

새로운 지침에 따른 가동원전 사용후핵연료 조밀저장대 임계평가

정성환^{1*}, 김기영¹, 김윤식², 박제호²

¹한국수력원자력(주), 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

²(주)코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 명달로 65

*sunghchung@khnp.co.kr

1. 서론

원전의 사용후핵연료 습식저장조 저장대에 대한 임계안전성 해석평가를 위하여 미국 NRC는 새로운 지침[1]을 공포하였다. 원전의 안정적 운영을 위하여 원전내 사용후핵연료 저장용량을 확보하기 위하여 국내의 대부분 경수로형 원전은 기존저장대 이외에 조밀저장대를 추가로 설치하고 있는데, 중성자흡수재의 열화문제가 부각되고 있으며, 운전에 따라 농축도/연료 제원/연료 밀도 등이 증가하고 출력증강에 따른 운전인자 변경으로 연료의 임계안전성과 관련되는 반응도 인자가 기준만족에 부정적으로 영향을 미치고 있다. 이러한 영향을 고려하여 임계평가가 복잡한 양상으로 전개되어 다양한 해석 방법 및 가정에 대하여 구체적인 지침을 수립하여 지침공포 이후의 신규저장대에 적용한다고 하고 있다. 이러한 경향에 대응하고자 평가가 완료되어 인허가를 획득한 가동원전인 한빛5,6호기 조밀저장대에 새로운 지침을 적용하여 임계안전성을 평가하고 기존평가와 비교하였다.

2. 본론

가동원전인 한빛 5,6호기 저장조의 저장대는 동일한 용량과 구조인데, Fig. 1과 같이 신연료, 재장전연료, 비상노심 저장구역(Region-I)과 사용후핵연료 저장구역(Region-II)으로 이루어져 있다. Region-I은 3개의 저장대 모듈에 250다발을 저장할 수 있으며, Region-II는 총 9개의 저장대 모듈에 1,208다발을 저장할 수 있다.

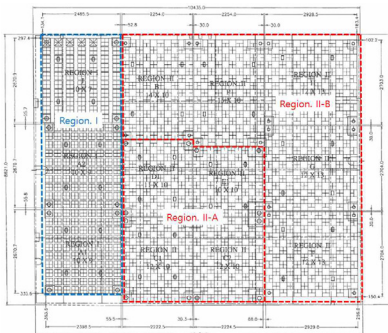


Fig. 1. Configuration of Hanbit 5&6 storage racks.

저장대의 임계안전성 기술기준은 정상 및 비정상 조건에 대한 연료의 임계사고 방지를 위하여 미임계를 유지하여야 하는데, 미국 10CFR50.68에 따르면 최대반응도의 연료가 저장대에 완전히 장전되었을 때 모든 bias와 불확실도를 포함하여 95% 신뢰도와 95% 확률조건에서 최대유효증배계수(K_{eff})가 0.95 이하이어야 한다. 이러한 기술기준을 만족시키기 위하여 임계안전성 평가를 수행하는데, 기존 평가방법과 달리 NRC의 새로운 기술지침에 따라 평가하였다. 기존평가방법과의 차이에 대하여 다음과 같이 비교하였다 :

- 평가는 SCALE6.1.3 코드의 CSAS5 모듈을 적용하였으며, 연소계산은 동일코드 내의 TRITON 모듈을 적용하였다. 중성자선속계산에 필요한 핵반응단면적 library는 기존평가의 44GROUP ENDF5 대신 238GROUP ENDF7을 이용하였다.
- 평가대상연료는 기존과 달리 저장된 한빛5,6호기에서 발생하는 모든 종류의 연료를 고려하여 평가하고 보수적인 연료를 기준으로 선정하였다.
- 코드의 유효성은 NRC NUREG/CR-6698[2]에 따라 통계적 평가와 모든 인자에 대하여 경향성 평가를 수행하였으며, OECD/NEA의 제시방법에 따라 실험자료를 선정하여 검증하고 bias 및 불확실도를 결정하였다.

Table 1. Comparison of code validation

구분	기존	신규
방법론	statistical method	NUREG/CR-6698 - population variance - confidence factor - normality
실험개수	UO ₂ 91/MOX 27	UO ₂ 236/MOX 160
경향성평가	미수행	수행

- 연소계산 bias와 불확실도는 Kopp memorandum [3] 대신 EPRI의 “연소도효과 검증을 위한 연소 벤치마크 보고서”[4]에 따라 평가하였으며, 실험자료와 코드 계산결과의 오차를 6개 연소도구간 및 11개 연료특성으로 구분하여 최대오차를 반영하였다.

- 모든 노심인자는 보수성을 근거하여 선정하였으며, 가연성 독봉은 적용하지 않았다.
- 모든 연료는 기존평가에서 고려하지 않은 NRC NUREG/CR-6801[5]에 따른 축방향 연소도분포를 적용하였다. 축방향 연소도분포는 12가지 연소도 범위를 기준으로 각각 18개 node에 대하여 나타낸다(Fig. 2).

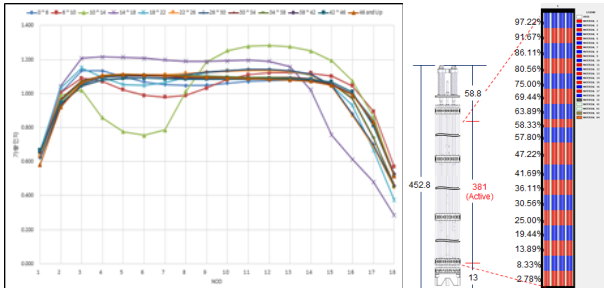


Fig. 2. Bounding axial profiles of NUREG/CR-6801.

- 연료와 저장대 제원, 저장위치, 기록연소도에 대한 불확실도 평가, 저장대간 간섭 평가 등의 민감도를 분석하였다.
- 저장대 외부 및 내부에서의 신연료 오장전 사고에 대한 평가는 물론, 기존평가와 달리 취급장비로 인한 연료낙하사고 및 자연재해인 지진사고에 대하여 각각 정량적으로 평가하였으며(Fig. 3), 정상상태에서 경수로연료 저장조의 붕산수는 2,000 ppm 이상을 유지하나, 사고조건 평가에서는 붕산수 이득을 1,000 ppm까지 제한적으로 적용하였다.

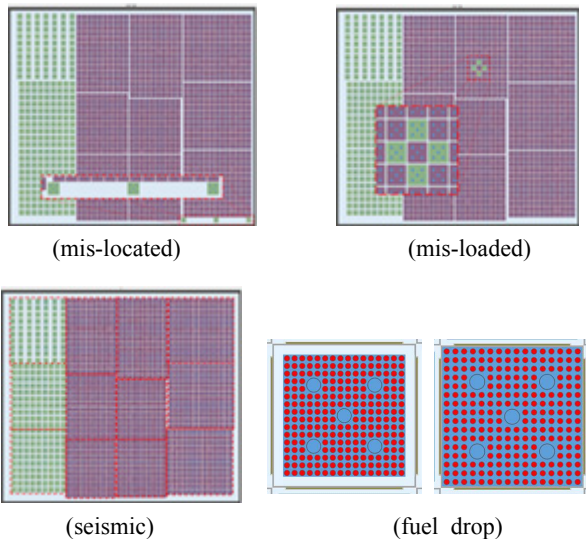


Fig. 3. Accident modeling.

- 다른 코드와의 독립검증을 위한 code-to-code 비교는 하지 않았다.
- 모든 가정사항은 보수적인 결과를 유도하도록 선정하였다.

3. 결론

가동원전인 한빛5,6호기 조밀저장대에 대하여 기존에 적용한 방법과 달리 새로이 공포된 해석평가 지침을 적용하여 임계안전성을 평가하였다. 저장대 상연료를 기준으로 평가한 결과 total bias(4종류) 및 전체 불확실도(12종류)를 포함하여 다음 식으로 구한 미임계상한치는 기준치 0.95에 대하여 0.9313이다.

$$\text{미임계상한치} = 0.95 - \sum_{i=0}^m \text{Bias}_i - \sqrt{\sum_{j=0}^m \text{Uncertainty}_j^2}$$

농축도와 연소도 구간별로 미임계상한치를 만족하는 구간까지 계산하여 조밀저장대에 저장하는 사용후핵연료의 최소연소도를 계산하고 저장가능연료를 나타내는 연소도곡선(Fig.4)을 구하였다. 그리고 사고조건에 대한 평가결과 저장조 운전조건에서 미임계상한치 이하를 유지하는 것으로 나타나 저장대의 안전성이 확보되었다. 연소도곡선은 기존방법으로 구한 연소도곡선과 비교하면 큰 차이는 아니나 일부 상향되게 나타나 저장관리에 대한 flexibility는 조금 불리하다고 볼 수는 있다.

기존방법으로 평가된 가동원전의 사용후핵연료 조밀저장대를 대상으로 축방향 연소도분포 적용 및 유효성 검증 등에 대한 새로운 평가지침을 적용하여 평가하였는데, 이는 향후 원전 사용후핵연료 저장대의 임계안전성 평가에 활용할 예정이다.

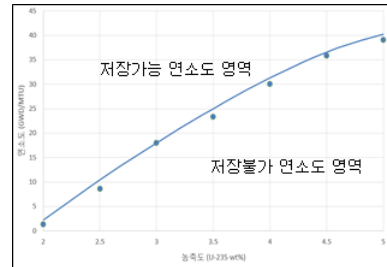


Fig. 4. Reactivity equivalence curve(REC).

4. 참고문헌

- [1] USNRC DSS-ISG-2010-01(Rev.0), Staff Guidance Regarding the Nuclear Criticality Safety Analysis for Spent Fuel Pools, 2011.
- [2] USNRC NUREG/CR-6698, Guide for Validation of Nuclear Criticality Safety Calculational Methodology, 2001.
- [3] Kopp Memorandum, Guidance on the Regulatory Requirements for Criticality Analysis of Fuelm Storage at LWR Power Plants, 198.
- [4] EPRI 1025203, Utilization of the EPRI Depletion Benchmarks for Burnup Credit Validation, 2012.
- [5] USNRC NUREG/CR-6801, Recommendations for Addressing Axial Burnup in PWR Burnup Credit Analyses, 2003.