

이중냉각 조사후 환형 UO₂ 소결체의 고온 가열시험 특성

김대호, 방제건, 임익성, 김선기, 양용식, 구양형
 한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
 kdh@kaeri.re.kr

1. 서론

한국원자력연구원에서는 원자력연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행중인 초고연소도 고성능 핵연료과제에서 고출력의 이중냉각 환형핵연료가 개발 중에 있다. 기존의 원통형 핵연료에 비해 넓은 열전달 면적과 얇은 소결체 두께의 형상으로 출력밀도 20%이상의 열출력 향상과 핵연료의 온도가 30% 이상 낮아지는 저온 핵연료이다. 이중냉각 환형핵연료의 특징으로 소결체의 변형을 최소화하고 핵분열기체를 현격하게 적게 방출하여 붕내압 등의 안전성이 확보되며, 핵연료의 안전성 기준이 되는 핵연료 용융온도의 충분한 여유를 확보함으로써 안전하고 경제성이 향상되는 고출력의 초고연소도 핵연료이다. 이중냉각의 환형핵연료 구조특성을 감안하여 소결체의 조사특성을 확인하고 초기연소특성을 검증하기 위해 하나로 조사시험을 EFPD 93.81에 걸쳐 실시하였다. 현재 조사후시험이 진행 중인 이중냉각 환형핵연료는 서로다른 밀도를 갖는 시험연료봉의 밀도측정이 완료되어 이를 이용한 1700℃ 고온 가열시험이 시행되었다. 가열시험을 통해 환형 UO₂ 소결체의 핵분열기체의 방출거동을 평가하고 최적의 소결체 제조조건을 확보하는데 활용될 예정이다.

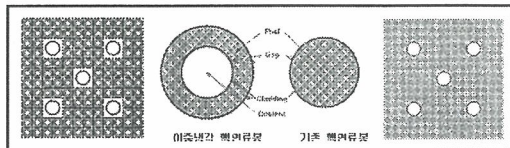


Fig. 1. 이중냉각 환형핵연료 내부 구조 및 핵연료봉 배열(16 X 16 기준)

2. 본론

2.1 가열시험 및 시험 조건

2.1.1 가열시험

연구로에서 조사된 이중냉각 환형 UO₂ 소결체는 표 1과 같이 90%TD, 93%TD, 96%TD, 98%TD 및 98%(L)TD의 5종류이며, 이에 대한 각각의 밀도측정이 완료되었고 각각의 약 200mg 정도 가열시편을 이용하여 가열시험이 수행되었다. 시편두께가 2mm정도임을 감안하여 그림 2와 같이 횡방향의 전부위를 사용하였으며 고히체 형태를 유지하여 가열시편으로 사용하였다.

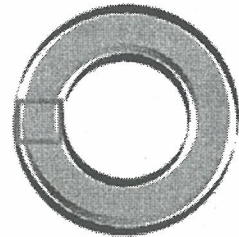


Fig. 2. 환형 UO₂ 소결체의 가열시편

2.1.2 가열시험 조건 및 방법

조사후 환형 UO₂ 소결체 5종류에 대한 1700℃ 연속 가열시험을 통하여 온도에 따른 실시간 핵분열기체 방출거동을 분석하여 과도조건에서의 이중냉각 환형 UO₂ 핵연료 특성자료를 생산하였다. 가열시험조건은 1700℃까지 분당 10℃/min으로 상승시켜 10분간 1700℃에서 온도유지 후 분당 20℃/min씩 1000℃까지 일정한 하강유지 후 상온까지 냉각하면서 Kr-85를 측정하였다. 분위기 조절을 위하여 Helium의 불활성가스 분위기를 유지하였다. 이때 Helium은 분당 150 ml/min를 공급하였다. 방출된 Kr-85는 FHT8000의 베타계측기를 이용하여 60 sec 간격으로 측정하였으며 동시에 감마계측기로도 측정을 병행하였다. 시험은 고연소도 핵연료의 안전성 시험을 위해 PIEF 9405 Cell에 설치 시험 중인 사용후 핵연료 고온가열시험장비(PIA)에서 시행되었다. 측정된 핵분열기체 Kr-85는 시편의 조사전 밀도와 결정립크기를 기준으로 조사후 밀도변화와 결정립크기변화를 고려하여 방출거동을 평가하였다.

Table 1. 시험 소결체 재료 및 제원

구분	제원	비고
분말 및 농축도	IDR 2.67%	
밀도	90, 93, 96, 98 %	96%는 상용
외경	14.62 mm	
내경	10.28 mm	
길이	10.16 mm	
결정립 크기	5 mm 이상	상용
O/U 비	2.0±0.01	
불순물 농도	상용소결체 기준시방 기준	

2.2 고온 가열시험 결과

2.2.1 가열시편의 밀도추정비교

소결체 제조시 밀도와 조사후 밀도와의 차이가 발생하였다. 이는 open porosity의 correction factor를 반영하지 않아 표 2와 같이 밀도차이를 발생시켰다. 또한, 조사후 결정립 크기의 경우 제조시 시편의 결정립크기 보다 성장하였다. 이는 가열시험시 Kr-85의 방출거동에 영향을 미치게 한다.

Table 2. 가열시편의 밀도 및 결정립크기의 변화

Specimen	Den-As	Den-Ir	GS-As	GS-Ir	BU
S#1 90%TD	90.7	96.0	2.70	3.32	8.12
S#2 93%TD	92.1	94.7	2.90	2.25	8.12
S#3 96%TD	95.8	96.1	8.6	10.60	8.12
S#4 98%TD	98.0	97.9	8.7	11.41	10.90
S#5 98%TD(L)	98.1	97.9	8.7	12.49	10.90

2.2.2 핵분열기체 Kr-85의 방출거동

환형 조사후 UO₂ 소결체는 연구로에서 S#1, S#2 및 S#3의 경우 8.12 MWd/kgU, S#4 및 S#5는 10.9 MWd/kgU의 평균연소도를 갖는다. 시편의 연속가열시 90%밀도를 갖는 시편의 경우 Kr-85의 방출은 약 1200℃에서 시작되었으며, 93%밀도 시편은 약 1300℃에서 급격한 방출거동을 보였다. 96%, 98% 및 98%L의 밀도시편은 약 1500℃에서 급격한 KR-85의 방출거동을 보였다. Kr-85의 방출량은 96%TD의 밀도시편을 100% 기준으로 90%TD는 146%, 93%TD는 162%, 98%TD(L)은 112%의 방출량을 보였다. 반면에 98%TD 밀도를 갖는 시편의 Kr-85 방출량은 88%로 과도히 작은 방출량을 보임으로써 안정된 방출거동을 보였다. 또한, 핵분열기체의 방출속도는 각 시편별로 크게 차이는 없으나 밀도가 높은 시편의 경우 미미한 정도로 보다 안정된 방출속도를 보임으로써 밀도가 낮은 시편보다 안정적인

연소거동을 보일 것으로 판단된다. 그림 3은 조사후 각 시편의 거시조직이며, 그림 4는 핵분열기체 Kr-85의 각 시편별 방출거동이다.

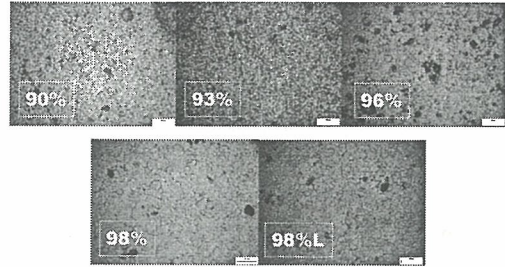


Fig. 3. 조사후 환형 UO₂ 소결체 시편의 거시조직

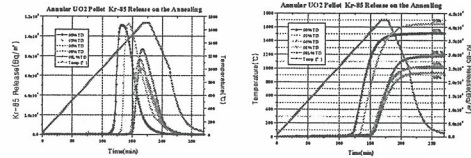


Fig. 4. 조사후 환형 UO₂ 소결체 시편의 Kr-85 방출거동

3. 결론

환형 조사후 UO₂ 소결체는 초고연소도 고성능의 핵연료 적용을 위해 원천기술개발 차원에서 연구 중에 있다. 조사후 환형 UO₂ 소결체의 170 0℃ 연속 가열시험을 통하여 핵분열기체 Kr-85의 온도에 따른 연속적인 방출거동은 명료하고 급격한 방출거동을 확인할 수 있었다. 환형 UO₂ 소결체는 얇은 링의 형태로 되어 있어 구조적 변형이 없도록 안정적인 노내 연소거동이 필요하다. 본 가열시험을 통하여 각 시편별 핵분열기체의 방출거동을 분석 하였으며, 시험결과는 이중냉각 환형 핵연료의 최적의 소결체 선정에 주요한 요소로 이용될 예정이다. 시험결과 98%TD 밀도시편이 핵분열기체 방출량 및 방출속도 등에서 안정적인 연소거동을 보인 것으로 확인되었다. 이후 기타 미세조직의 변화와 변위추정 등을 통하여 최종의 후보 소결체가 결정될 예정이며 중간 연소도 정도의 2차 조사시험이 진행될 예정이다.

4. 참고문헌

[1] 김대호 외, 고연소도 UO₂ 사용후 핵연료의 고온가열시험특성, 한국방사성폐기물학회 2007년 추계학술발표회.