

연소도고려 임계해석에 반영하는 핵종의 단면적자료 특성 분석

박덕진, 안준기

한국전력기술(주), 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

djpark@kopec.co.kr

사용후핵연료 저장시설 또는 수송용기에 대한 임계안전 해석에서 연소된 사용후핵연료에 존재하는 액티나이드 및 핵분열생성물 핵종들의 재고량을 고려하면 연소되지 않은 신연료를 가정하는 경우보다 그 반응도가 상대적으로 낮아진다. 이와 같이 노심에서의 연소에 의해 사용후핵연료의 반응도가 낮아지는 것을 임계안전 해석에서 고려하는 것을 연소도고려(Burnup Credit : BUC) 임계해석이라 한다. BUC 임계해석은 핵연료에 대한 연소 계산을 통해 사용후핵연료의 구성 핵종 및 그 재고량을 평가한 후 이를 반영하여 반응도를 계산하게 되므로 신연료를 가정하는 임계해석과 비교하여 그 해석절차가 복잡하다. 또한, BUC 임계해석은 사용후핵연료 연소 계산의 타당성 및 해석 결과의 보수성과 설계 여유도 등에 대한 적절성 확인 등의 추가적인 분석을 요구한다.

사용후핵연료의 구성 핵종과 재고량 계산은 SCALE4.4 전산코드^[1]의 SAS2H/ORIGEN-S 모듈 체계를 이용하였으며, 노심 연소 계산의 기본적인 입력자료는 핵연료봉 및 핵연료집합체의 기본 치수 자료, U^{235} 초기농축도 및 노심 장전량, 노심 열출력 준위, 노심 운전 조건, 연소 이력 등이 다.

핵연료 연소 계산에 의해 계산된 사용후핵연료의 구성 핵종 중 BUC 임계해석에서 반영하는 액티나이드 및 핵분열생성물 핵종들의 흡수 거시단면적(Σ_v)과 핵분열 거시단면적(Σ_f)을 사용후핵연료의 방출연소도, 냉각기간 등과 비교하여 검토, 분석하였다. 사용후핵연료 구성 핵종의 흡수단면적과 핵분열 단면적은 사용후핵연료의 반응도를 결정하는데 가장 중요한 직접적인 요소이다. 액티나이드 및 핵분열생성물 핵종의 중성자 흡수단면적과 핵분열 단면적자료 평가는 핵연료집합체 내의 중성자에너지 스펙트럼을 고려한 단면적자료가 아닌 열중성자($E=1/40$ eV)의 흡수단면적(σ_v)과 핵분열단면적(σ_f)을 기준으로 수행되었다. BUC 임계해석에 반영하는 사용후핵연료 구성 핵종 선정은 핵종의 존재 안정성(취발성), 중성자 반응 단면적의 크기, 재고량 등을 냉각기간을 고려하여 수행하며, 재고량 측정치와 비교한 검증 가능성 여부 등도 고려하게 된다.

액티나이드에 대해서는 열중성자 흡수 및 핵분열 단면적 크기를 기준으로 48 핵종을 고려하였는데, 이 중 U^{234} , U^{235} , U^{236} , U^{238} , Pu^{238} , Pu^{239} , Pu^{240} , Pu^{241} , Am^{241} , Am^{243} , Np^{237} 등 12 주요 핵종^[2]의 Σ_v , Σ_f 값의 합은 고려된 전체 48 핵종에 대한 합 99% 이상을 차지하여 12 주요 핵종의 고려는 모든 액티나이드 핵종을 고려하는 것으로 가정할 수 있다. 액티나이드 중 U^{235} 와 U^{238} 의 Σ_v , Σ_f 의 합은 연소도가 증가할수록 신연료에 비하여 대폭 감소된다. 표 1에 U^{235} 와 U^{238} 의 Σ_v , Σ_f 의 합을 전체 액티나이드의 Σ_v , Σ_f 의 합에 대한 비율로 연소도 및 냉각기간에 따라 나타내었다. BUC 임계해석에서 반영하는 주요 핵분열생성물은 Mo^{95} , Tc^{99} , Ru^{101} , Rh^{103} , Ag^{109} , Cs^{133} , Nd^{143} , Nd^{145} , Sm^{147} , Sm^{149} , Sm^{150} , Sm^{151} , Eu^{151} , Sm^{152} , Eu^{153} , Gd^{155} 등 16 핵종^[2]이다. 표 1에 반영된 핵분열생성물 핵종의 Σ_v 값의 합을 Xe 동위원소 및 반감기가 짧은 핵종을 제외한 전체 핵분열생성물 핵종의 Σ_v 값의 합에 대한 비율로 나타내었다. 고려된 핵종들의 Σ_v 값의 합이 전체에서 차지하는 비율은 냉각기간에 따라 더 증가하게 되며 하며, 동일한 냉각기간을 가정하는 경우에는 연소도가 높을수록 전체에서 차지하는 비율이 감소되는 경향을 보인다. 그림 1, 2에 U^{235} 와 U^{238} , 이를 제외한 주요 액티나이드(10 핵종) 및 핵분열생성물(16 핵종)에 대한 Σ_v , Σ_f 값의 합을 연소도에 따라 나타내었다. 핵연료 연소에 따른 U^{235} 와 U^{238} 의 Σ_f 값 감소는 액티나이드 생성에 의한 Σ_f 값 증가보다 더 커서 연소도가 증가할수록 사용후핵연료의 반응도가 감소하게 된다. 또한, 핵연료 연소에 따른 U^{235} 와 U^{238} 연소에 의한 Σ_v 값 감소보다 액티나이드 및 핵분열생성물의 생성에 의한 Σ_v 값 증가가 더 크므로 연소도가 증가할수록 사용후핵연료의 반응도는 더 감소하게 된다. 그림 3에 제시된 냉각기간에 따른 주요 액티나이드(12 핵종) 및 핵분열생성물(16 핵종)의 Σ_v , Σ_f 값의 합은 냉각기간에 따라 Σ_f 값은 감소하고, Σ_v 값은 증가하는 경향을 보여준다. 따라서 사용후핵연료는 동일한 연소도를 가지더라도 냉각기간이 경과함에 따라 반응도가 감소된다.

결론적으로 주요 액티나이드(12 핵종)의 Σ_f 값의 합은 전체 액티나이드 핵종 값과 동일하다고 할 수 있으며, 연소에 따른 초기 장전된 우라늄의 Σ_f 값 감소가 액티나이드 생성에 의한 Σ_f 값 증가보다 더 커 연소도에 따라 사용후핵연료는 그 반응도가 감소된다. 또한 장전된 우라늄 연소에 의한 Σ_v 값 감소보다 액티나이드 생성에 의한 Σ_v 값 증가가 더 크기 때문에 연소도에 따라 반응도는 더욱 감소된다. 액티나이드 생성에 의한 Σ_v 값 증가가 핵분열생성물 생성에 의한 Σ_v 값 증

가보다 약 2~3배 크게 나타나므로 BUC 임계해석에서 중성자흡수물질 생성 효과는 액티나이드에 의한 효과가 가장 크다고 하겠다. 또한, 핵분열생성물 핵종을 선별적으로 고려하는 것은 연소도 및 냉각기간 별로 전체 핵분열생성물 Σ_v 값의 70~90 % 정도만 반영하는 것이므로, 이는 BUC 임계해석의 추가적인 설계 여유도를 제공한다고 하겠다. 본 평가는 사용후핵연료의 소내 저장, 수송, 임시 저장 등을 위하여 냉각기간을 40 년까지 고려하였으며, 냉각기간이 훨씬 긴 영구 처분 등에 있어서는 다른 경향을 보일 수도 있음을 유의하여야 한다.

표 1. 전체핵종에 대한 고려핵종의 Σ_v , Σ_f 값 비율

연소도 (MWD/MTU)	냉각기간에 따른 Σ_v , Σ_f 비율 (%) (U^{235} 초기농축도 : 4.5 wt%)							
	$\Sigma_v, \Sigma_f (U^{235} + U^{238})$				Σ_v (핵분열생성물 16 핵종)			
	0	5 y	10 y	40 y	0	5 y	10 y	40 y
15,000	64, 70	63, 70	63, 70	63, 71	73	89	91	92
30,000	48, 50	47, 50	47, 51	46, 53	71	86	89	91
45,000	39, 33	38, 34	38, 35	37, 37	68	84	87	90
60,000	33, 19	32, 20	32, 21	31, 23	65	81	85	89

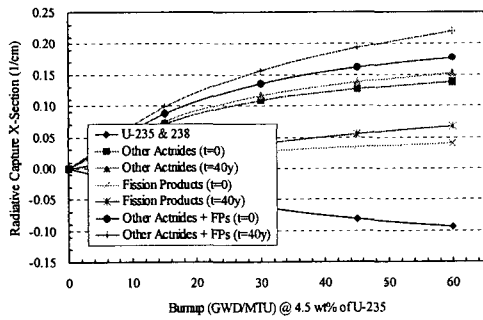


그림 1. 연소도에 따른 Σ_v 값 변화

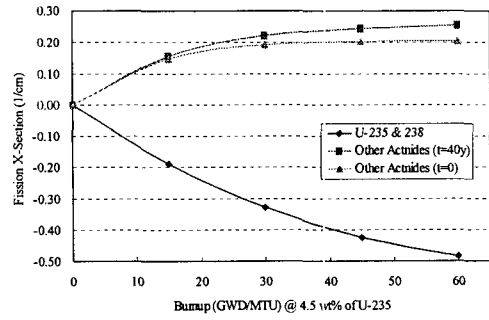


그림 2. 연소도에 따른 Σ_f 값 변화

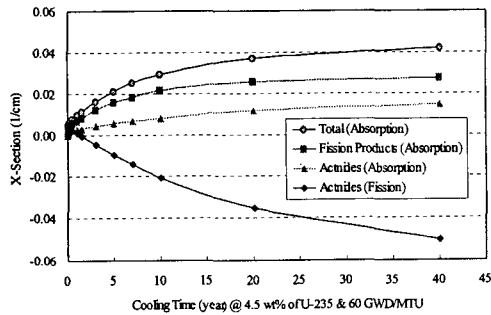


그림 3. 냉각기간에 따른 Σ_v , Σ_f 값 변화

참고문헌

1. C00545/MNYCP00, "SCALE 4.4 : Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstations and Personal Computers," ORNL, 1998.
2. C.V. Parks, M. D. Dehart, and J. C. Wagner, "Phenomena and Parameters Important to Burnup Credit," pp. 233-247 in *Proc. of IAEA Technical Committee Meeting on the Evaluation and Review of the Implementation of Burnup Credit in Spent Fuel Management Systems*, July 10-14, 2000, Austria.