

고연소도 사용후 연료봉에 대한 파괴시험 분석기술

서항석, 전용범, 이형권, 권형문, 황용화, 장정남
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
nhsseo@kaeri.re.kr

1. 서론

한국원자력연구원내 조사후 연료시험시설(PIEF)은 원자력발전소 및 원자로에서 조사한 핵연료 및 원자력재료에 대한 조사후시험 및 시험기술의 개선/개발을 통하여 원자력 연구 개발을 적기에 효율적으로 지원하고 핵연료의 성능 및 건전성 평가, 핵연료의 개발 및 손상 원인규명 등에 필요한 특성 자료를 생산/제공하는 국내 유일의 시험 시설이다. 국내 상용 원자력 발전소에서 연소한 사용후 핵연료의 성능을 평가하고 건전성을 검증하며, 고방사성 원자력 재료의 특성 시험을 수행함으로써 고연소도, 고성능 핵연료의 원전 조사 성능평가 분석과 핵연료 및 원자력 재료의 건전성 검증시험 결과를 제공 한다. 본 논문에서는 고연소도 사용후 핵연료의 주요한 조사후시험 항목을 기술하고 일부 결과를 분석하였다.

2. 시험 항목

파괴시험의 시험 항목으로는 봉 내압측정 및 핵분열 생성기체 특성 측정, 소결체 조직시험, 피복관 수소함량 분석 및 피복관 내,외면 산화층두께 측정, 전자현미경 분석, 단면 감마스캐닝, 소결체 밀도측정, 피복관 경도측정, 핵연료 연소도측정 등이 있다.

3. 시험방법

가) 봉 내압측정 핵분열 생성기체 특성 측정

핵연료봉의 plenum 부위에 천공(Puncturing)하여 압력과 온도를 측정하고 이를 토대로 봉 내압 과 핵분열 기체량을 측정한다. 또 핵분열기체를 포집하여 질량분석기(gas mass spectrometer)로 Xe과 Kr양을 측정하며 이 값을 이용하여 핵분열기체 방출비도 결정한다. 핵연료봉의 내압과 핵분열기체량은 약 3Mpa과 630cm³ 전후이며 연료봉의 내압은 연소도가 높을수록 높게 나타난다.

나) 연소도 단면 감마스캐닝

단면 감마스캐닝 시편은 두께 약3mm 디스크 형태의 시편을 사용하며 9409 핫셀 내부에 설치되어있는 시준기와 검출시스템이 사용된다. 주요 측정핵종은 Cs-137(661.66KeV)이며 측정시간은 대체로 수백초에서 1,000초 사이의 시간을 주고 측정한다.

다) 소결체 밀도측정

밀도시편은 연료봉길이 약 10mm를 피복관을 제거하고 연료봉 소자를 모아서 침전방식으로 측정한다. 침전매질은 표면장력이 적고 핵연료 소자의 공극 영향을 최소화 할 수 있는 톨루엔을 사용한다. 핫셀 내에 설치된 밀도측정장치 밸런스의 측정 정밀도는 10⁻⁵g이다.

라) 연소도 화학분석 측정

연소도 화학분석시편은 약1mm두께의 원형디스크 형태로 피복관을 제거한 후 사용한다. 연료봉의 화학분석적 연소도 결정은 Nd¹⁴⁸원소를 지표원소로 이용하는 Nd동위원소 정량에 의한 연소도 결정 방법을 이용해서 화학분석 핫셀 에서 수행한다.

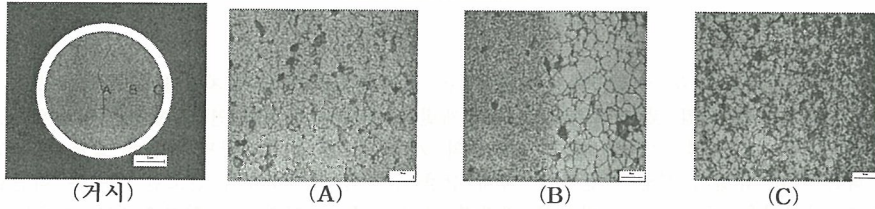
마) 피복관 수소함량분석

피복관 수소함량시편은 약1mm두께의 원형 디스크형태로 절단하여 소결체를 제거한 후 피복관을 3등분으로 분할 절단하여 수소분석기(Reco RH-404)에 넣어 피복관에 함유되어 있는 수소함량을 측정한다. 수소분석기의 분석 감도는 0.01μg이고 정확도는 ± 3%이다.

바) 소결체 및 피복관에 대한 금속조직시험

금속조직시험시편은 길이 약3mm정도로 미세절단 후 시편 가공의 원활을 위하여 레진에 열과 압력을 가하여 핫 마운팅을 한다. 마운팅 시편은 연삭과 연마의 과정을 거쳐 시편을 완성한다. 이때 필요에 따라 미세조직검사를 위해 화학적 부식을 하는데 핵연료의 특성 및 피복관의 재질에 따라 부식액 선택에서부터 부식시간 등의 최적 조건으로 수행한다. 시편 전체의 전반적인 정보를 얻기 위한 거시조직관찰은 배율 7배로 투영하여 소결체 단면 및 피복관 절단면 상태를 관찰한다. 핵연료 미세조직관찰은 배율

500X 광학현미경으로 핵연료의 중심부, 중간부, 외곽부 등에 대한 관찰을 따로 따로 수행하면서 핵연료 소자의 조직변화, 즉 입계상태, 결정립의 크기, 조사 성장, 조사석출물, 기공 등의 형성 등을 관찰하며 피복관 내 외면 산화층, 수소화물의 형성 등을 관찰한다. 다음 그림은 고연소 핵연료봉(K23-N05)의 중간 위치(2,000mm) 거시조직사진과 소결체의 조직사진이다.



4. 결론

냉각수 접촉면에서의 생성된 초기 산화피막은 오히려 산소의 확산을 막아 산화를 억제하는 역할을 하게 되지만 산화피막 두께가 약 $2\mu\text{m}$ 정도에 도달하게 되면 산화피막의 높은 응력으로 인해 계면의 수직방향으로 미세 균열이 발생되고 산소원자는 피복관 내부로 더 침투하게 되어 산화피막 두께는 계속 증가하게 된다. 이 과정에서 반응생성물로 발생하는 수소는 피복관 기지 내에 흡수되고 판 형태로 석출되어 피복관의 취성을 증가 시키게 된다. 이런 현상은 고연소도로 갈수록 더 가속되고 피복관 건전성의 핵심적인 인자로 작용한다. 사용후 핵연료 소결체의 결정립은 반경방향 위치에 따라 다른 미세조직 형태를 보여준다. 고온의 중앙부는 결정립이 연소도에 따라 성장 하지만 상대적으로 온도가 낮고 중성자속이 높은 외곽부는 평균연소도 40GWd/tU 이상에서 마이크로미터 이하 단위의 결정립, $1\mu\text{m}$ 정도의 버블 형성 등과 같은 특징을 가는 RIM영역이 형성된다.