

KOFA 핵연료 UO₂ 소결체의 조사후 검사 결과 분석
(Analysis of Post-Irradiation Examination Results of KOFA UO₂ Pellets)

이찬복, 김기항, 김오환, 유호식, 정진곤
한국원자력연구소

요약

고리 2호기에서 2주기 동안 연소된 1개 KOFA 연료봉에 대한 조사후 검사결과, 핵분열기체 방출량 및 소결체 밀도가 연료봉 설계코드의 예측범위내에 있음을 확인하였으며, 소결체의 미세구조 및 연료봉내의 축방향 분포 검사를 통해 UO₂ 소결체가 아무런 이상이 없이 안정적으로 연소되었음을 확인하였다. 단지 1개 연료봉에 대한 조사후 검사만으로는 KOFA 핵연료 UO₂ 소결체의 노내 거동을 검증하였다고는 할수 없기 때문에 연소된 핵연료에 대한 지속적인 조사후 검사가 필요한 것으로 사료된다. 특히 한국형원자로의 핵연료인 영광 3호기 핵연료에 대해 조사후 검사를 수행하고, 또한 일부 시험연료봉을 고연소도까지 연소시킨후 조사후 검사를 수행하면, 핵연료의 성능 검증뿐만 아니라 국내 고유의 핵연료 성능자료를 생산하게됨으로써, 앞으로 국내 고유의 고연소도핵연료개발 및 연료봉성능분석코드 개발에 활용할수 있다.

1. 개 요

KOFA 핵연료는 최초의 국산 가압경수로형 핵연료로써 1990년부터 고리 2호기 7주기를 시작으로 하여 국내 8개 호기의 웨스팅하우스사형 가압경수로에 장전되었다. KOFA 핵연료의 피복관은 웨스팅하우스에서 제조된 것이며, UO₂ 소결체는 수입된 농축 UF₆를 국내에서 AUC공정으로 재변환후 제조한 것이다. KOFA 핵연료가 처음으로 장전됨으로써 핵연료 Surveillance Program이 착수되어, 고리 1호기(14x14 KOFA), 고리 2호기(16x16 KOFA)[1], 고리 4호기(17x17 KOFA) 및 울진 1호기(17x17 KOFA)에서 각 발전소당 6개의 핵연료집합체를 선정하여, 제조후 예비특성화를 수행한후 노내에 장전하였다. 이들 Surveillance 핵연료중 일부에 대해서는 소내 저장조 검사를 통해 핵연료 조사 성장 등의 연소후 핵연료 상태를 검사하였다.[2] 여기서는 고리 2호기에서 연소된 J44 핵연료 집합체의 조사후 핫셀검사결과[3]를 통해 국내에서 생산된 UO₂ 소결체의 노내 연소후 거동을 분석하였으며, 국내 고유의 고연소도핵연료 개발 및 연료봉 성능 분석 코드 개발을 위한 국산 핵연료의 노내 성능자료 생산의 필요성을 기술하였다.

2. KOFA 핵연료 소결체 성능자료 분석

2.1 소결체의 조사전 특성시험 결과

한국원자력연구소의 조사후시험시설에서 핫셀검사가 수행된 고리 2호기 제 7 및 8주기에서 연소된 J44 핵연료 집합체중 G2 연료봉 소결체 LOT의 제조사의 특성시험 결과는 표 1에 요약되어 있으며, 그림 1은 소결체의 미세구조를 보여주는데 평균결정립 크기는 7.9 μm 였으며 기공은 균일하게 분포되었다.

2.2 소결체 조사후 시험 결과

J44 핵연료집합체중에서 1개의 건전 UO_2 연료봉에 대해 핫셀 비파괴 및 파괴검사가 수행되었으며[3], 조사후 검사가 수행된 연료봉의 연소이력은 그림 2과 같으며 연료봉평균연소도는 35.1 MWD/KGU 이다. 소결체의 노내거동과 관련된 검사는 핵분열기체 성분 및 절대량 분석, 소결체 밀도 측정, 소결체 미세구조 검사 그리고 소결체의 축방향 적층상태 검사 등이다.

핵분열기체분석을 위해 연료봉에 구멍을 내어 기체를 포집한 후 Quadrupole 질량분석기로써 Xe과 Kr 등의 핵분열 기체를 분석하였다. 측정 결과 핵분열 기체는 Xenon이 4.742 cc, Krypton이 1.267 cc로써 총 6.009 cc가 측정되었다. 그림 3에는 측정된 핵분열기체량과 KOFA 핵연료의 설계코드인 CARO-D[4] 코드의 예측치를 비교하였는데, 측정결과는 설계코드의 예측범위내에 있었으며 최적예측치 보다는 낮게 핵분열기체가 방출되었다.

소결체의 밀도는 침투성이 좋은 톨루엔을 침적용액으로 사용한 수침법으로 측정되었는데 측정 오차는 0.01 % TD 미만이다. 밀도측정은 G2 연료봉내의 4개의 서로 다른 축방향 위치에서 각각 측정되었다. 그림 4에는 측정된 UO_2 소결체의 밀도와 CARO-D 코드 모델의 예측치를 비교하였는데, UO_2 소결체 밀도는 예측치 범위내에 포함되었다.

소결체의 조직검사는 광학 현미경으로 수행되었는데, 그림 5는 연료봉 하단으로 부터 3020 mm 에 위치한 소결체의 반경방향 위치별 조직을 나타내는데 결정립 분포는 조사전과 큰 차이가 없었으며 결정립 성장은 일어나지 않은 것으로 판단된다.

연료봉의 축방향 감마스캐닝 검사로써 소결체의 축방향 분포 및 축방향 연소도 분포를 검사하였는데, 검사 결과 소결체는 축방향으로 안정적으로 위치하였으며 소결체 간의 큰 겹은 발생하지 않았음을 확인하였다.

2.3 토의

고리 2호기에서 2주기 동안 연소도 35.1 MWD/KGU 까지 연소된 1개 연료봉의 조사후 검사 결과를 KOFA 연료봉 설계코드의 예측치와 비교하여 핵분열기체 방출 및 소결체 밀도변화가 설계코드의 예측 범위내에 있음을 확인하였다. 1개 연료봉의 조사후검사자료만으로는 KOFA 핵연료 UO_2 소결체의 노내 성능이 검증되었다고는 할 수 없다. 비록 KOFA 핵연료의 UO_2 소결체가 Siemens 사의 시방서에 근거하여 제조되었고, 충분한 노외 성능 시험을 통해 노내 성능도 또

한 Siemens사의 소결체 성능자료에 근거하여 개발된 연료봉성능분석코드의 예측범위내에 포함될 것이라 판단되나, 핵연료조사후 검사를 통해 노내 성능을 확인하여 검증할 필요성은 있다. 조사후 검사를 통해서 가압경수로형 국산핵연료 UO_2 소결체의 노내 성능자료를 생산함으로써, 이를 연료봉성능분석모델의 개선에 활용하고, 나아가서는 국내 고유의 핵연료 개발 및 연료봉성능분석코드 개발에 활용할 수 있을 것이다. 고리 1, 고리 2, 고리 4 및 울진 1호기에서 각각 6개의 KOFA 핵연료집합체에 대해 노내 장전전에 예비특성화가 수행되었는데, 그 중에서 몇개의 연료봉을 선정하여 조사후 검사를 수행하면 KOFA 핵연료 UO_2 소결체의 성능 자료 생산 및 성능 검증을 할 수 있을 것이다. 이는 또한 1995년부터 영광 3호기에 처음으로 장전된 System 80형 핵연료에도 적용이 된다. 영광 3호기 핵연료도 국내에서 ABB/CE사의 시방서에 따라 생산된 UO_2 소결체를 사용하여 제조된 것으로, 핵연료 성능분석은 ABB/CE사의 노내 성능자료에 근거한 연료봉성능분석코드로써 수행하였는데, 영광 3호기에서 연소된 핵연료에 대해 조사후 검사를 수행하여 연료봉 성능자료를 생산하면, 국내 고유의 핵연료개발 및 연료봉성능분석코드의 개발에 활용될수 있다.

비록 1개의 연료봉에 대한 성능자료밖에 없지만, 핵분열기체의 방출량이 최적 예측치 보다 적은 하나의 가능한 이유는 KOFA 핵연료의 UO_2 소결체가 Siemens사의 수십년의 경험에서 개선된 기술을 사용하여 제조되었기 때문에 그 전의 소결체 보다는 좋은 성능을 보일 것으로 일반적으로 추정할수 있다. 따라서 최신의 기술로 생산된 국산 핵연료의 노내성능자료에 근거하여 연료봉성능분석코드를 개발하면, 핵연료성능의 개선효과가 반영되어서 핵연료설계예산시 설계여유도를 확보할수 있다. 그리고 고연소도 핵연료의 소결체 가장자리에 결정립크기가 $1 \mu m$ 이하이고 기공도가 매우 높은 Rim이 형성되는 것이 밝혀져서[5], 고연소도에서의 소결체 안정성, 열적/기계적 성질 그리고 핵분열기체방출의 가속화 가능성 등에 대한 연구가 현재 세계적으로 진행중이다.[6] 따라서 국내고유의 고연소도핵연료개발을 위해서는 국산 UO_2 소결체가 사용된 시험연료봉을 몇 개 선정하여 영광 3호기 등에서 고연소도까지 연소시켜서 조사후검사를 수행하면, 국산 UO_2 소결체의 고연소도에서의 성능을 검증하고 생산된 성능자료를 고연소도연료봉성능분석코드 개발에 활용할수 있을 것이다.

3. 결 론

고리 2호기에서 2주기 동안 연소도 35.1 MWD/KGU까지 연소된 1개 연료봉에 대해 핵분열기체방출 및 소결체 밀도를 측정한 결과 연료봉 설계코드의 예측범위내에 있음을 확인하였으며, 소결체의 미세구조 및 연료봉 축방향 분포를 검사한 결과 아무런 이상이 없이 안정적으로 연소되었음을 확인하였다. 단지 1개 연료봉에 대한 조사후 검사만으로는 국산 UO_2 소결체의 노내 거동을 검증하였다고는 할수 없기 때문에, 연소된 핵연료에 대한 계속적인 조사후 검사가 필요한 것으로 사료된다. 특히 한국형원자로의 핵연료로 앞으로 계속 사용될 영광 3호기 핵연료중에서 예비특성화가 수행된 Surveillance 핵연료집합체에 대해 조사후 검사를 수행하고, 또한 시험연료봉을 고연소도까지 연소시켜서 조사후검사를 수행하면, 핵연료의 성능 검증 뿐만 아니라 국내 고유의 핵연료 성능자료를 생산하게되어 앞으로 국내 고유의 고연소도핵연료개발 및 연료봉성능분석코드 개발에 활용할수 있다.

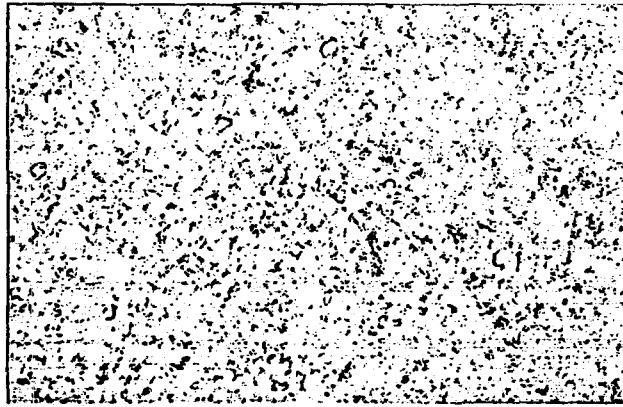
참고문헌

- (1) 김영석 외, 고리 2호기 재장전 국산핵연료 집합체 CHARACTERIZATION, KAERI/RR-1025/91, 한국원자력연구소, 1991.
- (2) 김형규, 서정민, 고리 2호기 국산핵연료 연소 1주기후 성능검사보고서, KAERI/TR-217/91, 1991.
- (3) 이상근 외, 고리 2호기 제 7/8주기 공급 국산연료 손상원인 확인 및 결함 방지 대책, KAERI/TR-387/93, 한국원자력연구소, 1993.
- (4) R. Eberle et al, The KWU fuel rod computer code CARO(version D5), KWU Technical Report B111/e117/82, 1982.
- (5) M.E. Cunningham, et al, Development and characteristics of the rim region in high burnup UO₂ fuel pellets, J. of Nuclear Materials 188, 19-27, 1992.
- (6) 김양은 외, 고연소도 연료개발을 위한 기반기술 개발 연구, KEPRI-94Z-J05, Vol. 1, 한국전력공사 전력연구원, 1995.

표 1. G2 연료봉 소결체 LOT의 특성시험 결과

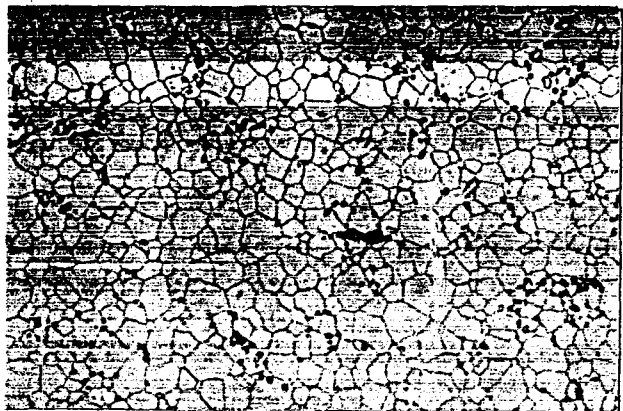
변 수	기술사양서 요건	측 정 치
소결밀도* (g/cc)	10.4 ± 0.15	10.42 ± 0.03**
직 경 (mm)	8.05 ± 0.01	8.05 ± 0.0026
표면조도 (μm)	< 2	0.95 ± 0.097
평균 결정립 크기 (μm)	4 ~ 25	7.9
개기공도 (%) [1]	N/A***	0.19
재소결밀도변화(g/cc)	< 0.15	0.057 ± 0.015

- (*) 소결 조건
 - 온도 : 1700 °C
 - 시간 : ~ 3.9 hr
- (**) 표준편차
- (***) 해당 사항 없음.



(100 x)

기공 분포



(400 x)

미세조직(평균결정립 크기 : 7.9 μm)

그림 1. G2 연료봉 소결체 제조 LOT의 조사전 조직사진

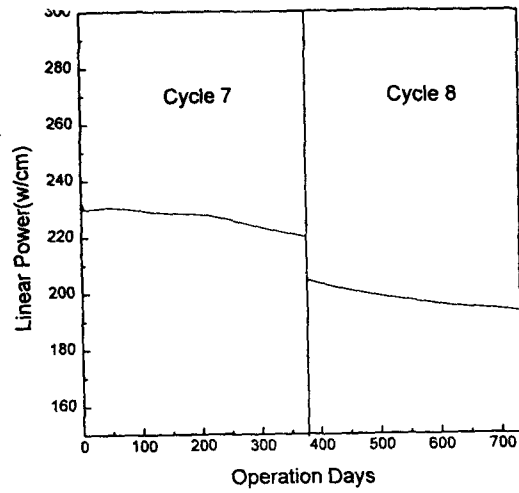


그림 2. G2 연료봉의 연소이력

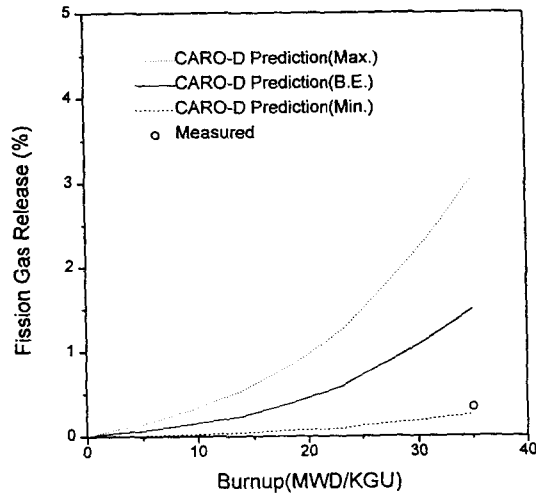


그림 3. 핵분열기체방출량의 측정치와 설계코드 예측치 비교

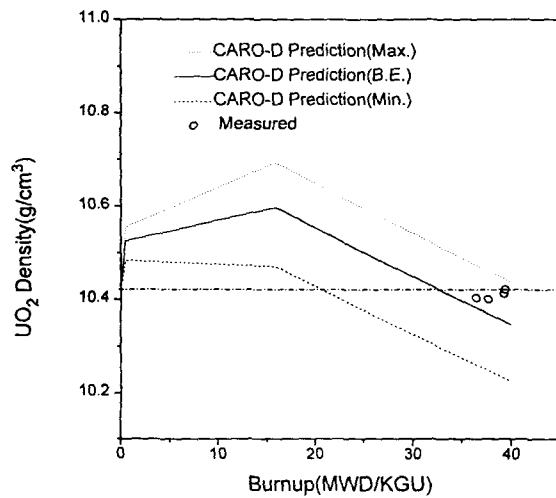


그림 4. UO₂ 소결체 밀도의 측정치와 설계코드 예측치 비교

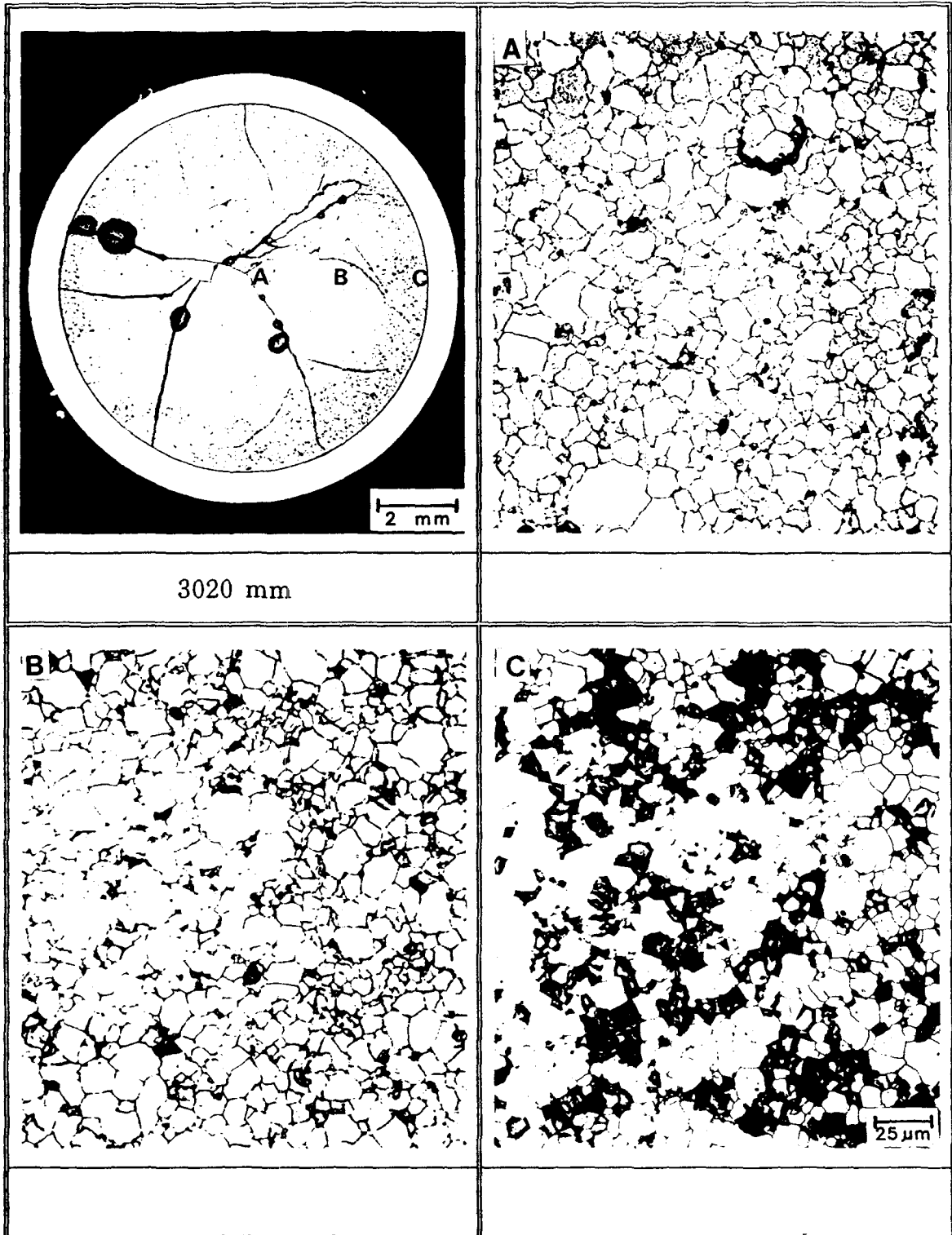


그림 5. G2 연료봉의 소결체 조사후 조직사진