

MCNPX를 이용한 사용후핵연료 연소도측정용 CZT 검출기 설계

박준식, 이태훈, 신희성, 김호동, 김용균*, 박세환

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

*한양대학교, 서울시 성동구 행당동 한양대학교

ex-spark@kaeri.re.kr

1. 서론

핵연료의 저장시설 및 수송용기 설계 시 우선적으로 고려해야 할 요소는 핵임계 안전성이다. 사용 후 인출된 핵연료 내부의 핵종 구성은 필연적으로 처음 세연료와 비교하여 상당한 차이를 가지게 되므로 연소도 효과(burnup credit)를 고려한 핵임계 해석을 통한 저장 및 수송용기의 최적화가 필요하다. 사용후핵연료의 연소도를 추정하기 위하여 주로 사용되고 있는 지표 중 한 가지는 핵연료 내부에 생성되는 Cs-134, Cs-137 핵종 비이며 이 핵종의 양을 감마선 에너지 분광분석법을 이용하여 측정하게 된다.

사용후핵연료에서 발생되는 감마선 에너지 분광에 사용되는 검출기로 Cadmium Zinc Telluride(CZT) 반도체 검출기를 고려할 수 있으며 에너지 분해능은 HPGe 검출기보다 떨어지나 에너지 캡의 간격이 크기 때문에 따로 냉각장치를 구현할 필요 없이 상온에서 사용할 수 있다는 이점이 있다. 본 연구에서는 집합체 외면에서 감마선 검출을 위한 CZT 검출기 설계를 MCNPX 시뮬레이션 통하여 수행하였다.

2. 본론

사용된 CZT 검출기와 차폐체의 구성은 아래 그림과 같다.

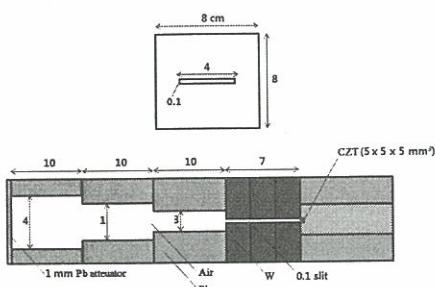


Fig. 1. Dimension of the CZT crystal and surrounding shielding materials.

이 때 검출기를 계수율이 가장 높을 것으로 예상되는 지점인 핵연료집합체 축방향의 중심에 위치시키고 검출기와 핵연료집합체와의 거리 및 텅스텐 블록의 길이 변화에 따른 계수율 변화를 MCNPX 시뮬레이션 코드를 사용하여 계산하였다.

2.1 Source term 계산

14×14 핵연료집합체를 대상으로 균질한 UO₂로 이루어진 20cm×20cm×360cm 크기의 cell을 선원체적으로 고려하였다. 방출되는 감마선원의 에너지분포를 SCALE 6 전산해석 코드를 사용하여 계산하였으며 3.199 wt%의 ²³⁵U의 농축도를 가진 UO₂ 핵연료집합체가 3-cycle 과정을 거쳐 인출된 후의 잔류핵종으로부터 방출되는 감마선의 에너지 분포를 MCNPX 시뮬레이션의 선원형으로 사용하였다. 사용후핵연료의 냉각기간은 29년이었으며 사용된 감마선의 에너지 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

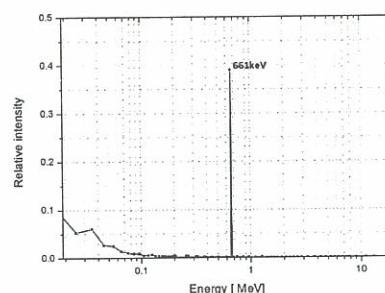


Fig. 2. Gamma energy distribution of the fuel assembly used in the simulation. (Burnup : 32000 MWD/MTU).

선원에서 발생된 입자가 체적 내에서 일으키는 상호작용으로 인한 계산시간을 최소화하기 위하여 선원 체적을 둘러싸고 있는 표면에 대한 fluence tally 계산을 수행 후 얻은 에너지 분포를 사용하여 체적선원을 면선원으로 대체하였다.

2.2 Count rate 평가

선원으로부터 방출된 감마선은 대부분 CZT 결정에 도달하기 전에, 주변의 물과 CZT 결정을 둘러싸고 있는 납 및 텉스텐 차폐체와의 산란반응 등으로 인하여 감쇄된다. CZT 결정까지 도달하는 입자 수가 극히 적기 때문에 낮은 오차의 pulse height tally 계산을 수행하기 위하여 슬릿과 평행한 선상에 위치하여 있는 핵연료집합체 영역에서 매우 작은 각도로 방출된 입자만이 슬릿을 지나 CZT 결정에 도달한다고 가정하였다. 이를 검증하기 위하여 사용된 면선원을 mesh 형태로 분할하여 각 구역에서의 기여 정도를 평가하였고 이를 바탕으로 입자가 방출되는 영역과 방출각도를 제한하였으며 계산 후 보상해주었다. 또한 슬릿 내부 영역에 진입한 입자의 track 수를 기준으로 splitting 기술을 적용하였다. 검출기와 선원 사이의 거리가 40 cm일 때 텉스텐 블록의 길이를 변화시켜 가며 얻은 에너지 661 keV 근처 영역에서의 계수율을 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 적용된 핵연료집합체의 activity는 $1.8 \times 10^{16} \gamma/s$ 이다.

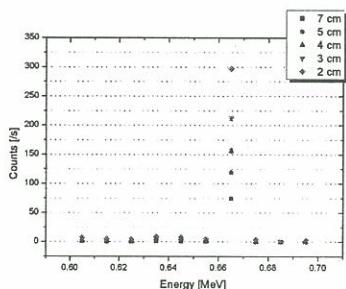


Fig. 3. Change of a count rate with respect to the change with a length of the tungsten block.

검출기과 핵연료집합체 사이의 거리를 변화시켜가며 얻은 계수율의 변화를 Fig. 4에 보였다.

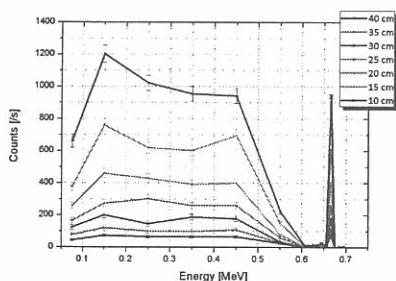


Fig. 4. Change of a count rate with respect to the change of the distance between the detector and the fuel assembly. (Burnup : 32000 MWD/MTU)

슬릿을 지나지 않고 차폐체를 직접 통과하여 결정까지 도달하는 감마선의 경우, detector tally card를 사용하여 CZT 결정 주변의 감마선 flux 도출 후 다시 동일한 환경 하에 있는 CZT 결정에 대한 pulse height tally를 계산하는 방식으로 평가하였다.

3. 결론

본 연구를 통하여 여러 연소도를 갖는 핵연료집합체의 감마선 계수율을 예측할 수 있었으며 향후 수행될 수조 시설 내 사용후핵연료의 연소도 측정 실험에서의 알맞은 감마선 검출기 거리 및 차폐체의 형태 결정 시 활용될 것으로 기대된다. 또한 더 세부적으로 구현된 핵연료집합체에 대한 감마선 및 중성자 연소도 평가 시뮬레이션 이 이루어질 계획이다.

4. 감사의 글

This work has been carried out under the nuclear R&D program of the Ministry of Education, Science and Technology (MEST) of Korea, and research project (2009T100100650) from KETEP, Ministry of Knowledge Economy. This work was also partly supported by the Korea Research Foundation Grant funded by the Korean Government(MOEHRD, Basic Research Promotion Fund) (KRF-2008-313-D01255).

5. 참고문헌

- [1] W. S. Charlton, D. Strohmeyer, A. Stafford, S. Saavedra, A. S. Hoover, C. Rudy, "The Use of Self-Induced XRF to Quantify the Pu Content in PWR Spent Nuclear Fuel," Proceedings of 31st Annual Meeting of European Safeguards R&D Association (2009).
- [2] D. T. Vo, "Comparison of portable detectors for uranium enrichment measurements," Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 276(3), (2008).