

사용후 핵연료의 결정립크기별 고온가열시험 특성

김대호, 양용식, 방제건, 김선기, 임익성, 송근우, 권형문
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
 kdh@kaeri.re.kr

1. 서론

핵연료의 고연소도와 추세는 출력증강과 함께 발전소의 경제성 향상을 위한 대안으로 다양한 연구개발이 진행되고 있다. 국내에서도 고연소도 핵연료의 대안으로 큰결정립 UO_2 소결체의 경수로 원전 적용을 위한 연구개발이 진행되고 있다. 본 실험에 사용된 소결체는 표 1.과 같이 UO_2 분말에 U_3O_8 분말과 종자를 함께 이용하여 결정립을 성장시키는 기술이 적용되었으며, 인위적으로 장기간의 가열시간을 조절하여 결정립을 성장시켰다. 핵연료의 고연소도에 따른 핵분열기체의 방출억제능력을 확보하기 위해 $8\mu m$ 의 표준 결정립크기와 상용시방으로 제조된 $15\mu m$ 결정립 및 소결시간의 조절을 통해 제조된 $23\mu m$ 크기의 결정립 소결체를 제조하여 하나로 OR 조사공에서 33,600 MWd/MTU까지 조사시켜 가열시험을 실시하였다. 본 시험을 통하여 결정립크기에 따라 연소중 겪을 수 있는 과도상태에서의 온도별 핵분열기체 방출량을 평가하여 결정립크기에 따른 안전성 평가를 실시하였다. 가열시험은 한국원자력연구원 PIEF시설에 설치된 조사후 핵연료 가열장비(Post-Irradiation Annealing Apparatus)를 이용하여 실시하였으며, 3종의 결정립 크기에 따라 외곽부, 중간부 및 중심부로 구분하여 동일한 가열조건에서 방출된 핵분열기체 Kr-85의 양을 실시간 측정하였고 SEM을 통하여 미세조직의 변화를 관찰하였다. 가열시험의 결과는 핵연료의 과도상태에서의 안전성평가에 중요한 실험자료이며, 원전에서 인출후 장기 건식저장 등의 사용후핵연료 관리에도 활용될 수 있다.

2. 실험및결과

본 시험에 사용된 시편은 표 1.과 같이 $8\mu m$, $15\mu m$ 및 $23\mu m$ 으로 연료제조업체의 상용 시방에 맞게 제조되었고 상용등급의 품질보증 및 시료분석이 시행되었으며 그림 1.은 제조후 미세조직을 보여주고 있다. 3종의 시편은 하나로 OR-4 조사공에서 601일의 유효연소기간을 거쳐 3개의 붕평균 33,600 MWd/MTU의 연소결과를 보였으며, 한국원자력연구원 PIEF에서 일련의 조사후 시험이 시행되었다. 각 가열시편은 그림 2.와 같이 외곽부, 중간부 및 중심부로 150 mg 정도 절취되어 사각의 고품체로 고온 가열시험이 진행되었다.

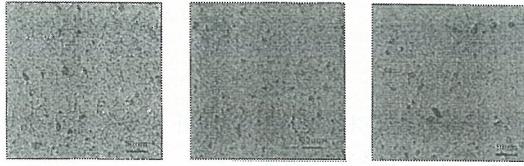
표 1. 고연소도용 큰결정립 UO_2 소결체 제조방법 및 구성

구 분	분말 조성	결정립크기	제조방법
시험연료봉 # 1	$88^{w/o} UO_2$ powder + $12^{w/o} U_3O_8$ powder	$8\mu m$	상용시방
시험연료봉 # 2	$88^{w/o} UO_2$ powder + $7^{w/o} U_3O_8$ powder + Additive $5^{w/o} U_3O_8$ seed	$15\mu m$	Commercial Specification
시험연료봉 # 3	$88^{w/o} UO_2$ powder + $7^{w/o} U_3O_8$ powder + Additive $5^{w/o} U_3O_8$ seed	$23\mu m$	Annealing for 46hr

시험방법은 3종의 큰결정립 사용후 소결체의 외곽부, 중간부 및 중심부위를 각각 150 mg 의 고품체로 절단하여 핫셀 내에 있는 Loop 타입의 사용후 핵연료 가열시험장비(PIA)를 이용하여 헬륨 200 ml/min의 불활성기체분위기에서 분당 $10^\circ C$ 씩 $1700^\circ C$ 까지 상승시킨 후 분당 $20^\circ C$ 씩 $1000^\circ C$ 까지 하강시키며 온도별 핵분열기체 Kr-85를 측정하였다. 3종의 부위별 시편은 동일조건에서 고온 가열되었으며, 실시간 Beta Counter와 Gamma Counter로 측정되었다. 측정 후 전자주사현미경을 통하여 미세조직의 변화를 관찰하였다.

시험결과 $8\mu m$, $15\mu m$ 및 $23\mu m$ 에서 방출된 핵분열기체 Kr-85는 그림 3.과 같은 결과를 보였다. 외곽부에서의 핵분열기체 방출은 결정립 크기에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있으나 중간부와 중심부의 경우 결정립성장 등의 이유로 유사한 방출거동을 보인다. 특히 외곽부의 경우 결정립경계와 기지 내에서의

핵분열기체는 순차적인 방출거동을 보이는 반면 중간부와 중심부의 경우 결정립경계와 기지의 구분이 뚜렷하지 않다. 고온상태의 사고시 방출되는 핵분열기체의 경우는 결정립이 큰 경우 순간적인 방출량이 큰 것으로 나타났다. 그림 4.는 미세조직관찰 사진이다.



a) 8 μ m b) 15 μ m c) 23 μ m

그림 1. 조사전 큰결정립 UO₂ 소결체 미세조직 시편절취부위

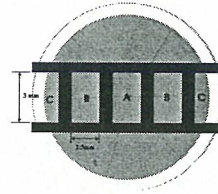
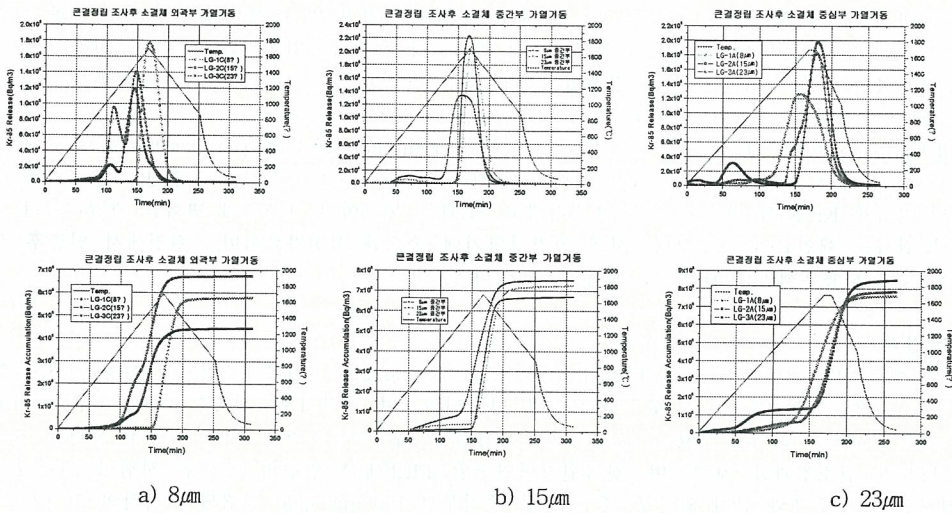
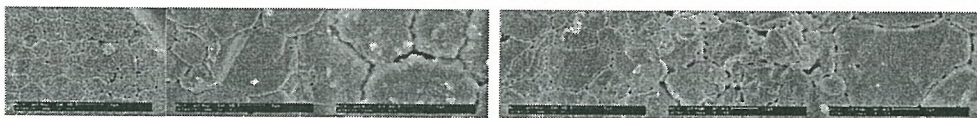


그림 2. 조사후 큰결정립 소결체



a) 8 μ m b) 15 μ m c) 23 μ m

그림 3. 조사후 큰결정립 UO₂ 소결체의 1700 $^{\circ}$ C 고온가열시 Kr-85 방출거동



a) 외곽부 b) 중간부

그림 4. 조사후 큰결정립 UO₂ 소결체의 고온가열시험후 미세조직

3. 결론

핵연료의 연소과정에서 핵분열기체 방출은 소결체의 기지 내에서 경계로 이동하여 방출되는 것이 일련의 과정으로 이의 실험적 평가는 고연소도핵연료의 개발과정에서 확인되어야 하며, 특히 장기간의 연소에 따른 핵분열기체의 정량적 평가는 봉내압 등의 핵연료 안전성평가에 직접적인 영향을 미치게 된다. 고연소도용 큰결정립 UO₂ 소결체의 고온가열시험을 통하여 핵분열기체 Kr-85의 방출거동을 결정립의 크기와 부위 및 온도에 따라 비교분석하였다. 외곽부의 경우 결정립 크기와 온도에 따라 서로 다른 핵분열기체 방출거동을 보였으며, 중심부와 중간부의 경우 결정립크기와 무관하게 유사한 핵분열기체 방출거동을 보였다. 본 자료를 이용하여 핵분열기체의 온도 및 시간에 따른 방출모델을 수립하여 핵연료 안전성 평가에 활용할 계획이다.