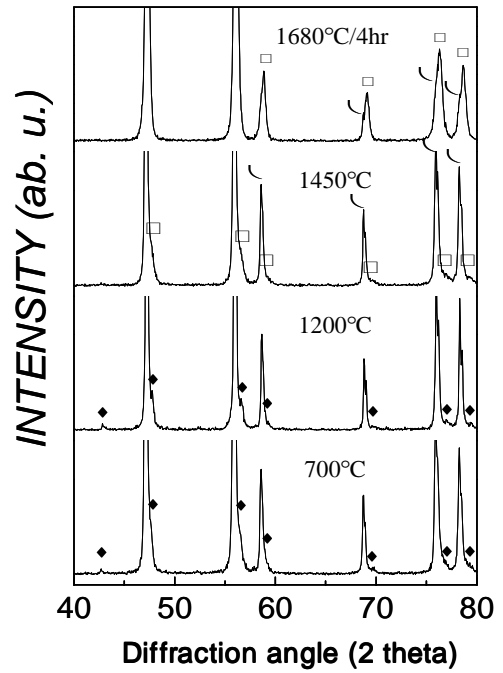


그림 5. 환원성 및 산화성분위기에서
성형체의 치밀화 거동
(a)치밀화 양, (b)치밀화 속도



- near $(U_{0.86}Gd_{0.14})O_2$
- ⌋ UO_2
- ◆ Gd_2O_3
- phase showing reactions
between UO_2 and Gd_2O_3

그림 6. 혼합 UO_2 - Gd_2O_3 성형체의 수소
기체 열처리에서 얻는 반소결체의
X-선 회절 패턴.

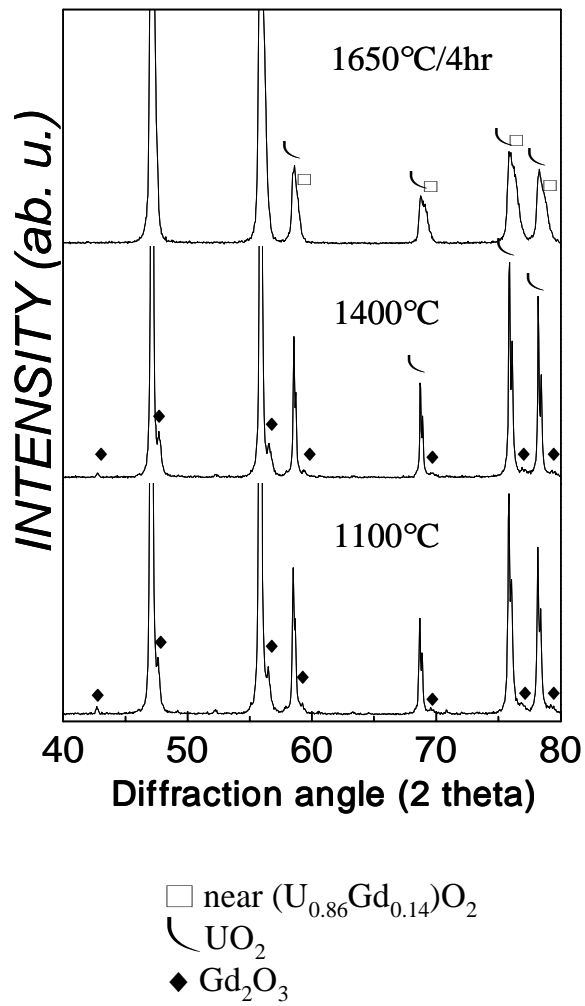


그림 7. 혼합 UO_2 - Gd_2O_3 성형체의 산화성 기체 열처리에서 얻는 반소결체의 X-선 회절 패턴.

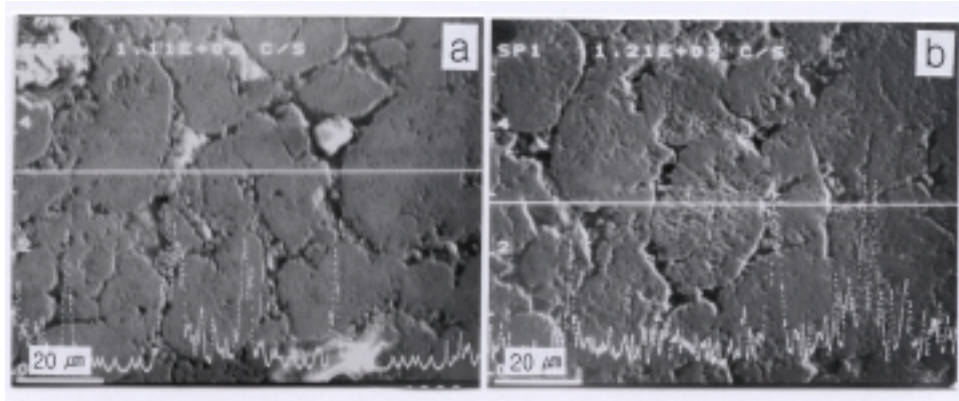


그림 8. $UO_2-Gd_2O_3$ 성형체의 1400°C 열처리에서 얻는 반소결체의 미세조직. (Gd 농도는 흰선을 따라서 측정함)
 (a) 수소기체, (b) 산화성 기체

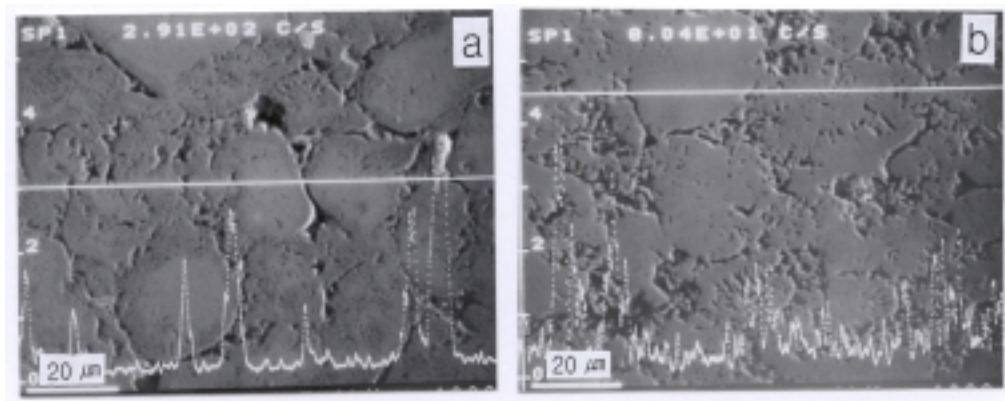


그림 9. $UO_2-Gd_2O_3$ 성형체의 1600°C 열처리에서 얻는 반소결체의 미세조직. (Gd 농도는 흰선을 따라서 측정함)
 (a) 수소기체, (b) 산화성 기체