

고연소도용 큰결정립 UO₂ 소결체 1차 조사후 시험분석

김대호, 방재건, 양용식, 김선기, 송근우, 유병옥, 서항석
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
kdh@kaeri.re.kr

경수로(PWR) 원전의 경제성향상을 위해 핵연료의 고연소도화가 추세이며, 고연소도에 따른 연소특성 확인을 위한 다양한 형태의 시험이 수행되고 있다. 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 개발된 고연소도용 큰결정립 UO₂ 소결체가 연구로인 하나로에서 1차 조사시험이 종료되어 조사후 시험이 수행되었다. 큰결정립 소결체가 고연소도 핵연료에 적용되는 이유는 고연소도에서 핵분열기체의 방출을 억제하고 이로 인한 봉내압의 저감을 통해 핵연료의 안전성을 확보하는데 있다. 하나로 OR 조사공에서 2002년 7월부터 2005년 6월까지 36개월간의 1단계 조사시험이 완료되었다. 본 조사시험은 70,000 MWd/MTU까지 연소시켜 고연소도 핵연료의 특성분석에 이용될 예정이며, 2단계에 걸쳐 대략 60개월의 조사시험이 수행될 계획이다.

- 시험연료봉의 특성

1단계 조사시험 종료와 함께 방출된 시험연료봉 3개에 대하여 조사후 시험이 수행되었다. 인출된 시험연료봉의 소결체 특성은 표 1과 같으며, 3개 연료봉의 평균 연소도는 33.6 MWd/kgU.rod이다. 이때 유효연소일은 601.02 일이며, 평균 선출력은 315.5 W/cm로 확인되었다. 연소조건이 상용로를 모사하기 위해 0.3mm 두께의 하프늄 튜브를 이용하여 출력제어에 사용하였으며, EFPD 420일 경에 하나로가 30MW 전출력 운전을 실시하였다.

표 1. 연료봉 3개에 장입된 소결체 특성

Parameter	Description	Grain size	Amounts(Pellet)
Test rod 1	STD Commercial Pellet	8 μ m	Upper/Lower each 5ea
Test rod 2	Large Grain Pellet	15 μ m	"
Test rod 3	Annealed Pellet	23 μ m	"

- 조사후 시험

3개의 연료봉은 한국원자력연구원 IMEF에서 해체되고, PIEF에서 연소도측정을 위한 측방향 감마스캔, 산화층 확인을 위한 ECT 등의 비파괴시험과 핵분열기체량 측정과 밀도 및 OM 등의 조사후 시험이 수행되었다. 감마스캔은 측방향과 반경방향으로 수행하여 Cs과 Ru의 측정하였다. 그림 1.은 시험연료봉 3개의 반경방향에 대한 Cs과 Ru의 감마측정결과이다. 시험연료봉 3개에 대한 조사전 밀도는 각각 10.5, 10.52 및 10.51 g/cm³이었으나 조사후 밀도측정결과 각각 1.57%, 0.49% 및 2.5%의 밀도감소를 확인하였다. 그림 2.는 3번 시험연료봉의 산화층을 측정한 결과이다. 시험연료봉 3개에 대한 산화층 측정 결과 모두 15 μ m 이하로 확인 되었으며, 이는 상용로보다 낮은 결과로 하나로 운전조건상 상대적으로 낮은 냉각수온도로 인한 결과이다. 표 2.는 시험연료봉 3개에 대한 핵분열기체의 방출량을 측정한 결과이다. 측정결과 고연소도에 대한 핵분열기체의 방출 억제 능력을 확인하기는 곤란하나, 중간연소도에서의 FGR 억제 경향은 시험결과로 확인할 수 있었다. 결정립 크기에 따른 핵분열기체의 생성 및 방출거동은 SEM과 WDS를 통하여 상세한 분석이 이루어질 예정이다. OM관찰을 통해 큰결정립 UO₂ 소결체의 결정립 크기변화 및 기공분포 변화를 확인하였다. 그림 3.은 3개의 시험연료봉에 대한 거시단면 사진이다. 소결체 외곽으로 아주작고 명확한 기포가 분포한 것처럼 보이는 것은 서로다른 결정립크기의 분포 때문으로 판단되며, 마치 rim이 형성된 것처럼 보인다. 이는 선출력이 높고 매우 낮은 냉각수의 온도에서 연소된 운전조건을 이유로 설명할 수 있을 것 같다. 현재 3개 시험연료봉의 평균연소도는

rim이 형성되기에는 너무 낮다. 하지만 낮은 핵연료온도에서 rim이 형성될 수도 있다. 이는 SEM과 WDS를 통해 상세한 미세조직 관찰과 separate effect 시험을 통해 확인될 예정이다.

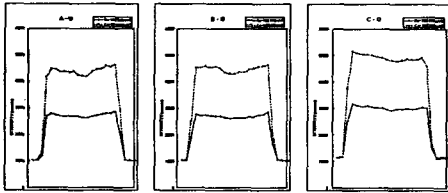


그림 1. Cs & Ru 반경방향 감마스캔 결과

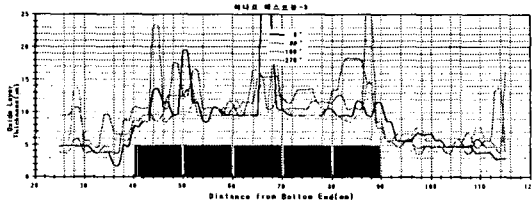


그림 2. 3번 시험연료봉의 산화층 두께 측정결과

표 2. 시험연료봉 3개에 대한 핵분열기체 방출량 화학분석 결과

Parameter	FG Pressure (mbar)	Volume %				
		Kr	Xe	O ₂	Ar	He
Test rod 1	180	0.96	6.35	1.18	0.09	88.10
Test rod 2	184	0.73	4.67	1.05	0.04	90.36
Test rod 3	189	0.32	1.74	1.08	0.06	89.23

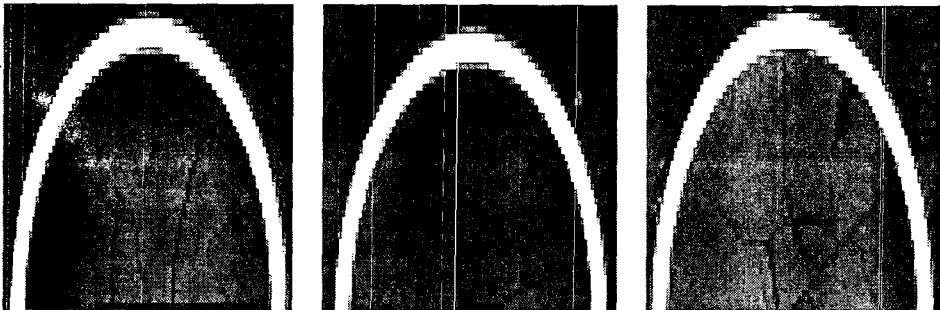


그림 3. 조사된 시험연료봉의 거시단면 사진

- 결론 및 향후 계획

국산 고연소도 경수로용 UO₂ 소결체로 개발된 큰결정립 UO₂ 소결체의 하나로 1단계 조사 시험이 완료되어 한국원자력연구원 PIEF에서 파괴 및 비파괴 조사후 시험이 수행되었다. 1단계 조사시험이 완료된 3개 시험연료봉의 평균연소도는 33.6 MWd/kgU.rod (EFPD : 601.02 day)이었으며, 평균 LHGR은 315.5 W/cm 이다. 조사후 시험으로 축방향 및 반경방향의 감마스캔과 산화층 두께 측정을 위한 ECT 등의 비파괴시험이 수행되었으며, 핵분열기체포집 및 방출량 화학분석, 밀도 측정 및 거시조직사진(OM) 분석 등의 파괴 시험이 수행되었다. 이후 보다 상세한 조사후 시험이 진행될 예정이며 SEM 및 WDS를 통한 미세조직 및 성분 분석등이 수행될 예정이며, 사용된 피복관의 기계적 특성시험도 진행될 예정이다. 현재까지의 조사후 시험결과 하나로에서 연소된 큰결정립 UO₂ 소결체는 건전한 상태로 안정된 조사시험이 진행되고 있는 것으로 판단된다. 현재 2단계 조사시험이 종료되어 목표연소도인 70 MWd/ kgU.rod까지 도달하면 큰결정립 UO₂ 소결체의 우수성을 입증할 수 있을 것으로 판단된다.