

고연소도용 UO₂ 핵연료 70,000 MWd/MTU 연구로 조사시험 고찰

김대호, 방계건, 양용식, 김효찬, 김선기, 김종현, 서철교
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111
kdh@kaeri.re.kr

1. 서론

OECD/NEA 등의 국제원자력 유관조직들은 경수로 원전의 경제성 확보를 위해 핵연료의 농축도, 주기기술, 설계관리 및 유관 기술연구 등의 논의를 진행하고 있다. 국내에서도 국제적인 연구개발 추세에 따라 고연소도 및 고성능의 핵연료 원천기술 확보차원에서 한국원자력연구원을 중심으로 고연소도용 핵연료의 연구가 진행 중에 있으며, 실제 하나로를 이용한 목표연소도 70,000 MWd/MTU까지의 조사시험이 완료되었다. 본 연구는 경수로원전의 고연소도용 핵연료 연구의 일환으로 개발된 큰결정립 UO₂ 소결체의 연소거동을 확인하기 위해 하나로 OR 조사공에서 2002년 7월부터 2011년 6월까지 1~2단계에 걸쳐 9년간의 하나로 조사시험을 완료하였다. 본 조사시험은 목표연소도 70,000 MWd/MTU까지 조사시키기 위하여 가능한 상용의 출력조건과 유사하게 제어하는 다양한 조사시험기술이 적용되었으며 하나로 최장의 조사시험을 완성하였다.

1단계 조사기간 중에는 핵설계를 통해 하프늄을 이용한 하나로노심 조건에서의 출력제어를 실시하였으며, 2단계 조사시험을 위해서는 IMEF 핫셀에서 무계장리그의 해체조립을 통해 1단계 조사시험에 사용되었던 연료봉을 새로운 무계장리그에 재장전하는 원격 manipulator 조작기술을 이용하여 연속적인 조사시험기술을 적용하였다.

현재 조사후시험을 위한 하나로 저장조에서 14개월의 냉각과정을 거쳐 조사시험 리그의 해체를 위해 IMEF로 이송되어 있다. 이후 한국원자력연구원 IMEF와 PIEF에서 일련의 비파괴 및 파괴조사후시험을 실시할 계획이다.

2. 본론

2.1 조사시험 시편 및 시험연료봉 제조

본 연구에 사용된 큰결정립 UO₂ 소결체는 고연소도에 따른 핵분열 기체의 방출을 억제하는 기능을 하게 된다. 큰결정립 UO₂ 소결체 제조방법으로는 소결체 제조시 발생하는 불량 UO₂ Scrap

을 산화처리하여 제조한 U₃O₈ seed를 정상 소결체 제조시 첨가제로 활용하여 1730℃, 수소분위기에서 4시간 소결을 통해 결정립 크기를 제어하는 기술이다. 또 다른 방법으로 UO₂ Powder에 알루미늄 등의 첨가제를 불순물 제한치 이내로 첨가하여 제조하는 기술을 적용하였다. 조사시험에 사용된 시편의 결정립 크기는 8μm(비교시편), 15μm 및 23μm이며, 소결체 제조는 상용스펙을 적용하여 제조되었다. 표 1.은 70,000 MWd/MTU에 도달한 소결 시편의 제조특성이다.

Table 1. Characteristic of Pellet Specimen.

결정립 크기 (μm)	평균 밀도 (TD%)	재소결 밀도 (TD%)	UO ₂ (w/o)	U ₃ O ₈ (w/o)	Grind Sludge (w/o)	비 고
8	95.8	0.69	88 w/o (DC)	12 w/o	-	KNFC 상용
15	96.0	0.33	88 w/o (DC)	7 w/o	5 w/o	DC
23	95.9	0.06	88 w/o (DC)	7 w/o	5 w/o	DC Annealed (46Hr)

시험연료봉은 그림 1.과 같이 상용원전에 사용된 핵연료의 제작시방과 동일하게 제작되어 조사시험이 진행되었다.

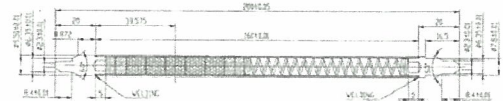


Fig. 1. Schematic drawing of irradiated fuel rod.

2.2 연구로 조사시험 기술개요

조사시험은 하나로 OR-4 조사공에서 2단계에 걸쳐 실시되었다. 1단계 조사시험은 2002. 7. ~ 2005. 6까지 진행되었으며, 상용 경수로원전과 유사한 연소조건(100 W/cm ~ 300W/cm)을 맞추기 위해 핵설계를 통한 중성자 제어기술이 적용되었다. 하나로 축방향 출력을 감안하여 0.6t의 원통형 하프늄 튜브를 제작하여 장착되었다. 2단계 조사시험은 2006. 2. ~ 2011. 6.까지 진행되었으며, 1단계에서 사용하였던 무계장리그의 하단의 시험연

료봉 집합체를 원격 manipulator 조작기술 적용하여 하프늄 튜브를 제거하고 그림 2.와 같이 새로운 무게장리기에 장전하여 목표연소도인 70,000 MWd/MTU까지 조사시험이 실시되었다.

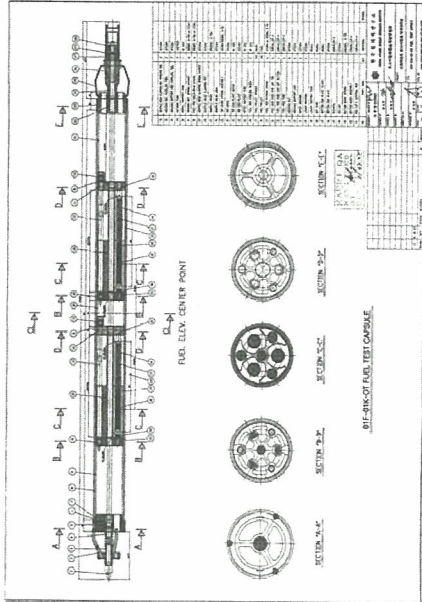


Fig. 2. Schematic drawing of irradiation test rig.

2.3 연구로 조사시험 결과

1단계 연소시험 결과 상단의 시험연료봉 3개의 평균연소도는 33,616 MWd/MTU이었으며, 하단의 시험연료봉 3개의 평균연소도는 37,390 MWd/MTU이었다. 이때 유효연소일은 601.02일이었다. 하단의 시험연료봉은 2단계 연소시험으로 계속되어 최종 유효연소일 1290.62일에 목표연소도 69,337 MWd/MTU에 도달하였다. 예비해석 결과에 따라 계획했던 예상연소도 보다 대략 20% 늦게 목표에 도달한 결과를 확인하였으며, 이는 하나로의 출력증강의 지연과 제어봉 위치에 따른 출력변화 등 운전조건의 변화와 해석기본 조건의 차이로 인해 발생된 것으로 판단된다. 사용된 무게장리기는 매우 건전한 상태의 기계적 건전성을 확인하였다.

2단계 조사시험이 완료된 상단 및 하단의 시험연료봉의 유효연소일(EFPD)와 최종연소도는 아래와 같다. 최종 연소결과는 그림 3.과 같다.

- 상단 시험봉집합체 평균 연소도 : 38,004 MWd/MTU(EFPD 689.6 일)
- 하단 시험봉집합체 평균 연소도 : 69,337 MWd/MTU(EFPD 1290.62 일)

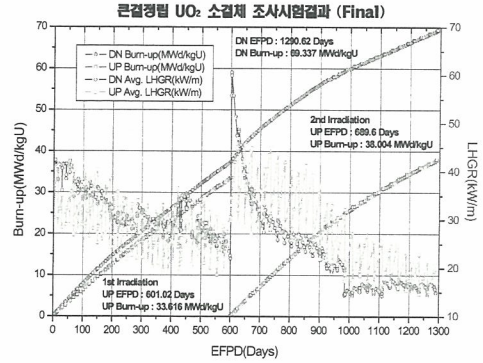


Fig. 3. Result of irradiation test of large grain UO₂ Pellet

3. 결론

본 연구는 경수로핵연료의 고연소도용 큰결정립 UO₂ 소결체의 연소시험을 통하여 연소거동에 따른 핵분열기체 방출 억제 능력을 확인하기 위한 시험이다. 하나로 연구로에서 목표연소도 70,000 MWd/MTU까지 성공적으로 조사시험을 완료하였다. 이후 일련의 조사후 시험을 통하여 연소성능을 검증하게 된다. 본 조사시험은 하나로를 이용하여 9년간의 최장기간 조사시험을 수행한 기록적인 실적으로 무엇보다 안전성과 건전성이 확보된 우수한 기술의 접목과 하나로 운전자의 우수한 기술력이 검증된 사례로 판단된다. 조사시험의 최종목적을 달성하고 최장의 하나로 이용실적을 달성한 본 시험은 향후 한국의 연구로 수출 및 이용극대화에 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 고연소도용 큰결정립 UO₂ 소결체는 현재 산업체의 상용화가 진행되고 있어 조사시험결과와 집중적인 관심을 보이고 있다. 1단계에서 종료되었던 상단 시험연료봉(33,616 MWd/MTU)의 조사후 시험결과와 최종 완료된 하단시험연료봉(69,337 MWd/MTU)의 조사후 시험을 통하여 연소성능의 객관적인 자료를 생산할 예정이다.

4. 참고문헌

- [1] 김대호 외., 고연소도용 큰결정립 UO₂ 소결체 1차 조사후 시험분석, 한국방사성폐기물학회 2007 춘계학술발표회 논문집.