

사용후핵연료 저장시설의 임계해석 시 연소도 고려 영향 분석

이성희, 한영태, 안준기

한국전력기술주식회사, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

shlee9@kopec.co.kr

사용후핵연료의 저장 및 수송용기의 안전을 확인하기 위한 임계 안전해석 시 고려되는 핵연료를 최대농축도의 신연료로 가정하는 것은 가장 보수적인 가정에 근거하여 해석을 수행하는 것으로 해석이 간편하며, 결과의 보수성을 보장할 수 있다. 그러나 이와 같은 과도한 보수성은 점차 그 양이 증가되는 사용후핵연료의 처리에 있어 공간적, 경제적 제약으로 작용하게 된다. 이에 따라 사용후핵연료의 연소에 의한 반응도 감소를 고려하는 연소도 고려(Burnup Credit) 임계 안전해석이 사용후핵연료 저장조 해석에 널리 적용되고 있다. 반면에 사용후핵연료 수송 혹은 건식저장을 위한 용기는 그 목적의 특수성으로 인하여 연소도를 고려한 임계해석이 적용되기는 하지만 제한적으로 허용하는 추세이며 이의 확장 적용을 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 핵연료의 연소에 따른 반응도 감소효과는 핵분열성 핵종들의 농도 변화와 중성자를 흡수하는 핵분열생성물들의 생성에 의해 발생하는데 연소된 사용후핵연료 내 구성핵종들의 양을 예측하기 위해서는 노심에서의 운전이력을 반영하는 연소계산이 수행되어야 하며, 그 계산결과가 타당한가에 대한 평가가 이루어져야 한다. 또한 연소계산 결과를 보수적으로 예측하기 위해 각 연소이력 변수들을 설정하는 것도 필요하다고 하겠다. 연소도 고려 임계해석 시 사용후핵연료 내 구성핵종 중 악티나이드 계열 핵종과 핵분열생성물 핵종의 제한적 적용은 임계해석 결과에 상당한 영향을 주게 되며, 고려되는 핵종에 따른 임계해석 평가 분석은 사용후핵연료 수송 및 저장용기 설계 시 주요 참고자료로 활용될 수 있다. 연소도 고려 임계해석 시 사용후핵연료 내 핵종 적용 범위에 따른 영향 평가를 위해 고려한 모델은 전형적인 사용후핵연료 저장 셀이다. 사용후핵연료가 수용되는 저장 셀은 중성자흡수물질인 보랄(BORAL)이 사면으로 부착된 스테인레스 스틸 구조물로, 이 저장 셀이 무한 배열되어 있다고 가정하였다. 사용후핵연료 수송 및 저장용기의 임계해석인 경우 저장 셀이 유한배열 형태를 가지게 되지만 모델의 단순화 및 경계조건에 의한 영향을 배제하고 고려되는 핵종의 영향만을 평가하기 위해 무한 배열 모델을 가정하였다. 임계해석 시 고려한 사용후핵연료는 PLUS7 UO_2 핵연료로 초기농축도 5.0 wt%, 연소도 36 GWD/MTU, 연소 후 냉각기간은 각각 0, 5년을 가정하였다. 임계 안전해석 설계 기준은 유효중배계수(k-eff)가 0.95 이하이지만, 본 평가에서는 계산의 바이어스, 불확실도, 여유도 등을 고려하여, 0.92를 목표값으로 설정하여 분석을 수행하였다. 고려된 핵종들은 12개의 악티나이드 핵종(U-234, U-235, U-236, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Am-241, Am-243)과 15개의 주요 핵분열생성물 핵종(Mo-95, Tc-99, Ru-101, Rh-103, Ag-109, Cs-133, Nd-143, Nd-145, Sm-147, Sm-149, Sm-150, Sm-151, Sm-152, Eu-153, Gd-155)이며 각각의 조건에서의 평가 결과는 표 1과 같다.

표 1. 고려된 핵종, 연소후 냉각기간에 따른 유효증배계수 및 임계안전을 위한 셀 간 최소거리

저장 셀 간격 (pitch)	신연료 가정 (5.0 wt%)	사용후핵연료(초기농축도: 5.0 wt%, 연소도: 36 GWD/MTU)			
		냉각기간 : 0 (없음)		냉각기간 : 5년	
		Actinides	Actinides+FPs	Actinides	Actinides+FPs
27.0 cm	0.89579	0.76993	0.71820	0.76039	0.69851
26.5 cm	0.91471	-	-	-	-
26.0 cm	0.93528	-	-	-	-
24.5 cm	1.01843	0.87483	0.81638	0.86201	0.79472
23.0 cm	-	0.90573	0.84581	0.89391	0.82383
22.5 cm	-	0.94347	0.87922	0.93126	0.85760

표 1은 신연료 가정 하에 해석된 결과와 비교해 연소도를 고려한 임계해석 결과는 유효증배계수가 상당히 감소함을 보여주며, 냉각기간의 경과에 따른 반응도 감소효과는 매우 미미한 것으로 나타났다. 또한, 연소도 고려 임계해석 시 가장 큰 영향을 미치는 것은 노심연소에 따른 악티나이드 핵종 구성의 변화이며 핵분열생성물 축적에 의한 효과는 그 반 정도로 나타났다. 연소되지 않은 신연료를 가정하는 임계 안전해석을 적용하면 저장 셀 간 피치는 적어도 26.5 cm 이상 유지되어야 하지만 악티나이드 핵종에 대해 제한적으로 연소도를 고려하는 경우 23.0 cm의 피치가 가능하며, 만일 핵분열생성물의 축적까지 고려하는 경우에는 최소한의 물리적 이격거리만으로 임계 안전이 유지된다. 악티나이드 핵종만을 고려하는 제한적인 연소도 고려 임계해석의 경우 핵분열 생성물까지 고려하는 임계 안전해석과 비교하여 0.05 Δk 이상의 여유도가 있는 상태이며, 수송 및 저장용기의 구조특성을 고려한다면 굳이 핵분열생성물까지 고려하여 임계해석을 수행하지 않아도 될 것으로 판단된다. 이와 같이 연소도를 고려한 해석을 적용하면 저장 셀 간의 피치를 줄여 수송용기의 경우 부피와 무게를 줄이거나 동일한 수송용기로 상대적으로 더 많은 사용후핵연료를 수용할 수 있어 사고위험 및 방사선 피폭을 감소시킬 수 있다. 결론적으로, 노심에서의 연소에 의해 변화되는 사용후핵연료 내 구성핵종들의 농도 변화에 따른 반응도 감소효과를 적절히 고려한다면, 임계 안전해석의 보수성을 유지하면서도 수송 및 저장용기의 설계 시 경제성을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.