

MCNPX 코드를 이용한 CANDU 사용후연료 조밀건식저장시스템 (MACSTOR/KN-400)의 방사선차폐 안전성평가에 관한 연구

김병수, 정재학, 이재성, 정찬우

한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

본 연구에서는 사용후핵연료 저장시설의 안전성평가와 관련한 방사선차폐해석 부문의 검증기술 검토 및 개발을 위하여 월성에 건설될 예정인 CANDU 사용후연료 저장을 위한 조밀건식저장시스템인 MACSTOR/KN-400을 대상으로 MCNPX 전산코드를 이용한 사례분석을 수행하였다. 본 연구는 장기적인 차원의 차폐안전성 평가 검증기술 개발을 위한 연구이므로, 사례분석의 차폐해석 결과는 실제 설계결과와 다를 수 있음을 미리 밝혀둔다.

MCNPX 코드는 Monte-Carlo 기법을 이용한 MCNP 코드의 기능을 일부 확장한 코드로서, MCNP 코드와 마찬가지로 3차원 기하구조에 대하여 선량 및 선속을 계산할 수 있는 범용의 방사선수송해석 코드이다. MCNP 및 MCNPX 코드는 컴퓨터 성능의 발전으로 다양한 분야에서 활용빈도가 증가하고 있는, 향후 발전가능성이 높은 주요 차폐해석 코드이기 때문에, 본 연구에서는 MCNPX 코드를 차폐 안전성 평가 검증목적으로 활용하여 보고, 적용 절차와 계산결과, 그리고, 적용시의 문제점을 파악하고자 한다.

MACSTOR/KN-400 개발에 관한 연구보고서를 토대로 설계자료 및 변수들을 입수하고, 차폐해석에 필요한 방사선원항 평가를 수행하였으며, MACSTOR 보고서의 결과와 다르지 않음을 확인하였다. 방사선 차폐해석과 관련하여, MACSTOR 보고서에서는 계산속도가 빠른 QAD-CGGP 전산코드를 활용하여 시설 외부의 선량을 계산하고, MACSTOR의 공기 입구 및 출구에서의 산란방사선에 대한 차폐해석은 이에 대한 차폐해석이 가능한 MCNP 코드를 적용하고 있으며, 이러한 방식은 계산효율을 최대로 하기 위하여 활용되는 전략이다. 본 연구에서는 설계 시설 외부의 선량 및 공기 입구와 출구에서의 산란방사선을 모두 MCNPX 코드를 이용하여 계산하였다. MACSTOR 보고서의 계산 절차, 변수 및 모델링에 관한 사항들을 살펴보았으며, 산란방사선 모델링에서 Variance Reduction을 위한 기법이 일부 적용되고 있음을 확인하였다.

MCNPX 코드를 이용한 사례분석을 위하여, 필요한 구성물질 조성은 MACSTOR 보고서에 근거하지 않고, 별도의 참고문헌을 통하여 입수하여 적용하였으며, 선량환산인자는 MACSTOR 보고서와 마찬가지로 ICRP-74 자료를 인용하였다. 대상 시설의 기하학적 구조는 설계와 최대한 동일하게 모델링하고, 사용후연료가 배치되는 저장 실린더 내부는 균질화되어 있다고 가정하였다. 또한 저장 실린더는 4열씩 10줄의 정형화된 구조로 구성되므로, 코드의 Lattice 기능을 이용하여 격자로 표현하고, 선원도 Geometric Chain에 의하여 지정하였다. Tally는 Point Detector Tally와 Mesh Tally를 이용하여 선량을 평가하였다. Point Detector Tally를 이용하여 주요 지점에서의 선량을 평가하고, Mesh Tally를 이용하여 선량분포를 공간적, 시각적으로 표현하여 방사선의 거시적인 거동을 동시에 확인해보고자 하였다.

MCNPX 코드를 이용한 감마선량 계산결과는 Table 1과 Fig. 1에 수록하였다. 시설 외부 표면에서의 결과는 설계기준 제한치 25 $\mu\text{Sv/hr}$ 를 만족하고 있지만, 공기 출구 및 입구에서의 선량은 설계기준을 만족하지 못한다. 이를 위해서는 추가적인 차폐가 필요할 것이며, MACSTOR 보고서에서도 추가적인 차폐조치를 취하고 있다. 계산결과 및 Mesh Tally에 의한 방사선 분포 거동을 살펴보면, 상단의 공기 출구의 선량 분포가 하단의 공기 입구보다 더 높은 것을 확인할 수 있다.

MCNPX 코드를 이용한 차폐안전성 평가 및 검증에서 신뢰성 있는 계산결과를 얻기 위해서는 계산오차를 줄일 수 있는 충분한 계산시간이 필요하다. 어떤 상황에서는 적절한 Variance Reduction(VR) 기법을 사용하여야 계산효율이 증가하여 합리적인 시간 내에 결과가 도출될 수도

있으므로, VR에 대하여 주의를 기울여야 하는 활용상의 어려움이 존재한다. 계산결과를 검증하기 위하여 선량평가 후에 확증을 위한 별도의 평가절차 또는 다른 방법론의 전산코드가 보조적으로 필요할 수도 있다. MCNPX 코드를 검증용으로 활용하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있기 위해서는 VR 및 검증계산 등에 관한 보완 절차가 검증목적에 맞게 검토되고 개발되어야 할 것이다.

Table 1. MCNPX 코드 계산 결과 (감마선량)

| No. | 위 치 | 높이 (cm) | 선량 (Sv/hr) | 비고 |
|-----|-------------------|---------|------------|-------------------|
| 1 | 상부 슬래브 (중양부분) | 754 | 1.8459E-07 | 0.185 μ Sv/hr |
| 2 | 상부 슬래브 (저장실린더 위쪽) | 754 | 1.2752E-06 | 1.27 μ Sv/hr |
| 3 | 공기 출구 | 603 | 1.4002E-04 | 140 μ Sv/hr |
| 4 | 공기 출구 터널영역 | 603 | 1.1382E-02 | (시설 내부) |
| 5 | MACSTOR 중양 상부 | 603 | 2.6556E+01 | (시설 내부) |
| 6 | 옆면 외벽 (중양) | 377 | 7.0178E-06 | 7.02 μ Sv/hr |
| 7 | 옆면 외벽 (저장 실린더 앞) | 377 | 8.2495E-06 | 8.25 μ Sv/hr |
| 8 | MACSTOR 중양 | 377 | 3.6229E+01 | (시설 내부) |
| 9 | 공기 입구 | 120 | 8.9150E-05 | 89.2 μ Sv/hr |
| 10 | 공기 입구 터널영역 | 120 | 3.9028E-03 | (시설 내부) |
| 11 | MACSTOR 중양 하부 | 120 | 2.5764E+01 | (시설 내부) |

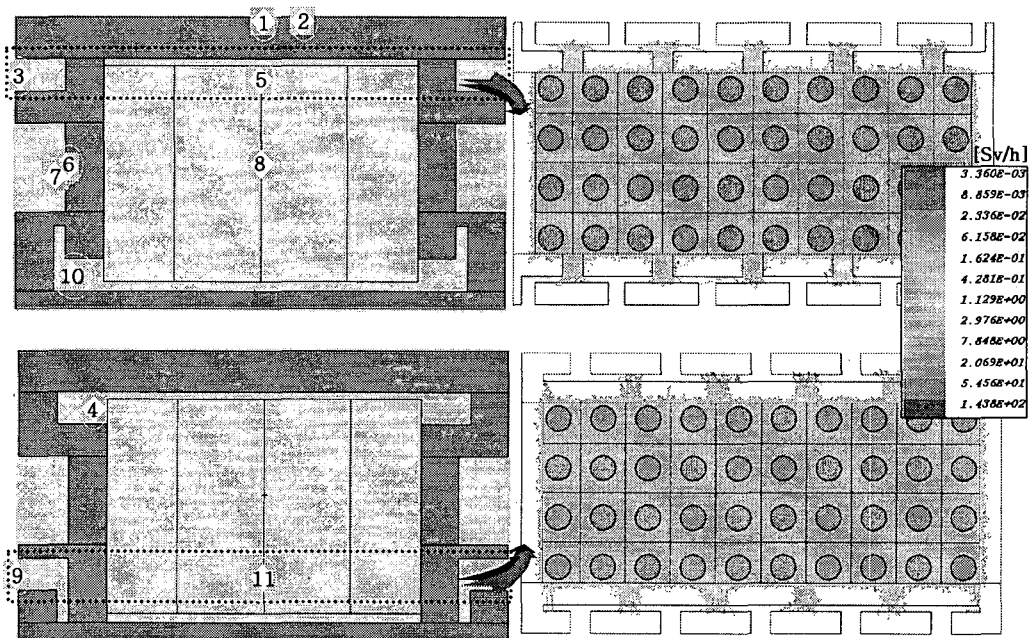


Fig. 1. 선량 계산 Tally 위치 및 Mesh Tally에 의한 감마선량 분포