

## Commercial High Burnup Fuel PIE Results and Performance Analysis by Using INFRA

양용식, 이찬복, 김영민, 김대호, 김선기  
 대전광역시 유성구 덕진동 150, 한국원자력연구소  
 yys@kaeri.re.kr

### 1. 서론

국내에서도 경수로 핵연료의 방출 연소도가 집합체 평균 52MWd/kgU 에 도달함으로써 본격적인 고연소도 핵연료의 사용이 현실화 되고 있다. 고연소도 핵연료의 성능 및 거동은 기존 30~40MWd/kgU 의 연소도 핵연료와 큰 차이를 나타내기 때문에 고연소도 핵연료에 대한 성능 시험 자료의 생산 및 평가는 매우 중요하지만 고연소도 운전에 필요한 대부분의 성능 시험 자료 및 데이터베이스는 외국의 결과에 의존하여 왔다. 이에 국산 고연소도 핵연료의 연소 성능을 검증/평가 하기 위해 현재 보관중인 사용후 핵연료중 최대 연소도에 도달한 집합체를 선정하여 조사후 시험을 수행하고 있으며 고연소도 핵연료 성능평가 코드 INFRA 를 이용한 성능 평가를 수행하였다.

### 2. 고연소도 핵연료 선정

Westinghouse 형 V5H 핵연료인 K23 집합체는 울진 2 호기 8-9-10 주기동안 연소되었으며 방출시 연소도는 집합체 평균 52.3MWd/kgU 에 도달하였다. V5H 핵연료는 4.2wt%로 농축된 enriched pellet 과 천연우라늄을 사용한 axial blanket 영역으로 나뉘어져 있으며 피복관 재질은 Low-Tin Zr4 를 사용하였다[1] K23 집합체의 핵설계 자료 분석 결과 최대 연소도 핵연료봉은 M04 핵연료봉으로서 봉평균 연소도 56.7MWd/kgU 에 도달한 것으로 나타났다. 따라서 최고연소도인 M04 핵연료봉을 일차적인 인출 연료봉으로 선정하여 조사후 시험을 수행하였다.

### 3. 조사후 시험

M04 핵연료봉의 연소 성능 분석을 위해 조사후 시험을 수행하였다. 조사후 시험은 핵연료 재원 변화등을 관찰하기 위해 비파괴 시험을 우선 수행하였으며, 비파괴 시험 결과를 바탕으로 핵연료봉 절단 위치를 선정하여 파괴시험을 수행하였다.

### 4. INFRA 를 이용한 성능 평가

고연소도 핵연료 성능평가 코드 INFRA[2]를 이용하여 조사후 시험 결과를 바탕으로 성능 평가를 수행하였다. 성능 평가에 필요한

입력작성을 위해 K23 집합체 및 M04 핵연료봉에 대한 핵설계 자료를 확보하여 축방향 출력분포를 포함한 상세한 운전이력을 확보하였으며 V5H 소결체 및 핵연료봉 제작 자료를 확보하였다. 주요 성능평가 항목은 연소도, 피복관 변형, 핵분열 기체 방출량, 피복관 수소 침투량, 소결체 밀도변화등 현재까지 수행된 조사후 시험 결과들과의 비교를 수행하였다.

### 5. 조사후 시험 및 성능평가 결과

#### 5.1 비파괴 시험 결과

비파괴 시험을 통해 핵연료봉 조사성장, 직경변화, 축방향 연소도 분포, 피복관 외면 산화막 분포등이 측정되었다. 그림 1 에는 축방향 감마스캔에 의해 측정된 연소도 분포와 화학분석법에 의해 측정된 연소도 분포 그리고 INFRA 계산을 위해 추정된 연소도분포의 차이가 나타나 있는데 매우 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. NFRA 가 예측한 M04 핵연료봉의 조사성장량은 0.95%로서 측정치 1.1%와 큰 차이를 나타내지 않았다. 피복관 외면 산화막두께는 대략 100 $\mu$ m 에 도달한것으로 나타났으나 정확한 평가는 파괴시험에 의한 측정치를 이용한 보정후에 최종적으로 결정될 것이다. 핵분열 기체 방출량은 천공법에 의해 측정된 결과 약 5%정도의 방출된 것으로 나타났으며 INFRA 예측결과는 약 7%정도 방출로서 측정치에 비해 다소 높게 예측되었다.

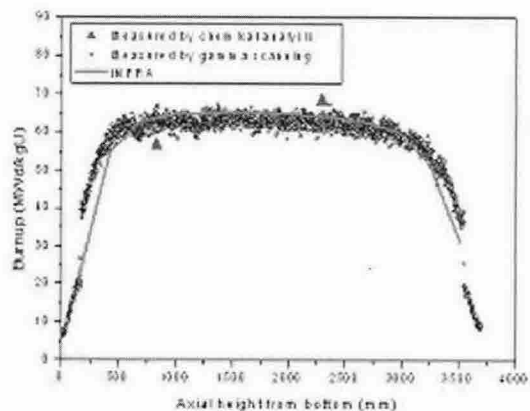


그림 1. M04 핵연료봉 축방향 연소도 분포

#### 5.2 파괴 시험 결과

파괴 시험은 크게 소결체에 대한 검사와 피복관에 대한 검사로서 나눌 수 있다. 소결체 파괴시험은 밀도 및 연소도측정을 위한 화학분석과 OM(Optical Microscopy), SEM(Scanning Electron Microscope), EPMA(Electron Probe Micro-Analyzer)를 이용한 소결체 미세조직 분석으로 나눌 수 있으며 피복관 파괴시험은 피복관 수소 침투량 분석을 위한 수소분석 및 기계적 시험을 위한 시편 제작으로 구성되어 있다. 수침법에 의한 소결체 밀도 측정결과 초기 밀도에 비해 약 2%의 밀도가 감소하여 93%TD 정도인 것으로 나타났으며 피복관에 대한 수소분석 결과에서는 최대 1000ppm 정도의 수소가 피복관에 침투한 것으로 나타났다. 소결체에 대한 OM, SEM 검사 결과, 고연소도 핵연료의 특징 중 하나인 rim structure 가 광범위하게 생성된 것으로 나타났다(그림 2). EPMA 분석을 통해서 핵연료 반경방향 연소도 분포와 핵분열 생성물들의 분포를 측정하여 INFRA 예측치와의 평가를 수행하였다.(그림 3)

6. 결 론

국내 최대 방출연소도 집합체에서 인출된 고연소도 핵연료봉 K23-M04 봉에 대한 조사후 시험을 수행하였으며 고연소도 핵연료 성능평가 코드 INFRA 를 이용한 성능 평가를 수행하였다. 조사후 시험 결과에서는 기존의 낮은 연소도 핵연료들과 달리 많은 핵분열 기체 방출량, rim structure 의 생성등 고연소도 핵연료의 전형적인 모습을 확인할 수 있었으며 정밀조사후 시험을 통해 이에 대한 분석 및 평가를 수행하였다. INFRA 를 통한 성능 평가에서는 INFRA 가 예측한 여러 성능항목들이 시험 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

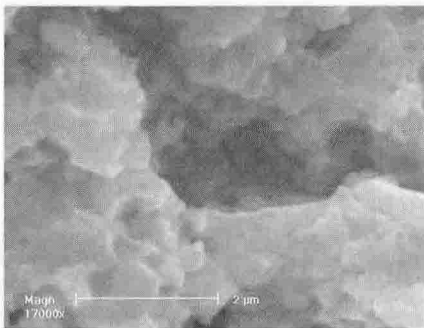


그림2. M04 핵연료봉 rim 영역 SEM 사진

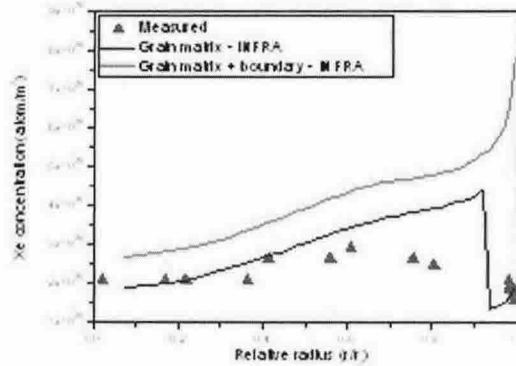


그림3. 반경방향 Xe 분포 측정치와 예측치

7. 참고 문헌

[1] 이찬복 외, “고연소도 핵연료 안전성 시험 및 평가기술 개발”, KAERI/RR-2314/2002, 한국원자력연구소  
 [2] 이찬복 외, “UO2 핵연료봉 성능 분석코드 INFRA 개발”, 2001 한국원자력학회 추계학술대회 논문집.