

처분시스템 설계를 위한 ORIGEN2 및 ORIGEN-ARP 선원항 비교 분석

조동건, 최종원, 이종열, 최희주, 김성기

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

dkcho@kaeri.re.kr

현재, 전세계적으로 440기의 원자력발전소가 가동 중에 있으며, 이로부터 발생한 사용후핵연료는 약 255,000톤(2003년 초 기준)에 달하고 있다. 국내에는 20기의 원자로가 가동 중에 있으며, 이로부터 발생한 사용후핵연료는 2004년 12월 기준으로 PWR 핵연료 3,400톤, CANDU 핵연료 3,900톤에 달하고 있다. 이처럼 많은 사용후핵연료의 관리방안으로 영구처분시스템을 안전하게 설계하기 위해서는 연소된 핵연료로부터 기인하는 붕괴열, 방사능 세기, 핵종농도, 유해도 등의 특성을 정확히 알아야 한다. 지금까지, 처분시스템 설계에 필요한 사용후핵연료 특성 정량화를 위하여 주로 ORIGEN2 코드가 사용되어 왔으나, 1991년 이후부터 더 이상의 코드개발이 이루어지지 않았고, 현 핵연료의 추세가 ORIGEN2 코드가 중점적으로 개발된 1980년대와 비교하여 고연소도를 지향하고 있으므로 이 코드를 사용함에 있어 신뢰도에 대한 의문이 제기될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 새로 개발된 ORIGEN-ARP 코드를 이용하여 사용후핵연료에 대한 정량화를 수행하여 기존의 ORIGEN2 선원항 해석 결과가 ORIGEN-ARP(이하 ARP)으로 평가된 결과와 비교하여 어느 정도의 차이를 나타내는지를 산정하여 ORIGEN2 선원항 해석 결과를 입력자료로 활용하여 생산된 기존 처분시스템 설계 자료의 타당성을 검토하였다.

ORIGEN2와 ARP의 특징을 소개하면 표 1과 같다. 표에서 보듯이, ORIGEN2에 비해 ARP의 장점은 첫째, 핵반응단면적라이브러리를 핵연료 제원에 맞게 사용자가 직접 생산하여 해석할 수 있고, 둘째, 중성자 스펙트럼 계산 능력이 현저히 향상되었으며, 셋째, 최근의 핵자료를 기본으로 하고 있으며, 넷째, DOE 및 NRC의 지원 하에 검증작업이 광범위하게 수행되는 것 등이다.

Table 1. Major Characteristics of ORIGEN2 and ORIGEN-ARP

ORIGEN2	ORIGEN-ARP
Limited libraries/hardwired data	Flexible modular design - cross-section generation based on assembly design
No neutron spectra	Comprehensive neutron source - spontaneous fission for 41 actinides - (a,n) reaction for 89 a-emitting actinides, 7 a-emitting fission product, 19 light target nuclides - delayed neutron for 105 fission products
Hardwired gamma group spectra	User-specified energy group for neutron/gamma spectra
No data improvement	Data reliability improvement - completely updated cross section data(ENDF/B-VI, FENDL, EAF) - implementation of ENDF/B-VI fission product yields for 30 actinides and 1,119 fission products - Master photon library with ENDF/B-VI and ENSDF for 2,101 nuclides
No V&V for burnup	Extensive V&V for burnup
No code/data development	Active code/data development sponsored by DOE & NRC

본 연구에서 비교 계산을 위해 고려한 사용후핵연료는 17×17 Westinghouse 표준형으로 Korea Optimized Fuel Assembly(KOFA)이다. 저연소도 핵연료(low-burnup fuel)로 초기 농축도 4.0wt.%, 방출연소도 45GWD/MTU를, 고연소도 핵연료(high-burnup fuel)로 초기 농축도 4.5%, 방출연소도 55GWD/MTU를, CANDU 사용후핵연료로 초기농축도 0.7wt.%, 방출연소도 7.5GWD/MTU를 선정하였다. ORIGEN2 및 ARP 계산 시 연소이력, 물질조성 등은 상호간에 동일한 값을 적용하였다.

사용후핵연료에서 방출되는 붕괴열은 처분시스템 내에 존재하는 공학적방벽 및 천연방벽의 성능을 저하시키므로 이를 정확히 산정하여야 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 총붕괴열은 초기 10년까지는 핵분열생성물에 의한 오차를 반영하여 ARP의 결과가 낮게 나타났으며, 10~1000년 사이에는 핵분열생성물과 액티나이드에 의한 오차가 서로 상쇄되면서 높게 나타나다가, 1000년 이후에는 액티나이드에 의한 오차를 반영하여 낮아지는 경향을 보였다. 저연소도 및 고연소도 PWR 핵연료의 경우 총붕괴열에 대한 ARP의 계산결과가 5년 시점에서 각각 3% 및 4% 정도 낮게 나타났으며, 100년 시점에서는 각각 1.2% 및 2% 정도 높게 나타났다. CANDU 핵연료의 경우에는 5년 시점에서 2%정도 낮게 나타나다가 100년 시점에서는 5% 정도 높게 나타났다. 사용후핵연료로부터 발생하는 방사선은 처분 시 작업자에 대한 피폭과 처분 후에는 처분용기 주변물질에 방사분해를 일으켜 산화물을 생성하고 부식을 야기 시켜 용기자체의 성능을 저하시킬 수 있으므로 중요하다. 그림 2에서 보듯이 액티나이드 핵종의 총방사능은 원자로 방출직후 가장 큰 오차를 보이며, 고연소도 PWR 핵연료의 경우 약 20%, CANDU 핵연료의 경우 15% 정도의 오차를 나타냈다. 고연소도로 갈수록 액티나이드가 더 많이 생성(buildup)되어 이에 의한 오차는 더 커지는 것으로 나타났다. 총 방사능은 세 가지 경우에 대해 100년 이내의 시점에서 보면 최대 5% 정도까지 ARP이 크게 평가하였다.

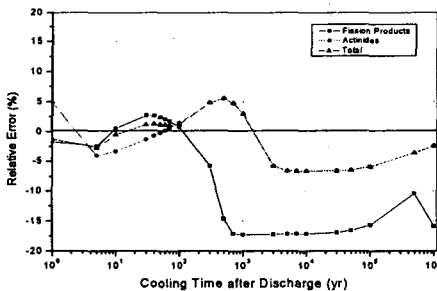


Fig. 1. Comparison of decay heat for low-burnup PWR spent fuel

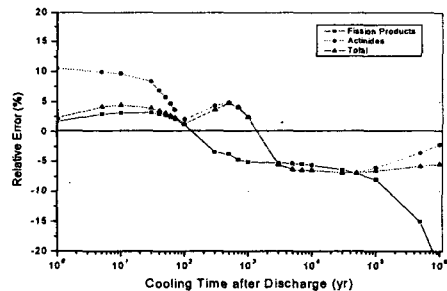


Fig. 2. Comparison of radioactivity for low-burnup PWR spent fuel

방사선차폐 관점에서는 선원의 스펙트럼 또한 중요도를 갖는다. 그림 3에서 보듯이, 감마선에 대한 각 그룹별 오차는 50% 이내에서 일치하고 있음을 볼 수 있으나, 2.0~2.5MeV 영역의 오차는 매우 크게 나타났다. 이는 핵자료의 개선으로부터 기인한 것으로 보인다. 중성자에 대해서는 ORIGEN2가 스펙트럼을 제공하지 않으므로 여기서는 사용후핵연료의 주 중성자 선원이 되는 (α, n) 반응 및 자발핵분열 반응에 의한 중성자선원의 크기를 비교하였다. 평가결과, (α, n) 반응에 의한 차는 최대 55%, 자발핵분열에 의한 중성자는 최대 140% 정도의 상대오차를 나타냈다. 사용후핵연료 내에 존재하는 액티나이드 및 핵분열생성물의 농도는 핵임계도 평가 또는 사용후핵연료 또는 고준위폐기물 내 방사성 물질의 용출거동 규명에 필요한 입력자료로 활용되므로 중요하다. 그림 4에서 보듯이, 핵임계에 기여도가 큰 핵종인 ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu는 각각 6%, 9%, 7% 정도의 차이를 보였으며, 용출거동에 중요한 ²³⁷Np의 경우는 최대 20% 정도의 오차를 나타냈다.

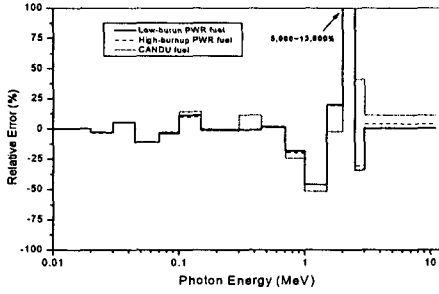


Fig. 3. Comparison of photon spectra for each fuel

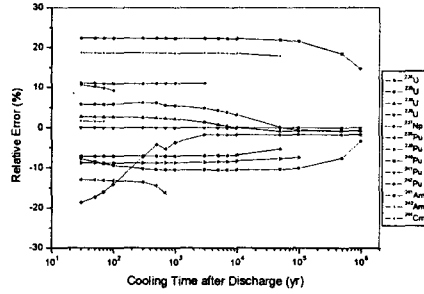


Fig. 4. Comparison of actinide concentration for low-burnup PWR fuel

신뢰도가 높은 ORIGEN-ARP을 통해 ORIGEN2로부터 산출된 선원항을 분석한 결과, 붕괴 열, 방사선의 세기에서는 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 선원스펙트럼, 액티나이드 핵종 농도에서는 큰 차이를 나타냈다. 따라서, 처분시스템 설계를 위해 수행된 기존의 열해석 결과는 신뢰성에 문제가 없으나, 차폐 및 핵입계 계산은 기존에 수행된 결과를 추가로 검토하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.