

SMART 증기발생기 방사화 및 인출 시 주변 방사선장 평가

노 시 완 · 유 형 준 · 이 재 기

한양대학교

E-mail: swnoh@rrl.hanyang.ac.kr

중심어 : SMART, 증기발생기, 방사화, 선량률, MCNP

서 론

SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)는 노심, 8대의 증기발생기, 가압기 등이 원자로용기 내부에 위치하는 330MWth급의 일체형원자로이다. 8대의 증기발생기는 개별 단위로 설치 및 해체가 가능하도록 설계되어 있다.

SMART의 증기발생기는 기존 PWR의 증기발생기와는 다르게 원자로용기 내부에서 노심과 매우 가까운 위치에 설치된다. 이에 따라 많은 양의 중성자 조사에 의해 방사화 된다. 방사화 된 증기발생기는 원자로용기 외부로 인출 시 새로운 방사선장을 형성하여 유지보수 작업 중 종사자의 피폭을 야기하게 된다. 따라서 작업 시 피폭선량을 예측하기 위한 기본 자료가 되는 증기발생기의 방사화 및 인출 시 주변 방사선장을 평가하였다.

재료 및 방법

SMART의 증기발생기 방사화를 평가하기 위해 MCNPX 전산코드[1]를 이용하여 노심, 반사체, 증기발생기, 지지배럴, 원자로용기, 유동혼합 헤더집합체 등의 주요구조물들을 모델링하였다. 관류식 나선형의 증기발생기는 전산코드의 기하학적 모델링 한계로 인해 원통으로 근절화 하였다. 이 후, 모델링된 노심으로부터 발생하는 핵분열 중성자에 의해 증기발생기에서 일어나는 방사화 반응들의 반응률을 계산하였다. 보수적인 평가를 위해 증기발생기 방향으로의 중성자 누출이 가장 많을 것으로 예상되는 5주기 말 노심을 선정하였다.

주요 반응들을 선정하기 위해 전열관 물질로 사용되는 인코넬 690의 주요 구성물질인 Ni, Cr, Fe의 중성자에 의한 반응들을 파악하였다. 반응을 통해 생성된 핵종이 감마선을 방출하지 않거나 반감기가 매우 짧은 경우는 고려하지 않았다. 또한 (n,2n) 반응 등과 같이 반응문턱 에너지가 매우 높은 반응들도 제외시켜 표 1과 같은 주요 네 가지 반응을 선정하였다.

표 1. 방사화 평가 시 고려한 주요 반응

주요반응	생성 핵종	반감기	감마선에너지(MeV) 및 방출비율
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	^{58}Co	70.86d	0.811 (99.5%)
$^{50}\text{Cr}(n,y)^{51}\text{Cr}$	^{51}Cr	27.70d	0.320 (9.92%)
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	^{54}Mn	312.1d	0.835 (100%)
$^{58}\text{Fe}(n,y)^{59}\text{Fe}$	^{59}Fe	44.50d	1.099 (56.5%) 1.292 (43.2%)

이 반응들에 의해 생성된 핵종들은 붕괴 후 모두 안정해지므로 연쇄붕괴는 고려하지 않는다. 또한 이 반응들에 의해 생성되는 핵종들의 원자밀도가 상대적으로 매우 작으며 이들의 추가적인 중성자흡수에 의해 생성되는 방사성핵종들은 대부분 반감기가 매우 짧으므로 이에 대한 계산은 별도로 수행하지 않았다.

MCNPX 코드를 이용하여 중성자 선속을 계산하고 여기에 원자밀도와 에너지에 따른 반응단면적을 곱하여 반응률을 계산하였다. 증기발생기 내의 중성자 선속은 상부로 갈수록 무시할 수 있는 수준으로 매우 작아지므로 하부지점에 대해서만 평가하였다.

계산된 반응률 값을 이용하여 시간에 따른 방사능을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A(t) = V_{sg}R(1 - e^{-\lambda t}) \text{ (Bq/s.g)}$$

여기서 R은 반응률, λ 는 붕괴상수, V_{sg} 는 균질화된 증기발생기 한 대의 체적이다.

계산된 핵종별 방사능을 선원향으로 하여 증기발생기 인출 시 주변 방사선장을 평가하였다. MCNPX를 이용하여 증기발생기 표면으로부터 5m 떨어진 지점까지의 거리에 따른 선량률을 평가하였으며, 1m 떨어진 지점에서의 냉각시간에 따른 선량률 변화를 평가하였다. 계산결과는 모두 10% 미만의 상대오차를 갖는다.

결과 및 고찰

앞서 고려한 네 가지 반응들에 의해 생성된 핵종들의 포화 방사능은 표 2와 같다. ^{54}Mn 은 반감기가 다소 길어 10년 정도 가동된 후 방사능이 포화되며 그 외의 핵종들은 모두 3년 이내에 포화된다.

표 2. 방사화된 증기발생기의 포화 방사능

생성핵종	증기발생기 한 개당 방사능 (Bq)
^{58}Co	1.088×10^9
^{51}Cr	4.554×10^{12}
^{54}Mn	1.109×10^7
^{59}Fe	6.278×10^9

여기서 (n,p) 반응에 의해 생성되는 방사능은 상대적으로 작게 평가되었다. 이는 노심에서 발생한 중성자가 증기발생기까지 도달하면서 감속되고, 이에 따라 반응단면적이 작아지기 때문으로 판단된다.

계산된 포화 방사능을 선원향으로 하여 증기발생기 인출 시 주위 방사선장 평가를 수행하였다. 그림 1은 선량률이 가장 높은 높이에서의 결과이며 가까운 위치에서 10mSv/h 이상의 다소 높은 선량률을 보인다. 따라서 증기발생기 주변 작업 시 과도한 피폭을 방지하기 위해 충분한 냉각 및 방호조치가 요구된다.

그림 2는 1m 떨어진 지점에서의 시간에 따른 선량률 변화를 보여주며 약 30일정도 지난 후 1mSv/h 이하로 감소하는 것을 볼 수 있다.

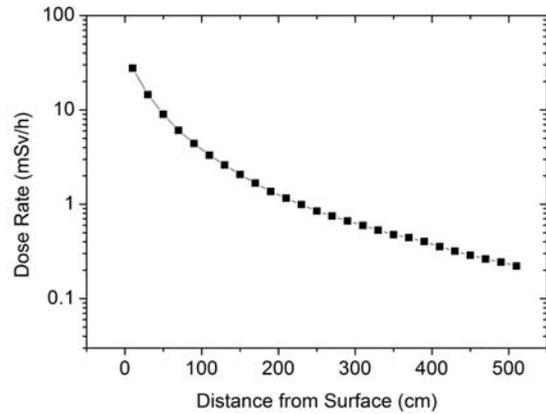


그림 1. 증기발생기로부터 거리에 따른 선량률

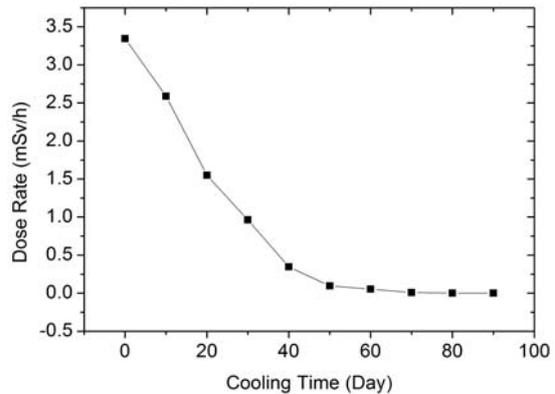


그림 2. 1m 지점에서의 시간에 따른 선량률 변화

결론

SMART 증기발생기의 방사화에 의한 방사능을 계산하고 이를 이용하여 인출 시 주위 방사선장을 평가하였다. 평가결과, 종사자피폭 저감을 위한 충분한 방호조치가 이뤄져야할 필요성이 있음을 확인하였다. 또한 본 연구결과는 작업 시 종사자 선량평가를 위한 자료로 이용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- Denise B. Pelowitz, "MCNPX user's manual, Version 2.5.0", Los Alamos National Laboratory, April 2005.