

국산 고연소도 사용후핵연료의 성능특성분석

김대호, 방제건, 양용식, 김선기, 이찬복, 전용범
 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지
 kdh@kaeri.re.kr

경수로(PWR) 원전의 경제성향상을 위해 핵연료의 고연소도화가 추세이며, 이로 인한 선행 및 후행핵연료의 다양한 연구개발이 국제적으로 시도되고 있다. 우수한 내부식성 성능의 피복관 소재가 개발되면서 지속적인 연소도의 증가를 가져왔으며, 원전의 경제성 제고를 위한 고연소도 핵연료 개발에 관심이 집중되었다. 세계적으로 원전 이용률이 높은 우리나라의 경우 국내에서 생산된 핵연료의 인.허가 연소도를 58 MWd/kg-U.rod avg.으로 제한하고 있으며, 이는 핵연료의 안전성 확보를 위한 설계기준에 적용된다. 특히, 피복관의 성능은 핵연료 건전성에 직접적인 영향을 주며, 현재 국산 핵연료에 사용된 Zircaloy계열의 피복관은 연소도의 증가에 따라 저 주석함량의 Improved Zircaloy-4에서 내식성이 강화된 Zirlo™으로 대체되어 있다. 국내 원전에서 인출되어 저장하고 있는 핵연료의 대부분은 Zircaloy-4 계열의 피복관이며, 2000년 말부터 장전되기 시작한 내부식성의 Zirlo™ 피복관 사용 핵연료가 인출되고 있다. 현재 발전소 저장조에 보관중인 높은 연소도의 핵연료는 저 주석함량의 Improved Zircaloy-4 피복관을 사용한 핵연료가 주도적이고, 이들 중 제한 연소도까지 연소된 핵연료를 다량 저장하고 있다. 고준위 폐기물로 분류된 사용후 핵연료의 처리처분과 장기저장방식에 대한 다양한 논의가 시작되고 있는 시점에서 국산 사용후 고연소도 핵연료의 특성을 분석하였다. 기존의 30 ~ 40 MWd/kg-U의 중저수준 연소도를 갖는 사용후 핵연료와는 다르게 고연소도 핵연료에서 나타난 피복관의 특성은 향후 사용후핵연료 처리처분의 기술기준에 중요한 요소이다.

- 국산 고연소도 사용후 핵연료

시험에 사용된 국산 고연소도 사용후 핵연료는 불평균 57,830 MWd/MTU-rod avg.의 연소도를 갖는 연료봉으로 국부적으로 67,000 MWd/ MTU까지의 연소도를 갖는다. 표 1.은 시험에 사용된 사용후 핵연료의 제원과 주기연소도이다. 고연소도에 따른 피복관의 부식, 수소화 및 Crud 침착, 변형률 및 응력변화, 소결체의 핵분열기체 분포 및 방출, 핵연료 분산 및 PCMI 등의 다양한 특성을 확인한다. 이의 구체적인 성능확인을 위해 Separate Effects Test를 수행하였다. 피복관의 경우 산화층 및 Crud 등에 의한 재료 특성변화를 확인하고 이때의 기계적 성질시험을 수행하였고 소결체의 경우 FGR의 분포와 방출거동과 Rim에 의한 미세구조 및 생성기구를 분석하였다.

표 1. 고연소도 사용후 핵연료의 제원 및 주기연소도

- Material/Enrichment (w/o)	UO ₂ / 4.20, NU0.70	Cycle	Operation Days	Burnup (MWD/kgU)
- Pellet diameter (mm)	8.192			
- Pellet length, EU/NU (mm)	9.83/10.16	8	436	17.83
- Pellet density (g/cc)	10.51 (96.75 %TD)	9	441	19.83
- Clad material	Improved Zircaloy-4	10	439	14.93
- Rod outside diameter (mm)	9.60	Total	1,316	52.59
- Clad thickness (mm)	0.67			
- Diameter gap (µm)	166			
- Active length of fuel (mm)	3,657.6 (3,362.8EU/304.8NU)			
- Rod array/No. of fuel rod	17x17 / 264			
- Fuel rod pitch (mm)	12.60			
- No. of spacer, (End/Mid/IFM)	2 Inc./6 Zr-4 / 3 Zr-4			
- FA Length (mm)	4,063			

- 고연소도 핵연료의 피복관 특성

피복관의 응력기준은 일반적으로 1 %의 항복응력 혹은 Ultimate Tensile Strength 등이 사용되며, 변형률 기준으로는 1 %의 원주방향의 탄성 및 소성 변형률 혹은 소결체의 팽윤으로 인한 피복관의 원주 및 축방향의 유효영구 변형률 2.5 % 등이 사용된다. 산화층의 경우 100 μm 이하 생성 및 이때 수소침투는 500ppm 이하를 기준으로 한다. 국산 고연소도 핵연료의 시험결과 응력, 변형률 및 산화층등의 기준치가 모두 제한수위에 있는 것으로 확인되었다. 그림 1은 국산 고연소도 사용후 핵연료의 산화층과 직경변화의 측정자료이며, 그림 2는 고연소도 핵연료봉의 하단에서 300cm 부근에서 산화층 외관사진 이다.

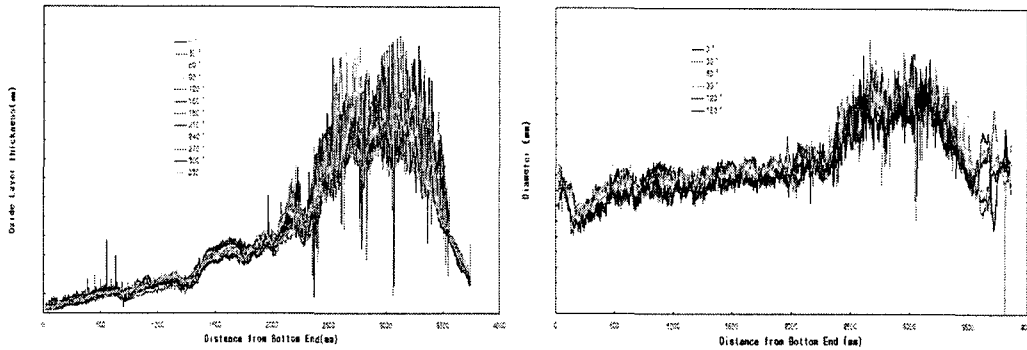


그림 1. 국산 고연소도 핵연료의 산화층 및 직경변화

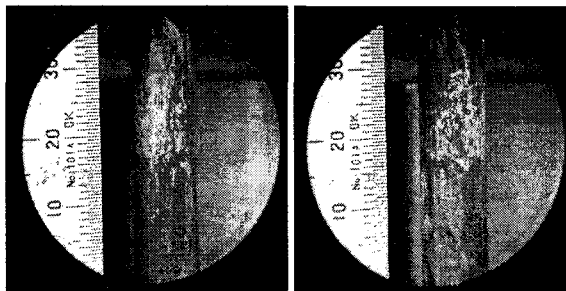


그림 2. 국산 고연소도 핵연료의 산화층 외관사진

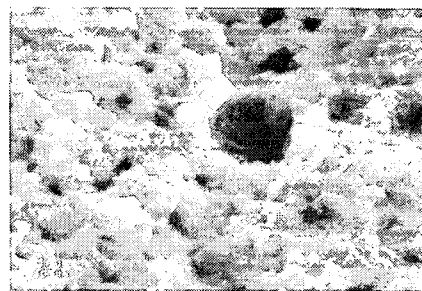


그림 3. Rim영역 SEM 사진

- 고연소도 핵연료의 소결체 특성

소결체의 경우 고연소도에 따른 사용후 핵연료 처리처분 및 장기저장에 따른 특성에 피복관보다는 중요성이 떨어진다. 반면, 핵비확산에 따른 사용후 핵연료의 재활용시 고려되어질 수 있는 것이 핵분열기체의 절대량과 고연소에 따른 Rim영역의 확대이다. 고연소도 핵연료로 인해 핵분열기체의 양은 증대되었으며, 국부적이기는 하지만 Rim의 영역이 100 μm 까지 확대되어 있는 것이 관찰되기도 하였다. 그림 3은 국산 고연소도 소결체의 외곽에서 관찰된 Rim사진이다.

- 결론 및 향후 계획

국산 고연소도 경수로용 사용후핵연료의 특성자료는 향후 장기건식저장 등의 처리처분에 관한 연구개발의 중요한 기본 자료가 된다. 고연소도 핵연료의 소재 및 재료에 대한 연소후 특성은 선행핵연료의 안전성평가와 개발에 활용되고, 핵비확산을 위한 재활용 연구에 이용될 수 있다. 지속적인 고연소도 사용후 핵연료의 안전성 평가 및 성능자료 생산을 통하여 안전한 사용후핵연료 관리 및 처분에 연계이용이 필요하다.