

## 울진 2호기 조사후 핵연료 초음파 세정 적용 결과

김용관, 신중철, 우해석, 윤재황\*, 이종현\*\*

한전원자력연료(주), 대전광역시 유성구 대덕대로 242

\*한국수력원자력(주), 경상북도 울진군 북면 울진북로 2040

\*\*충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

[yckim@knfc.co.kr](mailto:yckim@knfc.co.kr)

### 1. 서론

핵연료 연료봉에 고착된 크러드는 원자로 상부 노심출력의 찌그러짐 현상 발생 이후 원전운영에서 중요한 문제로 대두되었다. 이 원자로 상부출력의 찌그러짐 현상은 AOA(Axial Offset Anomaly)라고 불리우지며, 이 현상을 유발하는 인자가 크러드로 분석되었다. 크러드는 원자로계통 내에서 발생된 부식생성물을 말하는데 이 크러드는 계통내에서 유체와 함께 흘러다니다가 고온의 핵연료 피복관 표면에 고착되어 증성자 flux를 감소시킴으로서 출력분포를 왜곡시켜 AOA 문제를 야기시킨다. 이를 효과적으로 예방하기 위한 수단으로 핵연료의 크러드를 초음파를 이용해 제거하는 방안이 미국을 중심으로 적극 활용되고 있고, 국내에서도 울진1호기에 이어, 이번에 울진 2호기 재장전연료를 대상으로 크러드 세정기술을 적용하였다. 특히 이번에는 크러드 포집량을 평가하는 기술이 미국DEI사로부터 개발 및 소개되어 처음으로 울진2호기에 Filter Weighing을 적용하였으며, 이를 통해 크러드 포집량을 신뢰성있게 평가할 수 있었다. 본 논문에서는 최근 수행된 울진2호기 핵연료 초음파 세정 적용 결과에 대해 소개하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 수행 내용

2011년 9월 약 20일간에 걸쳐 울진 2호기 Cask Loading Pit 내에서 핵연료 이동 및 취급 시간 및 Fuel Bridge Crane 경로 등을 고려하여 핵연료 초음파 세정장치를 배치하고 세정작업을 수행하였다(Fig. 1 참조). AOA 예측 프로그램 결과를 기초로 크러드 침적량이 높게 예측되는 연료를 우선하여 1회 연소된 연료 68다발, 2회 연소된 연료 24다발을 선정하여 핵연료 초음파 세정을 실시하였다. 연료 1다발당 6~8분 동안 초음파로 세

정하였으며, 세정 효과의 육안 관찰을 위해 세정 전후의 연료 다발 표면을 비디오로 녹화하였다(Fig. 2 참조). 또한 핵연료 크러드 포집장치의 방사선량을 변화를 연속적으로 측정하여 초음파 세정이 진행되는 과정을 모니터링하였다.

#### 2.2 수행 결과

초음파발전기가 초음파세정조 상단에만 설치되어 있으므로 크러드 제거효과는 핵연료 집합체 상부에서 관찰되었다. 육안으로 관찰하였을 때 1회 연소된 핵연료 집합체 세정 효율은 20~30%, 2회 연소된 핵연료 집합체의 경우 70~80% 수준으로 분석되었다. 초음파 세정후의 핵연료에 대한 정밀육안검사 및 UT를 이용한 결합검출결과도 이상이 없는 것으로 나타났다. 초음파 인가에 의해 핵연료 집합체에서 분리되어 나온 크러드를 포집한 필터의 선량율을 관찰한 결과, 1회 연소된 핵연료 집합체의 경우 핵연료 집합체 1개당 1.0 R/hr/filter, 2회 연소된 핵연료 집합체의 경우 핵연료 집합체 1개당 3.3 R/hr/filter 만큼 증가되었다. 종전 울진 1호기와 비교하여 1회 연소연료에 대해서는 기존과 유사했으나(RF16: 1.1R/hr, RF17: 1.4R/hr) 2회 연소연료는 기존에 비해 다소간 낮게(RF16: 9.2 R/hr, RF17: 5.2R/hr) 나타나는 것을 확인하였다. 또한 울진2호기 경우 크러드 선량율의 최대값은 1회 연소된 핵연료의 경우 440~470 mR/hr, 2회 연소된 핵연료 700~750 mR/hr를 나타내어 울진1호기에 비해서 다소 낮은 것으로 나타났다. 91다발의 핵연료 초음파 세정이 완료된 후 필터 차압은 초기값 3.5에서 최종값 4.7 psid로 변경되어, 1.2 psid 정도 증가되어 크러드로 인한 필터 부하는 미미한 것으로 판단되었다. 초음파 세정이 완료된 후 필터의 누적 선량율은 평균 150 R/hr 수준을 나타내었으며, 사용 완료된 필터는 사용후연료저장조(SFP: Spent Fuel Pool) Rack에 임시 보관한 후 폐기처리될 예정이다.

수중에서의 고농도 방사화된 크러드 포집량 분석을 위해서 수중 깊이별로 4개 포인트 지점에서 무게를 측정하였으며 수심별로 수온이 다를 경우 부력에 대한 오차가 발생할 수 있어 깊이별로 수온을 측정하였으나 수온차이는 미미하였다. 물 표면으로부터 수심별 4 ft, 15.33 ft, 26.66 ft, 37 ft 지점에서 무게를 측정하였고, 핵연료 크러드 세정전과 후의 필터 무게차이를 평가하기 위하여 세정 전,후 각각 측정하였다. 그 결과 필터에 포집된 크러드 침적물은 207g으로 평가되었으며, 이 크러드량은 미국발전소의 평균범위인 100g~1000g에 속하는 것을 알 수 있었다.

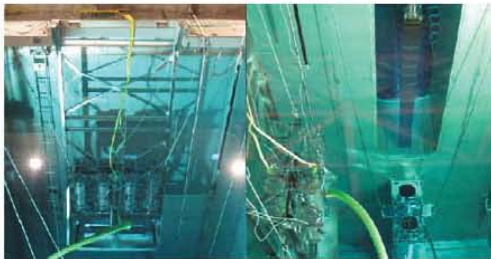


Fig 1. UFC Equipment in UCN-2 CLP.

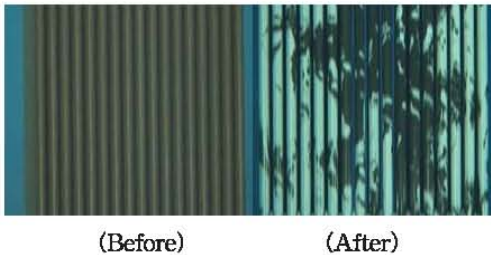


Fig 2. Appearance of Twice-Burned FA before and after Cleaning.



Fig 3. Radiation Core Map of Fuel Assembly after Cleaning.



Fig 4. Procedure of Crud Filter Weighing.

### 3. 결론

울진2호기 사용후연료저장조에서 사용후연료 91 다발을 대상으로 초음파세정을 수행하였으며, 육안검사를 통한 크러드 제거 효율은 1회 연소연료 경우 20~30%, 2회 연소연료 경우 70~80%로 분석되었다. 그리고 크러드 총 포집량은 207g으로 해외발전소 크러드량과 비교한 결과 유사한 범위 내로 분석되었다. 특히 울진2호기의 제거된 방사선량은 1개 필터당 150R/hr로써 울진1호기때보다 거의 비율적으로 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이는 울진2호기에 생성된 크러드 양이 다소 낮음을 알 수 있었다. 이로써 국내에서도 핵연료 초음파 세정을 통해 핵연료 크러드 재고량을 감소시킬 수 있는 기술적 대안이 마련됨에 따라 촉망 방향 출력불균형 현상의 발생 억제와 발전소 선량을 저감 측면에서 긍정적 효과가 기대된다. 국내원전인 울진1호기에 이어서 울진2호기 사용후연료에 누적된 크러드 양을 예측하기 위한 평가자료로 활용될 수 있다.

### 4. 참고문헌

- [1] PWR Fuel Cleaning using Advanced Ultrasonics (EPRI-1001052, Dec. 2000).
- [2] Ultrasonic Fuel Cleaning Efficacy Campaign Results at Callaway (EPRI-1003229, Jun. 2002).
- [3] Quantifying Corrosion Products Removed from FA by Ultrasonic Fuel Cleaning (EPRI-1018718, Apr. 2009).