

PVA-Al(III) 착물 첨가 UO_2 소결체와 AlOOH 첨가 UO_2 소결체의 소결 특성 비교

이신영 · 유호식 · 이승재 · 김형수* · 배기광*

한전원자력연료주식회사

*한국원자력연구소

The Comparison of Sintering Characteristics between the PVA-Al(III) Complex added UO_2 Pellet and AlOOH added UO_2 pellet

Shin-Young Lee, Ho-Sik Yoo, Seung-Jae Lee, Hyung-Soo Kim*, and Ki-Kwang Bae*

KEPCO Nuclear Fuel Co. Ltd., Taejon 305-353

*Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353

(1999년 9월 11일 받음, 1999년 11월 22일 최종수정본 받음)

초 록 UO_2 분말에 PVA-Al(III) 착물과 AlOOH를 각각 0.03~1.0wt%를 첨가하여 소결체를 제조한 후 소결체 특성을 비교하였다. PVA-Al(III) 착물과 AlOOH는 1000°C의 수소분위기에서 열분해하는 경우 생성상은 $\theta-Al_2O_3$ 이었다. 순수 UO_2 분말에 비해 AlOOH가 첨가된 혼합 분말의 겉보기 밀도는 더 높았고, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 혼합 분말은 더 낮은 겉보기 밀도를 보였다. AlOOH가 첨가된 소결체의 경우 약 800°C 부근에서 치밀화가 시작되었지만, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 소결체의 경우에는 약 900°C에서 치밀화가 시작되었다. 기공 크기 분포는 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 경우에 monomodal 형태로, 그리고 PVA-Al(III) 착물의 첨가된 소결체의 경우에는 bimodal 형태로 나타났다. 결정립 크기는 1wt% 첨가시 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 경우에 약 13 μm 이었지만, PVA-Al(III) 착물의 첨가된 소결체의 경우에는 약 36 μm 까지 성장하는 현저한 효과를 확인하였다.

Abstract The sintering characteristics of PVA-Al(III) complex added UO_2 pellet and AlOOH added UO_2 pellet were compared. The major phase of PVA-Al(III) complex and AlOOH decomposed at 1000°C in H_2 atmosphere was $\theta-Al_2O_3$. Compared with the apparent density of pure UO_2 , that of AlOOH added UO_2 powder was higher but that of PVA-Al(III) complex was lower. The densification of AlOOH added UO_2 pellet was initiated at about 800°C, the densification of PVA-Al(III) complex added UO_2 pellet was initiated at about 900°C respectively. In a view of pore size distribution, the PVA-Al(III) complex added UO_2 pellet appeared as monomodal type, whereas the AlOOH added UO_2 pellet appeared as bimodal type. The grain size of AlOOH added UO_2 pellet was about 13 μm but the grain size of PVA-Al(III) complex added UO_2 pellet was increased up to about 36 μm .

Key words : UO_2 pellet, PVA-Al(III) complex, AlOOH, Pore formation, Grain growth

1. 서 론

UO_2 소결체는 핵분열로 인한 방사선 조사 환경에서 안정성을 유지하며, 냉각재인 물과의 화학반응에 대한 내성이 좋으므로 핵연료로서 널리 이용되고 있다. 핵연료는 대개 4~5년 동안 원자로에서 연소되는데, 핵연료의 경제성 향상과 방사성 폐기물인 사용후 핵연료의 단위에너지당 발생량을 감소시키는 측면에서 연소도는 계속 증가되는 추세에 있다.

UO_2 소결체가 원자로 내에서 고온에서 연소되면서 겪게 되는 주요 현상들로는 다음과 같은 현상들이 있다. 첫째로 UO_2 소결체는 이론밀도의 약 95% 정도를 갖기 때문에 원자로 내에서 연소되는 과정에서 고온 및 방사선 조사에 의해 제조 후에 소결체 내에 존재하던 미세 기공들이 소멸하여 밀도가 증가하는 고밀화(densification) 현상을 보인다.

1, 2) 둘째로 부피팽창(swelling) 현상^{3, 4)}으로 UO_2 소결체

내에서 U-235 원자가 핵분열을 하면 다양한 핵분열 생성 물질이 발생하며 이러한 핵분열 생성물질의 축적으로 인해 연소도 10,000MWD/MTU당 약 1.0%의 부피가 증가하게 된다. 셋째로 핵분열기체 방출^{5, 6)}로서 U-235의 핵분열 생성물질 중에서 Xe과 Kr 같은 불활성 기체들이 생성되며 이들 불활성 기체는 열확산 혹은 방사선 조사에 의해 축적된 확산에 의해 소결체 밖으로 방출된다. 확산에 의한 방출 기구를 살펴보면, 불활성 기체 원자는 확산에 의해 결정립계로 이동하여 기포를 형성하는데, 핵연료 연소가 진행됨에 따라 이러한 기포들이 결정립계에서 점차 증가하여 서로 연결되어 통로를 만든 다음 궁극적으로 소결체 밖으로 방출된다.

UO_2 소결체의 기공 직경이 2 μm 이하의 경우에는 고밀화 발생 가능성이 무척 크며 이런 작은 기공들이 핵분열 파편(fission fragment)에 의해 소멸되면서 생성된 공공이 확산하여 결정립계로 이동하는 중에 직경 8 μm 이상의 큰 기

공에 포획되어서 큰 기공의 부피가 증가하게 되며 일부 기공들은 결정립계로 확산된다.^{7,8)} 또한 UO_2 소결체 내의 20~40 μm 기공이 존재하면 핵분열 기체 생성물이 기공에 흡수되어 부피팽창의 억제 및 핵분열 기체 생성물이 소결체 외부로 방출되는 것을 억제시킬 수 있다.⁹⁾

반면에 노내에서 이상적인 결정립 크기는 기체상의 핵분열 생성물의 방출을 감소시키기 위해서는 결정립 크기가 20~40 μm 정도이면 핵분열 기체 생성물의 방출억제에 충분한 효과가 있으며 결정립 크기가 70~80 μm 이상이면 더 이상의 억제 효과는 없다고 보고되었다.¹⁰⁾ 연료의 결정립이 커지면 결정립내에서 생성된 기체상의 핵분열 생성물의 결정립계로의 도달거리가 길게 되어 핵연료 소결체 내에 기체상의 핵분열생성물 방출을 억제시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.^{11,12)}

위와 같이 지금까지의 연구결과들에 따르면 Al계 화합물을 UO_2 분말에 첨가하여 소결체를 제조할 경우, 대부분 조대 결정립을 갖는 UO_2 소결체와 함께 소결체의 개기공도를 감소할 수 있는 유리한 점에 대해 다루어졌으나 열적 안정성과 관련된 기공 크기 분포와의 상관 관계에 대해서는 고찰되지 않았다. Al계 화합물 중 Al_2O_3 , $Al(OH)_3$, $AlOOH$ 와 같은 Al 화합물을 UO_2 분말에 첨가하여 1710 $^{\circ}C$ 에서 3시간 동안 수소분위기에서 소결한 결과, 순수 UO_2 소결체의 결정립 크기가 약 9.2 μm 인 반면, Al계 화합물이 첨가된 UO_2 소결체의 경우에는 12~18 μm 의 결정립 크기를 갖는다고 발표하였다.¹³⁾

따라서 본 실험에서는 소결체의 적절한 기공 크기 분포 및 결정립 크기를 제어하기 위하여 고분자 알루미늄 화합물인 PVA-Al(III) 착물과 무기 화합물인 $AlOOH$ 를 AUC (ammonium uranyl carbonate) 공정으로부터 제조된 UO_2 분말에 첨가하여 H_2 분위기에서 소결한 후, 첨가된 UO_2 소결체의 특성을 비교하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 분말과 첨가제 준비 및 X-선 회절 분석

본 실험을 위해 한전원자력연료(주)의 AUC 재변환공정에 의해 제조된 UO_2 분말을 200 μm 체를 통해 체질한 후 사용하였다. 첨가물질로는 PVA에 Al(III) 이온으로 배위결합시켜 제조한 PVA-Al(III) 착물¹⁴⁾과 Aldrich Chemical사의 $AlOOH$ 를 첨가물질로 선택하여 160 μm 체를 통해 체질한 후에 사용하였다.

체질된 PVA-Al(III) 착물과 $AlOOH$ 를 1000 $^{\circ}C$ 의 수소분위기하에서 열분해시킨 후, 생성 상을 알아보기 위해 X-선 회절기(Rigaku사)를 사용하여 실험하였으며, 이때 사용한 X-선은 40kV, 20mA의 $CuK\alpha$ 로 회절각(2θ)은 20~80 $^{\circ}$ 범위에서 분석하였다.

2.2. 혼합, 성형 및 소결

혼합방법은 UO_2 분말에 0.03~1.0wt% PVA-Al(III) 착물과 0.03~1.0wt% $AlOOH$ 를 각각 첨가한 후 turbular 혼합기를 이용하여 3.5시간 동안 혼합하였다. 주사전자현미경(Hitachi사 S-2350)을 이용하여 혼합분말

의 형태를 관찰하였으며, 313.8MPa의 성형 압력을 가하여 직경 10mm, 길이 11mm의 압분체를 만들었다. 제조된 압분체는 전기 저항로(Centorr사 SM 60)를 이용하여 1750 $^{\circ}C$ 의 H_2 분위기에서 2시간 및 4시간 동안 소결하여 시편을 제조하였다.

2.3. 소결체의 소결거동 분석

순수 UO_2 압분체와 0.05wt% $AlOOH$ 및 0.05wt% PVA-Al(III) 착물이 각각 첨가된 압분체의 소결과정을 알아보기 위해 Dilatometer (Netzsch사 402E)를 이용하여 Al_2O_3 로 된 시편지지대 위에 성형체를 올려 놓고 수소분위기하에서 분당 10 $^{\circ}C$ 의 속도로 승온시키며 시편의 길이 변화를 측정하였다.

2.4. 소결체 기공 및 결정립 크기 분석

UO_2 소결체의 밀도는 부력법에 의해 측정하였으며, 소결체 미세조직을 분석하기 위해 시료를 절단, 마운팅한 후 2~3분 동안 연삭하고 Al_2O_3 연마제를 사용하여 3~5분 동안 연마하여 기공 크기 분포를 관찰하였다. 연마된 시편을 산화성 분위기에서 1300 $^{\circ}C$, 1시간 가열하고 상온으로 냉각시킨 후 결정립 크기를 알아 보았다. 기공 크기 분포 및 결정립 크기는 상분석기(Leco사 3100) 및 광학현미경(Leica사 MEF4M)을 사용하여 각각 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 첨가제의 열분해 후 결정상 및 혼합 특성

첨가물질로 사용될 PVA-Al(III) 착물과 $AlOOH$ 를 1000 $^{\circ}C$ 의 환원성 H_2 분위기하에서 열분해시킨 후의 생성된 상을 비교한 X-선 분석 결과는 Fig. 1과 같다. PVA-Al(III) 착물과 $AlOOH$ 모두 열분해된 후 $\theta-Al_2O_3$ 상이

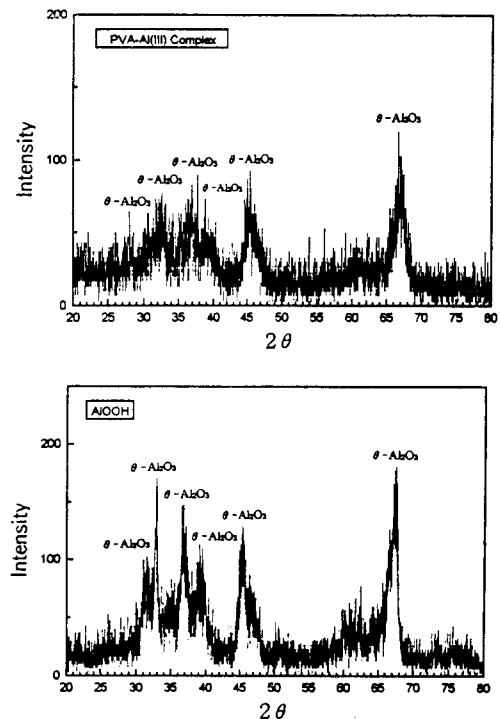


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of PVA-Al(III) complex and $AlOOH$ calcined at 1000 $^{\circ}C$ in H_2 atmosphere.

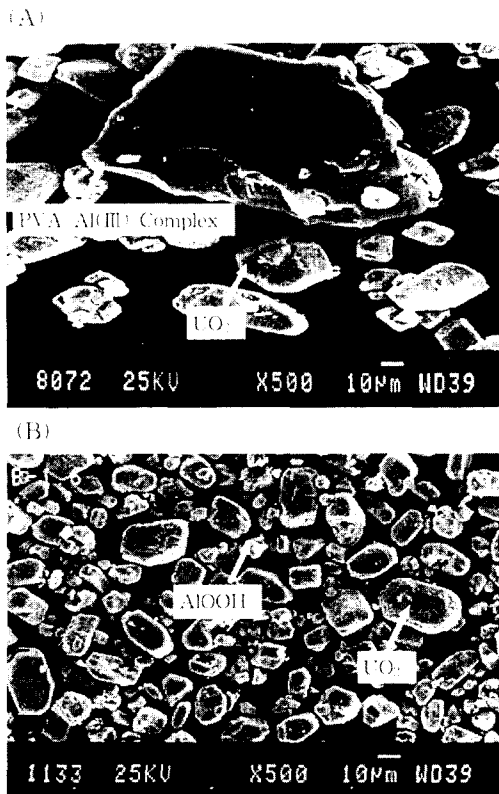


Fig. 2. Scanning electron micrographs of UO_2 powder mixed; PVA-AI(III) complex(A) and AlOOH(B).

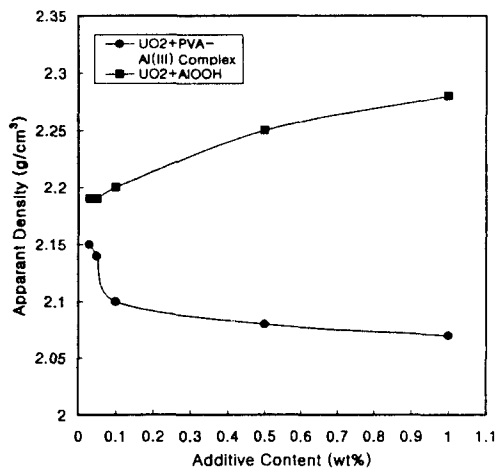


Fig. 3. Variations of apparent density of UO_2 powder mixed with PVA-AI(III) complex and AlOOH.

주된 상으로 나타났으며 AlOOH를 열분해 시킨 후 생성된 $\theta-Al_2O_3$ 의 peak가 PVA-AI(III) 착물이 분해된 후 $\theta-Al_2O_3$ 보다 더 뚜렷하고 peak의 강도도 큰 것으로 보아 AlOOH의 결정상의 전이가 더 빠르게 진행되는 것으로 짐작된다.

PVA-AI(III) 착물과 AlOOH를 각각 UO_2 분말에 첨가한 후 tubular mixer를 이용하여 3.5시간 동안 혼합시킨 UO_2 분말의 형상은 Fig. 2와 같다. 약 $16\mu m$ 의 입자 크기를 갖는 UO_2 분말에 첨가되어 있는 PVA-AI(III) 착물의 형상은 AlOOH가 첨가된 형상에 비해 좀 더 타원형적인 형상

을 보이며 입자 크기는 약 $60\sim 80\mu m$ 임을 알 수 있었다. 따라서 UO_2 분말에 PVA-AI(III) 착물 및 AlOOH가 첨가 시 혼합 UO_2 분말이 압분 및 소결에 미치는 영향에 다르게 나타날 것으로 보여진다.

Fig. 3은 혼합분말의 겉보기 밀도를 나타낸 것으로 AlOOH가 첨가된 혼합 UO_2 분말의 경우 순수 UO_2 분말에 비해 겉보기 밀도가 높은 반면에 PVA-AI(III) 착물이 첨가된 혼합 UO_2 분말의 경우에는 순수 UO_2 분말에 비해 겉보기 밀도가 낮음을 알 수 있었다. 이는 고분자 알루미늄 화합물인 PVA-AI(III) 착물이 무기 알루미늄 화합물인 AlOOH보다 자체 밀도가 낮으며 PVA-AI(III) 착물 형상이 AlOOH 형상 보다 상대적으로 불규칙하고 좁은 분포의 조대한 타원형상을 보여 UO_2 분말 사이에 충전된 확률이 AlOOH보다 적기 때문이라 생각된다.

3-2. 소결거동 관찰

순수 UO_2 분말과 0.05wt% AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체와 0.05wt% PVA-AI(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 소결거동을 살펴보기 위하여 Dilatometer를 이용하여 수소 분위기하에서 온도에 따른 선수축률 [$\Delta L/L$; ΔL : 길이의 변화, L : 초기 성형체의 길이]의 변화와 단위시간 당 따른 길이 변화율 [$d(\Delta L)/dT$]의 변화경향을 분석하였다. 여기에서 선수축률은 시편의 치밀화와 관련이 있으며 온도에 따른 길이 변화율은 시편의 소결속도를 나타낸다. 이의 관계를 살펴보기 위해 Fig. 4에 순수 UO_2 분말과 AlOOH 및 PVA-AI(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 온도에 따른 선수축율 변화를 나타내었다. 수축이 시작되는 온도는 순수 UO_2 는 약 $750^\circ C$, AlOOH이 첨가된 UO_2 소결체의 경우에는 $800^\circ C$ 를 나타내었으나 PVA-AI(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체는 약 $900^\circ C$ 부근에서 소결이 시작되는 것으로 나타났고 전체적으로 소결이 늦게 일어남을 알 수 있었다.

한편 Fig. 4에 나타난 선수축율의 온도에서 단위시간당 변화율을 측정하여 수축률의 속도인 소결속도를 Fig. 5에

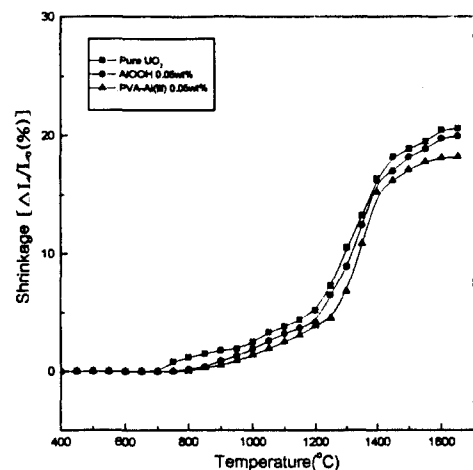


Fig. 4. Linear shrinkage changes on the pure UO_2 pellets, AlOOH added UO_2 pellets and PVA-AI(III) complex added UO_2 pellets.

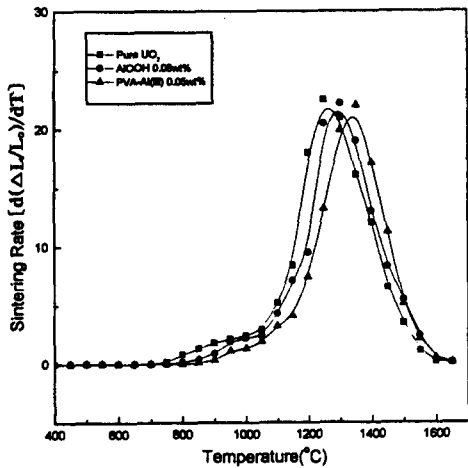


Fig. 5. Shrinkage rate changes on the pure UO_2 pellets, AIOOH added UO_2 pellets and PVA-Al(III) complex added UO_2 pellets.

나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순수 UO_2 소결체와 AIOOH 첨가 UO_2 소결체의 경우에는 각각 750°C 및 800°C에서 소결이 진행되어 1150~1300°C 및 1200~1350°C에서 PVA-Al(III) 착물 첨가 UO_2 소결체의 경우에는 약 900°C 부근에서 진행되어 1250~1400°C에서 소결이 활발하게 진행됨을 알 수 있었다.

이와 같이 순수 UO_2 분말 및 AIOOH가 첨가된 UO_2 소결체 경우에 비해 소결시점이 약 100°C 지연된 것은 PVA-Al(III) 착물의 사슬을 열분해 시키는 데에 따른 소결지연으로 소결이 더 늦게 진행된 것으로 보여진다.

3-3. 첨가량에 따른 UO_2 소결체 특성

Fig. 6에서 보는 바와 같이 첨가제가 첨가되지 않은 순수 UO_2 소결체의 경우에 소결밀도는 10.72g/cm³의 값을 나타내었지만 PVA-Al(III) 착물과 AIOOH가 첨가된 소결체의 경우에는 첨가량이 증가할수록 소결밀도는 감소되었다. 또한 AIOOH가 첨가된 소결체 보다 PVA-Al(III) 착물이 첨가된 소결체의 소결밀도 감소량이 더 컸으며 1wt% AIOOH, PVA-Al(III) 착물을 첨가된 소결체의 소결밀도 값은 각각 10.50g/cm³, 10.36g/cm³이었다.

Fig. 7과 Fig. 8에는 순수한 UO_2 소결체와 AIOOH가 첨가된 UO_2 소결체 및 PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 첨가량에 따른 기공 크기 분포를 나타냈다. 순수 UO_2 분말 및 AIOOH가 첨가된 소결체의 경우에는 2~4 μ m 크기의 기공이 주로 나타나는 monomodal 형태의 기공 크기 분포를 나타낸 반면에, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 경우에는 2~4 μ m 크기의 기공과 15~30 μ m 크기의 기공이 나타나는 bimodal 형태의 분포를 나타내었다. AIOOH 첨가량은 소결체의 기공 크기 변화에 거의 영향을 미치지 않았으나 PVA-Al(III) 착물을 첨가한 소결체의 경우 PVA-Al(III) 착물 첨가량이 증가할수록 15~30 μ m 사이의 기공 분율이 증가한 것을 관찰 할 수 있었는데 이는 PVA-Al(III) 착물 중 열분해 되는 PVA 양과 크기에 기인된다.¹⁴⁾

순수 UO_2 소결체와 AIOOH가 첨가된 UO_2 소결체 및 PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 결정립 크기는

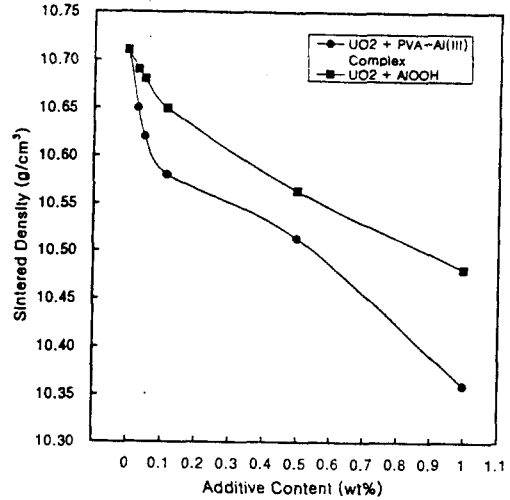


Fig. 6. Additives content versus sintered density of UO_2 pellets sintered at 1750°C for 4h in H_2 atmosphere.

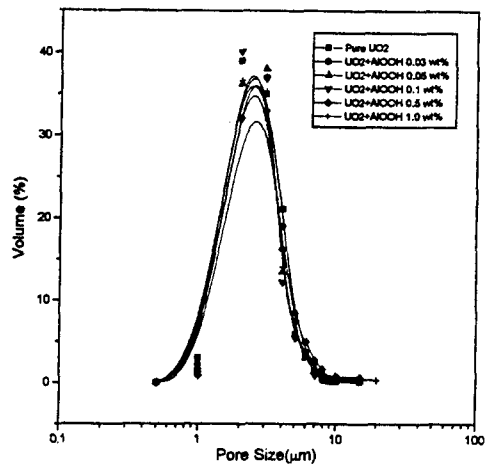


Fig. 7. Pore size distribution of AIOOH added UO_2 pellets sintered at 1750°C for 4h in H_2 atmosphere.

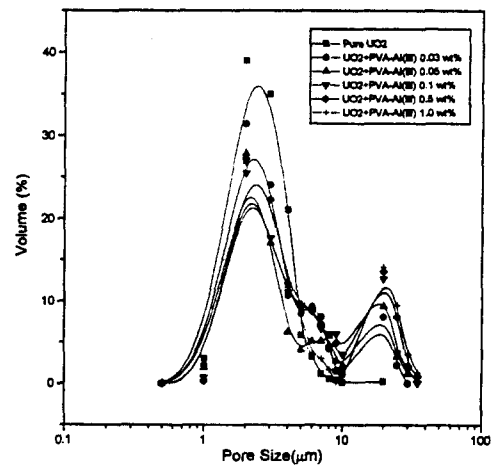


Fig. 8. Pore size distribution of PVA-Al(III) complex added UO_2 pellets sintered at 1750°C for 4h in H_2 atmosphere.

Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 첨가제가 첨가되지 않은 UO_2 소결체의 경우에는 결정립 크기가 약 7 μ m였고 AIOOH 및 PVA-Al(III) 착물의 첨가량이 증가함에 따라

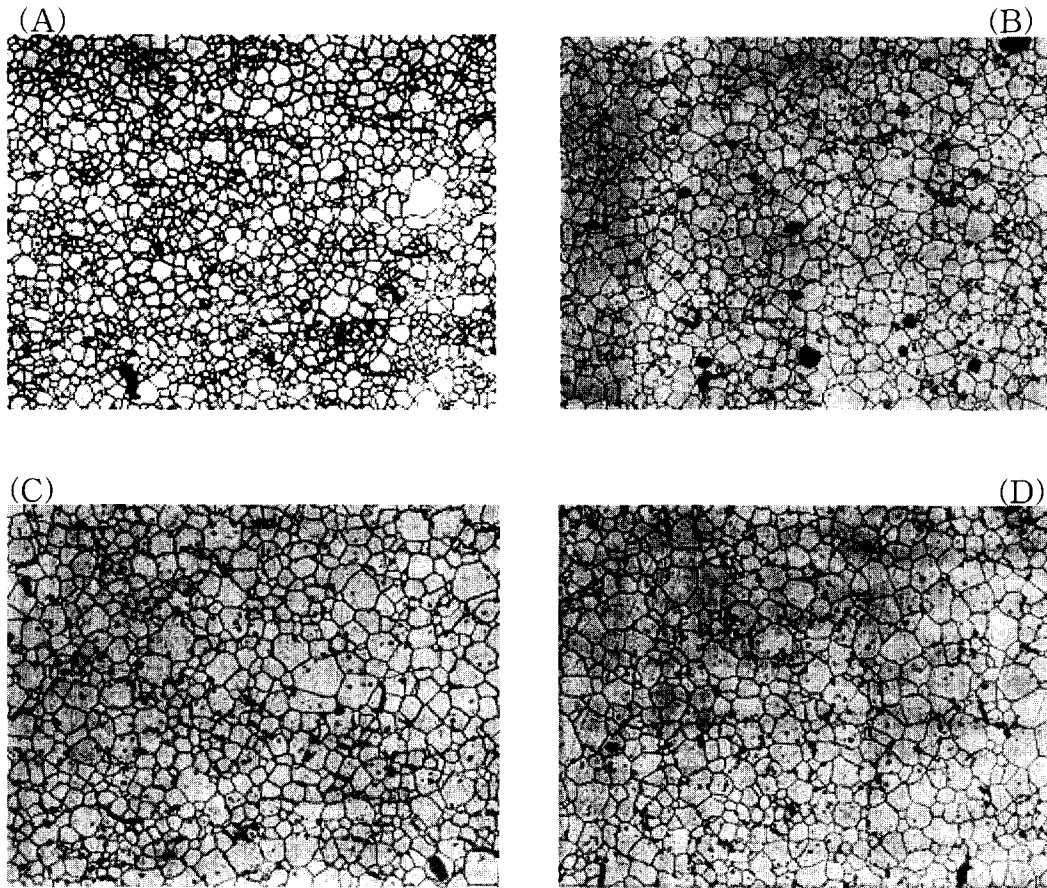


Fig. 9. Micrographs of polished surface of AlOOH added UO_2 pellets sintered at $1750^\circ C$ for 4h in H_2 atmosphere ; (A) pure UO_2 ($\times 200$), (B) 0.03wt%($\times 200$), (C) 0.1wt%($\times 200$) and (D) 0.5wt%($\times 200$).

결정립 크기가 증가함을 알 수 있었다. AlOOH와 PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 결정립 크기를 비교해 보면, AlOOH가 첨가된 소결체의 경우에 0.5wt%에서 약 $13\mu m$ 까지 결정립이 성장하였고 그 이상에서는 큰 변화가 없었으나, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 소결체의 경우에는 0.1wt%에서 약 $36\mu m$ 까지 결정립이 성장하였고 그 이상에서는 변화가 없음을 알 수 있었는데 이는 Al_2O_3 을 고용할 수 있는 한계가 있다는 것을 추론할 수 있다.

이와 같이 PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 기공 크기 및 결정립 크기가 AlOOH가 첨가된 소결체에 비해 더욱 커진 것을 살펴보기 위해 Fig. 11에 $1750^\circ C$ 수소분위기하에서 2시간 동안 소결한 PVA-Al(III) 착물과 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 미세조직을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 경우에는 일부 미세 기공들이 결정립계 내부에 존재함을 확인할 수 있는 반면에, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 경우에는 조대 기공들이 결정립계에 존재함을 알 수 있었다.

따라서 기공 크기 관점에서는 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 경우에는 대부분 미세 기공으로 이루어져 있으므로 기공 주변의 공공의 농도차가 적음으로 기공 성장 현상이 어려울 것으로 판단된다. PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 경우 결정립 내에 존재하던 미세 기공 주변

의 공공 농도와 결정립계에 존재하는 조대 기공 주변의 공공 농도차가 크므로 미세 기공 주변의 높은 공공이 조대 기공 주변의 낮은 공공으로 확산을 가져오게 되므로 조대 기공은 계속 성장하여 결정립 내의 미세 기공들은 계속 소멸될 것으로 판단된다.

결정립 성장 크기 관점에서는 UO_2 분말에 첨가된 AlOOH와 PVA-Al(III) 착물의 입자 크기와 관련되어 AlOOH가 첨가된 소결체의 경우 AlOOH가 열분해된 후 결정립 내의 미세 기공 주변에 Al_2O_3 가 존재하므로 체적 확산에 의해 결정립 성장이 이루어지나, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 경우에는 결정립계나 모서리 부분의 조대 기공 주변에 Al_2O_3 가 존재하게 되므로 표면확산에 의한 결정립 성장이 우선하게 이루어지므로 착물이 첨가된 소결체의 경우가 결정립이 더 크게 증가되었을 것으로 판단된다.¹⁵⁾

4. 결 론

본 연구에서는 노내에서 안정한 UO_2 소결체를 제조하기 위해 고분자 알루미늄 화합물인 PVA-Al(III) 착물과 무기 알루미늄 화합물인 AlOOH를 UO_2 분말에 혼합하여 수소분위기하에서의 소결체를 제조한 후, 소결특성을 비교하여 본 바, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PVA-Al(III) 착물과 AlOOH를 $1000^\circ C$ 의 환원성

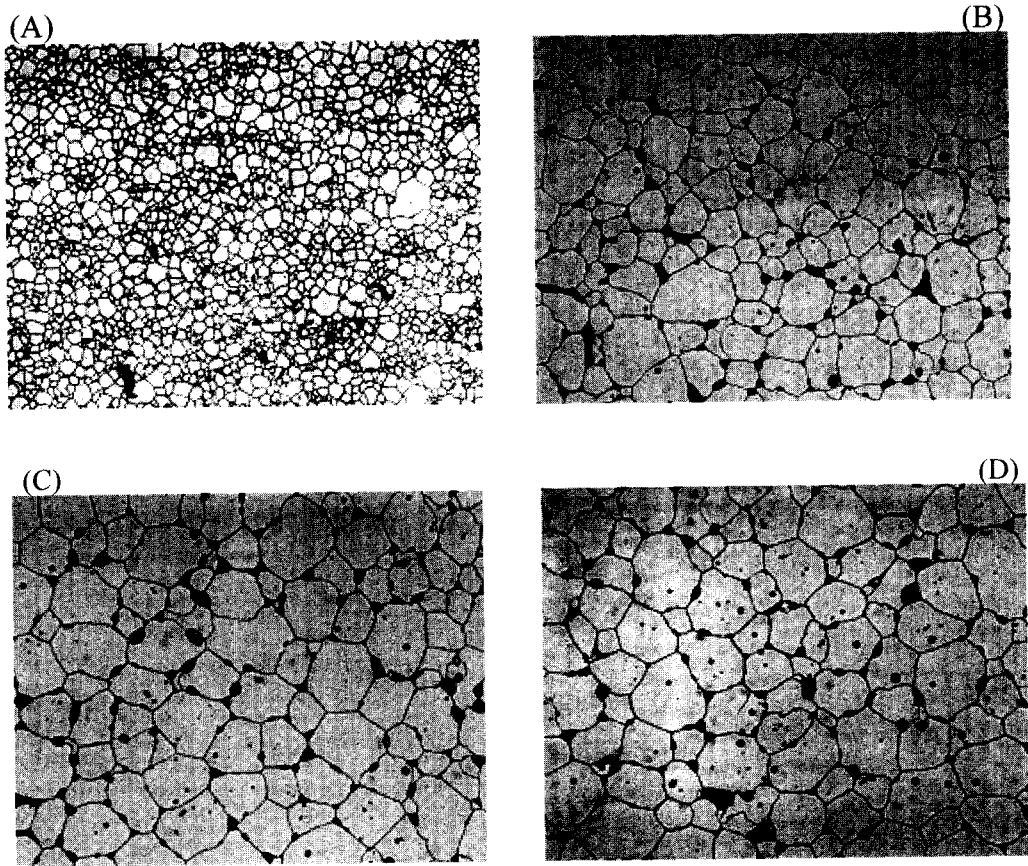


Fig. 10. Micrographs of polished surface of PVA-Al(III) complex added UO_2 pellets sintered at $1750^\circ C$ for 4h in H_2 atmosphere ; (A) pure UO_2 ($\times 200$), (B) 0.03wt% ($\times 200$), (C) 0.1wt% ($\times 200$) and (D) 0.5wt% ($\times 200$).

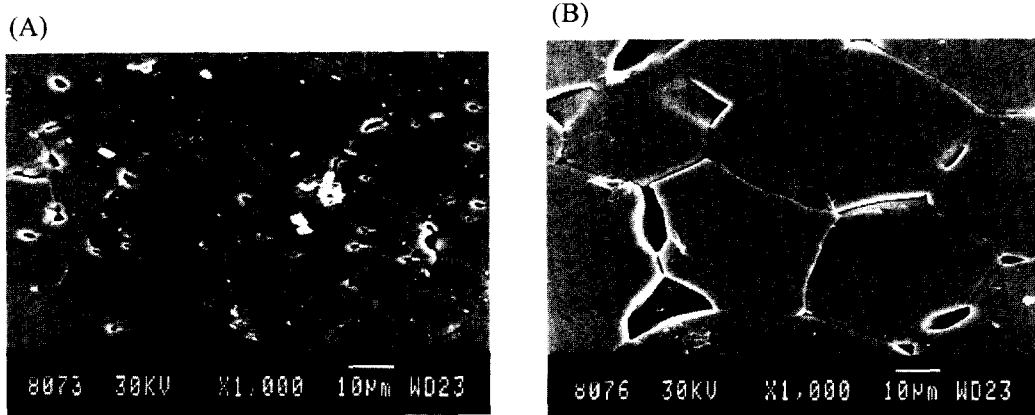


Fig. 11. Micrographs of UO_2 pellets sintered at $1750^\circ C$ for 2h in H_2 ; (A) AlOOH added, (B) PVA-Al(III) complex added.

H_2 분위기에서 열분해시킨 후의 생성된 상은 $\theta-Al_2O_3$ 으로 나타났고 순수 UO_2 분말에 비해 AlOOH가 첨가된 혼합 분말은 겔보기 밀도가 높은 반면에 착물이 첨가된 소결체의 혼합 분말의 경우에는 더 낮음을 알 수 있었다.

2) PVA-Al(III) 착물이 첨가된 UO_2 소결체의 경우가 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 경우에 비해 소결시점이 약 $100^\circ C$ 지연되었는데 이는 PVA-Al(III) 착물의 사슬을 열분해 시키는 데에 따른 소결지연으로 소결이 더 늦게 진행된 것으로 보여진다.

3) 순수 UO_2 소결체와 AlOOH가 첨가된 UO_2 소결체의 기공 크기 분포는 monomodal 곡선을 나타낸 반면에 PVA-Al(III) 착물이 첨가된 소결체는 bimodal 곡선을 나타내었다. 이는 PVA-Al(III) 착물 중 PVA의 사슬이 열분해 되면서 큰 기공을 형성하였기 때문이다.

4) $1750^\circ C$ 에서 4시간 소결한 결과, 순수 UO_2 소결체의 경우 결정립 크기는 약 $7\mu m$ 이고 AlOOH가 첨가된 소결체의 경우 약 $13\mu m$ 까지 증가되었지만, PVA-Al(III) 착물이 첨가된 소결체의 경우에는 약 $36\mu m$ 까지 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 과학기술부의 원자력 연구개발 사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. G. Maler, H. Assmann and W. DoRR, *J. Nucl. Mater.*, **153**, 213-220 (1988).
2. H. Assmann and H. Stehle, *Nucl. Eng. & Des.*, **48**, 49 (1978).
3. H. Assmann and R. Manzel, *J. Nucl. Mater.*, **68**, 360-364 (1977).
4. A.J.E. Foreman and M.J. Makin, *J. Nucl. Mater.*, **79**, 43-57 (1979).
5. W. Hering, *J. Nucl. Mater.*, **114**, 41-49 (1983).
6. J. A. Turnbull, *J. Nucl. Mater.*, **50**, 62-68 (1974).
7. J. E. Littlechild and G. G. Butler, *IAEA-SR-7/23*, 207-221 (1976).
8. W. Chubb, A. C. Hott, B. M. Argall and G. R. Klip, *Nucl. Tech.*, **26**, 486-495 (1975).
9. J. E. Littlechild and L. F. Raven, *Nucle. Eng. Inter.*, 44-47 (1982).
10. J. B. Ainscough, L. F. A. Raven and P. T. Sawbridge, *IAEA-SM 33/16* (1987).
11. P. T. Swabridge, C. Baker, R. M. Cornell, K. W. Jones and D. Reed, *J. Nucl. Mater.*, **95**, 119-128 (1980).
12. J. R. Matthews and M. W. Wood, *J. Nucl. Mater.*, **84**, 125-136 (1979).
13. 장인순외, *KAERI/RR-908/89*, 과학기술처, 213-259 (1990).
14. 이신영, 김형수 및 노재성, *요업학회지*, **35**(8), 783-790 (1998).
15. 이신영, 김형수 및 노재성, *요업학회지*, **36**(8), 783-790 (1999).