

원자로 하부에서 발견된 이물질 방사화 평가

김기영*, 정성환

한수원(주)중앙연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1312번길 70

*kiyoungkim@khnp.co.kr

1. 서론

현재 국내에서 가동되고 있는 원자력발전소는 가압경수로형 20기, 가압중수로형 4기로서 한국수력원자력은 전 세계적으로 5위권의 원전운영사이다. 특히 국내 원전의 경우 연료손상율이 낮아 국제적으로도 그 우수성을 인정받고 있으나 아직도 이물질에 의한 연료손상은 지속적으로 발생되고 있는 실정이다. 이와 관련하여 본 연구에서는 최근 국내 발전소사례로서 원자로 냉각재 계통내 원자로 하부에서 발견된 이물질이 주기초부터 존재했을 경우를 가정하여 방사선량을 평가하였다. 본 연구의 목적은 평가된 이물질의 방사선량과 실제 측정값을 비교함으로써 이물질의 유입시점이 현재주기임을 확인하기 위한 것으로, 본 해석을 위하여 MCNP, SCALE 및 ORIGEN 코드를 이용하였다[1][2][3].

2. 본론

2.1 해석코드 및 방법론

원자로 냉각재 계통내 원자로 하부에서 발견된 이물질에 대한 방사화 평가를 수행하기 위하여 국제적으로 가장 많이 활용되고 있는 MCNP 코드를 사용하여 중성자속을 계산하였으며, 이를 입력으로 사용하여 SCALE 코드를 통해 중성자 스펙트럼을 구하고 최종적으로 ORIGEN 코드를 통해 방사선량을 계산하였다. MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport Code) 코드는 방사선 수송해석 분야에서 가장 널리 사용되는 코드로서 미국 로스알라모스 국립 연구소에서 개발되었다. 그리고 핵분열과 같은 핵반응 뿐만 아니라 최근에는 중성자, 광자, 전자를 포함한 다양한 입자의 반응에 대하여 해석능력을 가지고 있다. 일반적으로 몬테칼로 방법은 확률적 분포를 가지는 방사선 거동현상에 대해 Random Number를 사용하여 통계적으로 입자의 거동을 시뮬레이션 하는 계산 알고리즘이다. 따라서 결정론적 해석방법이 방정식의 해를 직접 구하기 때문에 빠른 시간 내에 해를 구할 수 있는 장점이 있는 반면, 통계적 해석 방법의 경우 충분한

신뢰도 확보를 위하여 많은 전산시간이 소요되는 단점이 있다. 하지만 몬테칼로 해석 방법은 방사화 대상 구조물을 모델링함에 있어 복잡한 형태의 모델링도 수행가능한 통계적 해석 기반의 코드이므로, 본 연구에서 목표로 하는 원자로 하부 이물질에 대한 중성자속 계산에 적합한 것으로 판단된다. SCLALE 코드는 기본적으로 특정 시스템의 핵임계 해석을 수행하는 코드이다. SCALE 코드는 임계해석을 위해 CSAS라고 불리는 control sequence에 의해 해석을 수행하며, 단일 입력자료를 통해 control sequence의 모든 모듈이 사용자의 추가적인 지시 없이 순차적으로 수행됨으로써 사용자 편의성이 매우 높다는 특징이 있다. 본 연구에서는 SCALE 코드를 이용하여 원자로 하부에서 발견된 이물질의 구성성분 및 질량을 기반으로 중성자 스펙트럼을 구하였다. 그리고 중성자 스펙트럼을 입력으로 사용하여 이물질이 갖는 방사선량을 계산하기 위해 ORIGEN 코드를 이용하였다. ORIGEN 코드는 기본적으로 동위원소 함량, 붕괴열, 선원항 등 다양한 사용후핵연료 특성정보를 생산하는 코드로서, 사용자의 편의성이 향상된 GUI 환경으로 구축되어 있어 국내에서도 널리 사용되고 있는 코드라고 할 수 있다.

2.2 해석 및 평가

원자로 하부에서 발견된 이물질에 대한 중성자속을 계산하기 앞서 먼저 노심에서 발생하는 선원항을 계산하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Table 1. Assessment Result of Source Term

항 목	입력값
노심열출력	2,815 MW _{th}
1/8 노심열출력	351.875 MW _{th}
U-235의 핵분열 1회당 발생하는 평균 중성자 수	2.43개
핵분열시 발생하는 에너지	약 200 MeV
계산결과	
$351.875[MW_{th}] \times \frac{1[MeV]}{1.609 \times 10^{-13}[MW \cdot s]} \times \frac{1[fission]}{200[MeV]} \times \frac{2.43}{[fission]} = 2.657 \times 10^{19}/sec$	
1/8 노심모델에서 방출되는 중성자의 세기	2.657×10 ¹⁹ #/sec

Table 1에서 도출된 결과를 기반으로 표준형 원전의 1/8 평형노심을 모델링 하여 선원분포를 적용하였으며 이것은 Fig. 1과 같다. 원자로 하부에서 발견된 이물질 재원 및 위치는 Table 2에 나와 있다.

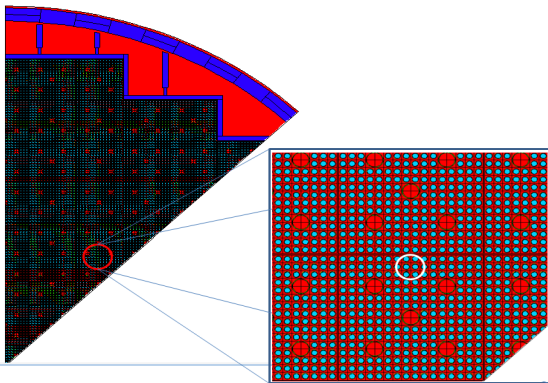


Fig. 1. 1/8 Core Model & the Position of Debris (Horizontal/Vertical View).

Table 2. Material Property & Position of Debris

항 목	재원
크기	45 mm(H) × 5 mm(Φ)
체적	3.5343 cm ³
재질	SUS 304
위치	연료집합체 하부에서 110 mm 지점

이때 고려된 사항은 발견된 이물질은 한주기 동안 원자로하부(연료집합체 하부로부터 약 10 cm 지점)에서 방사능에 노출되었으며, 원자로 정지 후 약 30 일 후에 발견되었다고 가정하였다. 원자로 하부에서 발견된 이물질이 받는 중성자속을 계산하기 위하여 MCNP6코드를 이용하였으며, F4 tally를 이용한 이물질 체적내에 입사된 중성자속 계산결과는 다음과 같다.

계산결과 [neutron/sec]	상대오차
8.430E+12	7%

계산된 중성자속, 이물질 구성성분 및 질량을 기반으로 SCLAE 코드를 이용하여 원자로 하부에서 발견된 이물질의 중성자 스펙트럼을 구하였다. 여기서 구한 중성자 스펙트럼은 ORIGEN 코드의 입력으로 사용하고 최종적으로 이물질이 갖는 핵종별 방사선량을 계산하였다. 평가결과 원자로 하부에서 발견된 이물질의 방사선량율은 약 59 mSv/h로 평가되었다. 참고로 방사선 계측기를 이용하여 이물질로부터 나오는 방사선량 측정값은 약 20 mSv/h 이었다. 따라서 해석결과 (59 mSv/h)가 측정값(20 mSv/h)보다 높으므로 이물질은 현재주기에 유입되었다고 할 수 있다.

3. 결론

본 연구는 원자로 하부에서 발견된 이물질에 대한 방사선량을 해석코드를 이용하여 평가하였고, 그 결과를 실제 측정값과 비교함으로써 이물질 유입시점을 간접적으로 확인하기 위하여 수행되었다. 평가결과 원자로 하부에서 발견된 이물질은 원자로 정지 후 약 30 일 지난 시점에서 그때의 방사선량율이 약 59 mSv/h 이었으며, 이것은 실제 측정값 (20 mSv/h)보다 높은 값이었다. 따라서 측정된 방사선량율(20 mSv/h)은 한주기 기간 이내에 방사능에 노출되더라도 나올 수 있는 값이므로, 이물질은 현재주기에 유입되었다고 평가 할 수 있다.

4. 참고문헌

- [1] SCALE : A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, (2011).
- [2] A Primer for Criticality Calculations with SCALE/KENO-VI Using GeeWiz. ORNL/TM-2008/069, (2008).
- [3] MCNP : A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, LA-CP-03-0245, US, (2003).
- [4] M. J. Bell, ORIGEN B-The ORNL Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-4628(CCC-217), Union Carbide Corporation, Oak Ridge National Laboratory, US, (1973).