

사용후핵연료 운반용기의 연소도고려 임계해석모델에 대한 설계여유도 분석

박덕진, 한영태, 이성희

한국전력기술(주), 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

dipark@kopec.co.kr

1. 서론

연소도고려 임계해석 시 핵연료에 대한 실제 연소상태를 반영하기 위해 다양한 조건에서의 사용후핵연료에 대한 연소 및 반응도 계산과 함께 매우 복잡한 가정이나 방법을 적용한다. 사용후핵연료에 존재하는 핵분열 핵종 및 중성자 흡수 핵종의 재고량 계산 결과를 이용하는 임계해석에서는 핵종 재고량 예측에 수반되는 불확실도와 바이어스도 고려하여야 한다. 사용후핵연료 운반/저장에 대한 임계안전 평가에서 연소도를 고려한 임계해석을 수행하는 경우 그 결과에 영향을 미치는 인자의 선과정이 인자들과 관련하여 각 해석단계에서의 불확실도 및 설계여유도 평가는 반드시 수행하여야 한다.

PWR 사용후핵연료의 핵종 재고량 예측을 위한 연소 계산의 주요 영향인자는 핵연료 온도, 냉각재 온도(밀도), 냉각재 붕소 농도 등이며, 핵종 재고량 예측과 관련한 불확실도 및 바이어스는 방사화학 분석실험 자료에 의한 검증 계산을 통하여 결정한다. 또한, 실제적인 임계해석모델을 이용하는 반응도 계산에서는 사용후핵연료의 축방향 및 반경방향 연소도 분포를 고려한 설계여유도 등도 평가하게 된다. 본 분석에서는 연소도고려 임계해석에 필요한 인자들에 의한 영향을 정량적으로 평가하였다.

2. 본론

사용후핵연료 연소 계산 및 운반용기모델에 대한 반응도 계산에는 RFA(WEC형 17x17 핵연료집합체) 핵연료를 고려하였으며, 비열출력 준위(38.781 MWt/MTU)는 연속적으로 운전되는 모든 주기 동안 일정한 것으로 가정하였다. 연소 계산 주요 영향인자에 따른 사용후핵연료 재고량 계산과 이 결과를 이용한 반응도 계산은 SCALE5.1 전산프로그램[1]의 SAS2H/ORIGEN-S와 CSAS25 모듈을, 연소도 분포에 따른 반응도 영향 계산과 핵종 재고량 예측에 대한 불확실도 및 바이어스 계산은 STARBUCS 모듈을 이용하였다. 평가에 고려한 운반용기모델은 32개의 PWR 핵연료집합체를 장전하는 GBC-32 운반용기[2]이다.

핵연료 연소 시 노심 냉각재 온도가 높아 그 밀도가 감소하게 되면 노심내 열중성자속이 경화되어(평균에너지 증가) U-238의 공명흡수가 증가하게 된다. 이에 따라 Pu 핵종의 생성이 증가되면서 U-235의 연소는 감소하게 된다. 이러한 영향으로 노심내 냉각재 온도가 증가하게 되면 신연료에 대비한 사용후핵연료의 반응도 감소는 상대적으로 줄어들게 된다. 핵연료 온도 및 냉각재 내 붕소 농도 등에 의해서도 이와 동일한 효과가 나타난다(표 1, 그림 1 참조).

사용후핵연료 축방향 연소도 분포에 따른 반응도 변화(end effect)는 핵연료 연소 시 그 상, 하부에서의 중성자속이 중간 부분에 비해 상대적으로 낮아서 발생하는데, 본 계산에서는 1, 3, 12그룹의 연소도로 구분된 축방향 연소도 분포(18마디)를 적용하여 그 영향을 분석하였다(표 1, 그림 2 참조). 노심의 반경방향 연소도 구배에 따른 반응도 계산은 1, 3그룹 연소도 분포를 고려하였다(표 1, 그림 3 참조).

사용후핵연료 핵종 재고량 예측 계산에 수반되는 불확실도와 바이어스는 연소도고려 임계해석에서 발생하는 전체적인 불확실도의 가장 큰 부분을 차지하여 고려되는 임계해석 대상의 임계안전 설계여유도에 큰 영향을 미치게 된다. 본 계산에서는 총 56개의 개별 핵연료 방사화학 분석실험 및 검증 계산 자료[3]를 이용하여 최대 불확실도를 산출하였다(표 1, 그림 4 참조). 사용후핵연료 핵종 재고량 계산 방법론과 관련한 핵종 재고량 계산의 바이어스는 양(positive)의 값을 배제하고 최대값을 산출하였다.

3. 결론

본 분석에서는 사용후핵연료 운반용기의 임계해석에서 핵연료의 연소도를 적용하기 위해 연소 계산 및 반응도 계산 주요 설계인자들에 의한 영향을 정량화하고 그 거동을 검토하였다. 이 결과는 운반용기 모델의 반응도에 대한 설계인자의 영향을 분석하여 임계여유도를 정확하게 평가하고 최종 임계해석 결과인 수용곡선/loading curve)을 생산하는데 이용될 수 있다. 그러나 연소 계산 및 반응도 계산의 주요 설계인자가 임계해석에 미치는 영향은 계산모델의 특성에 크게 의존하기 때문에 그 결과를 보편적인 값으로 산출하기는 어렵고 유사한 설계특성을 갖는 경우에만 적용 가능하다고 할 수 있다.

표 1. 전형적인 조건에서의 임계해석모델에 따른 반응도 차
(U-235 초기 농축도 : 4.0 wt%, 연소도 : 40 GWD/MTU, 냉각기간 : 5년)

임계해석모델 계산인자/특성	계산조건		Δk 값 (%)	
	기본값 적용	최대값 적용	ACTs	ACTs+FPs
o 연소계산인자				
- 핵연료 온도 (K)	860	1,000	0.47	0.50
- 냉각재 온도 (K)	584	600	1.13	0.37
- 붕소 농도 (ppm)	800	1,000	0.57	0.42
- 연소계산인자 종합 영향*	-	-	1.46	1.56
o 축방향 연소도 분포				
- 1그룹(모든 연소도에 동일 분포)	균일 축방향	1그룹/축방향 18마디	2.67	5.82
- 3그룹(3개 연소도 구간별 분포)	균일 축방향	3그룹/축방향 18마디	2.72	6.02
- 12그룹(12개 연소도 구간별 분포)	균일 축방향	12그룹/축방향 18마디	1.31	3.57
o 반경방향 연소도 구매(12그룹 축방향 연소도 분포에 대해)				
- 1그룹(모든 연소도 : ±25%)	균일 반경방향	±25% 구매	0.19	0.57
- 3그룹(3개 연소도 구간 : ±33/25/20%)	균일 반경방향	±20% 구매	0.12	0.38
o 핵종 재고량 계산 불확실도 및 바이어스(12그룹 축방향 연소도 분포 적용)				
- 최대(Bounding)값 불확실도	최적 재고량	최대(보정) 재고량	3.10	5.00
- 최대(Bounding)값 바이어스	계산된 재고량	최대(보정) 재고량	-0.44	-1.39

* 개별 연소계산인자에 대한 Δk 값의 합산이 아님

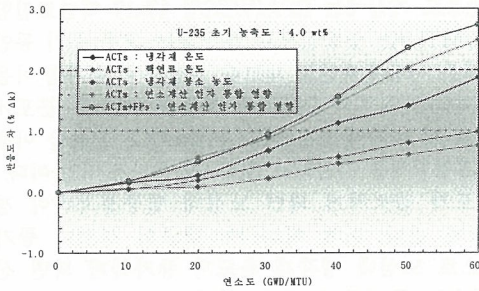


그림 1. 연소계산인자에 따른 반응도 차

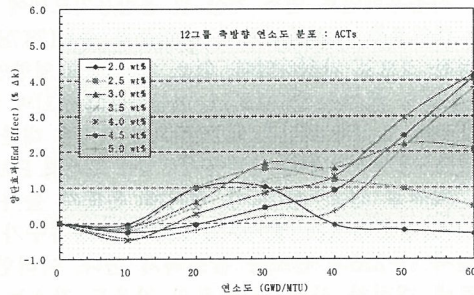


그림 2. U-235 농축도에 따른 양단효과

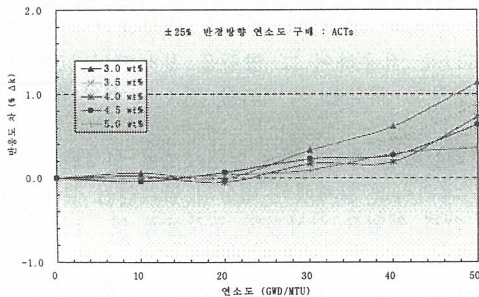


그림 3. 반경방향 연소도 구매 적용 영향

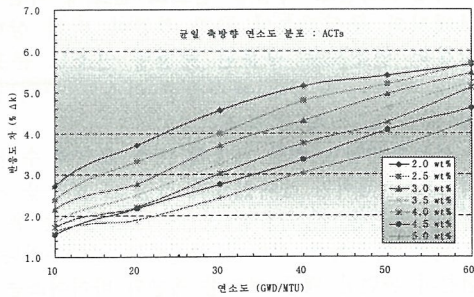


그림 4. 핵종 재고량 계산 불확실도

참고문헌

[1] SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, RNL/TM-2005/39, Version 5.1, ORNL, (2006).
 [2] J. C. Wagner, Computational Benchmark for Estimation of Reactivity Margin from Fission Products and Minor Actinides in PWR Brunup Credit, NUREG/CR-6474, ORNL, (2001).
 [3] I. C. Gauld, Strategies for Application of Isotopic Uncertainties in Burnup Credit, ORNL/TM-2001/257, ORNL, (2003).