

사용후핵연료 저장대 구조물의 방사선조사량 평가

안준기

한국전력기술주식회사, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

igahn@kopec.co.kr

1. 서론

가혹한 방사선환경에 노출되는 기기 및 구조물은 그 수명 기간동안 방사선 조사로 인하여 그 성능이 저하되지 않도록 내방사선 요건을 반영해 설계해야 하는데 주로 고려하는 항목은 고속중성자($E > 1.0 \text{ MeV}$) 조사량과 전체 방사선량이다. 노심에서 연소된 후 방출되어 원전의 사용후핵연료 저장조에 습식 상태로 저장되는 사용후핵연료집합체 주변은 방사선량률이 매우 높아 주변 기기나 구조물의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 사용후핵연료가 방출된 직후 저장되는 핵연료저장대 구조물에서의 고속중성자 조사량과 감마방사선량을 평가하였는데 그 대상으로 APR1400 원전인 신고리 3,4호기 노심에서 연소된 후 방출되는 PLUS7 사용후핵연료와 이를 저장하는 신고리 3,4호기 사용후핵연료 영역 I 저장대를 설정하였다. 신고리 3,4호기 노심에 장전된 후 방출되는 PLUS7 사용후핵연료집합체의 중성자 및 감마 방사선원항은 SCALE4.4 전산코드[참고문헌 1]의 SAS2H/ORIGEN-S 모듈을 이용하여 계산하였으며, 노심에서 방출된 사용후핵연료가 저장되어 있는 영역 I 저장대 구조물에서의 고속중성자 조사량과 감마방사선량은 MCNP5 전산코드[참고문헌 2]를 이용하여 계산하였다. MCNP5 전산코드는 Monte Carlo 방법을 이용하여 입자 수송계산을 수행하며 3차원 기하학적 모델이 가능하고 연속 핵단면적 자료를 사용한다.

2. 본론

사용후핵연료집합체의 방사선원항을 SCALE4.4 전산코드의 SAS2H/ORIGEN-S 모듈을 이용해 계산하였는데 그 주요 입력은 노심 출력준위, 연소 주기 길이, 냉각제 붕소 농도 등 노심 운전 자료와 핵연료와 핵연료봉에 대한 구성 물질, 기하학적 형상 등과 노심 방출 후 냉각기간이다. 입력 자료는 신고리 3,4호기 노심 및 PLUS7 핵연료집합체 설계 자료에 근거하여 노심출력준위 16.858 MWt/FA, 연소 주기 3주기, 노심 주기 길이 480 EFPD, 방출연소도 56,350 MWD/MTU를 적용하였다. 중성자선원은 핵연료내에 생성된 자발핵분열 핵종의 핵분열에 의한 중성자 및 액티나이드 핵종의 α 붕괴에 수반되는 (α, n) 반응에 의한 중성자를 모두 고려하였고 감마방사선원은 핵분열생성물, 액티나이드 핵종과 그 자핵종, 구조물의 방사화반응에 의해 생성된 방사화핵종의 붕괴 감마선원을 모두 고려하였다. 신고리 3,4호기 노심조건에서 연소된 PLUS7 핵연료의 방사선원항이 냉각기간에 따라 표 1에 제시되어 있다. 감마방사선원은 그 주종을 이루는 핵분열생성물의 대다수가 반감기가 비교적 짧아서 냉각기간 경과에 따라 방사선원 세기가 급격히 감소하지만 중성자선원은 그 근원이 되는 액티나이드 핵종 대부분이 반감기가 길기 때문에 발전소내의 단기적 냉각기간 경과에 따른 방사선원항 감소는 미미하다.

표 1. PLUS7 사용후핵연료 방사선원항 (출력준위 : 16.858 MWt/FA, 방출연소도 56,350 MWD/MTU)

냉각시간 (일)	3	5	10	15	30	60	180	365	520
중성자선원(n/s/FA)	1.24E+09	1.24E+09	1.23E+09	1.22E+09	1.20E+09	1.17E+09	1.05E+09	9.55E+08	9.08E+08
감마선원(γ /s/FA)	7.85E+17	5.85E+17	3.65E+17	2.83E+17	1.96E+17	1.37E+17	7.01E+16	4.19E+16	3.19E+16

사용후핵연료 저장대 위치에서의 중성자속 및 감마선량률 계산을 위한 방사선 수송해석은 MCNP5 전산코드를 이용하여 수행하였다. MCNP5 기하학적 모델 구성시 16x16 PLUS7 핵연료집합체는 각 핵연료봉을 핵연료 펠렛, 피복관, 냉각제 영역으로 구분해 사실 그대로 모델링 하였으며 집합체내의 안내관도 실제 형상대로 모델링 하였다. 또한, 영역 I 저장대 셀의 구조물과 중성자흡수재판(BORAL), 중성자흡수재판고정체 등도 형상의 변경 혹은 생략 없이 사실대로 모델링 하였다. 그러나, 사용후핵연료가 저장된 영역 I 저장대 셀이 평면적으로 무한히 배열되어 있으며, 핵연료 축 방향 길이도 무한 길이로 가정하여 방사선속의 누설이 없는 보수적인 모델을 설정하였다. MCNP5 코드에서 중성자 및 감마선 수송계산에 사용한 핵단면적 자료는 ENDF/B-VI 핵자료를 근거로 하는 연속 핵단면적 자료이다. 사용후핵연료의 중성자 및 감마 방사선원은 사용후핵연료가 원자로정지 후 재장전 운전으로 노심에서 방출되어 영역 I 저장대에 저장되기까지의

최소 경과시간을 고려하여 3일의 냉각기간을 고려하였다. 원자로정지후 냉각기간의 경과에 따른 사용후핵연료 저장대 영역 I 저장대 구조물 위치에서의 고속중성자속과 감마방사선량은 각각 그림 1,2와 같이 계산되었다. 감마선량률은 냉각기간 경과에 따라 급격히 감소하지만 고속중성자속은 냉각기간 경과에 따른 감소가 미미한데 이는 냉각기간에 따른 중성자 및 감마 방사선원항의 감쇄특성과 동일한 것이다.

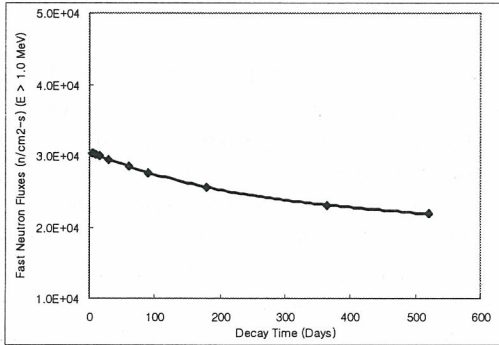


그림 1. 핵연료저장대 구조물 고속중성자속

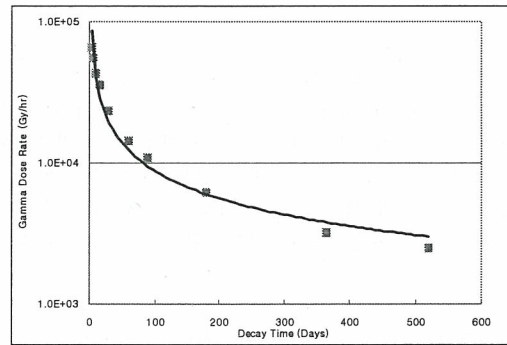


그림 2. 핵연료저장대 구조물 감마선량률

재장전 운전으로 영역 I 저장대에 저장되었던 사용후핵연료집합체는 영역 I 저장대에 계속 저장되는 것이 아니라 노심 운용 전략에 따라 노심에 다시 재장전되거나 영역 II 저장대로 옮겨서 장기간 저장되며, 다음 재장전 주기에는 후속 노심에서 방출되는 사용후핵연료가 저장된다. 노심 주기 길이, 재장전 운전 기간, 저장된 사용후핵연료의 연쇄적 이동 등을 고려하고 핵연료저장대 설계 수명을 40년으로 가정하면 설계수명 기간동안 저장대 구조물의 누적 고속중성자조사량과 누적 흡수감마선량은 각각 $1.0E+13$ n/cm², $2.0E+09$ Gy를 넘지 않을 것으로 예측된다.

3. 결론

APR1400 원전인 신고리 3,4호기 노심에서 연소된 후 방출된 PLUS7 사용후핵연료에 대한 중성자선원 및 감마방사선원, 해당 핵연료집합체가 저장된 사용후핵연료 저장대 구조물에서의 고속중성자속, 감마선량률과 그 누적량을 평가하여 제시하였다. 해당 자료는 사용후핵연료 저장대 구조물과 그 부속물 혹은 결합연료 탐지를 위한 장비 등과 같이 사용후핵연료집합체에 인접하여 존재하는 구조물이나 작동되어야 하는 장비에 대한 방사선환경 요건의 설정 혹은 기기의 방사선 환경 검증 자료로 사용될 수 있다.

또한, 본 방사선량 평가는 신고리 3,4호기 노심 운전 조건, PLUS7 핵연료 자료, 신고리 3,4호기 사용후핵연료 영역 I 저장대를 대상으로 수행하였으나, 국내에서 운전 중인 가압경수로 원전의 노심 출력 준위 (MWt/FA), 핵연료집합체 설계 자료, 방출연소도, 사용후핵연료 저장대 형상 및 설계 자료 등 주요 입력 변수를 비교해 보면 국내 모든 원전은 전반적으로 동일한 범주 내에 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 방사선량 평가 결과는 국내에서 운전 중인 가압경수로 원전의 사용후핵연료 방사선원 및 주변 방사선량에 대한 전형적인 자료라고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] SCALE4.4 : Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstation and Personal Computers, C00545/MNYCP00, Oak Ridge National Laboratory, 1998.
- [2] MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, 2003 (Revised 2005).