

# 사용후핵연료 수송 및 저장 겸용용기 개발을 위한 차폐설계

김용일\*, 안효철, 안준기

한국전력기술(주), 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*yongil@kepco-enc.com

## 1. 서론

사용후핵연료 수송 및 저장 겸용용기에 대한 차폐설계를 수행하였다. 차폐설계의 목표는 관련규정 [1,2]에서 요구하는 선량요건 및 원전 크레인의 취급용량 이내의 무게조건을 동시에 충족하는 최적화된 차폐두께 및 치수, 재료를 결정하는 것이다. 대상 사용후연료는 웨스팅하우스형 핵연료(ACE7, 17X17)이며 차폐해석 전산코드는 SCALE6.1.2 [3]의 MAVRIC 모듈을 사용하였다.

## 2. 본론

### 2.1 캐스크 기본형상

본 연구는 최대 32개 핵연료집합체를 수송, 저장할 수 있는 대용량의 캐스크 개발을 목표로 한다. 캐스크 기본구조는 원기둥 형태의 용기이며 핵연료 집합체 지지 및 집합체간 간격유지를 위한 바스켓, 바스켓 지지 및 1차 차폐체인 캐니스터, 캐니스터 지지 및 2차 차폐체인 캐스크, 그리고 캐스크 외부 중성자차폐체 등으로 구성된다. 이러한 기본구조에 대한 예비계산을 통하여 차폐에 가장 핵심적인 역할을 하는 캐스크 본체의 두께 및 중성자차폐체인 레진의 치수와 차폐효율을 높이기 위한 레진 내 첨가물( $B_4C$ , Pb)의 조성비를 결정하였다.

### 2.2 방사선원항 해석

차폐해석에 사용되는 방사선원항은 ACE7 핵연료를 대상으로 하였는데 초기농축도 3.5 w/o, 출력준위 40 MW/MTU, 3주기 연소 및 방출연소도 45,000 MWD/MTU, 냉각기간 10 년을 가정한 중성자 및 감마선원이다. 핵연료 연소계산은 SCALE6.1.2의 ORIGEN-ARP 모듈을 이용하였으며 축방향 침투인자를 출력준위에 반영하여 축방향 연소도 분포에 따른 방사선원항 변이를 고려하였다.

### 2.3 차폐해석

차폐해석에 사용된 MAVRIC 전산코드(ORNL에서 개발된 SCALE6.1.2 코드 패키지[3]에 포함된 모듈)

는 일반적인 Monte Carlo 방법으로 해결하기 어려운 심층투과(deep penetration) 방사선수송 문제들을 효율적으로 해석할 수 있다. 기계 및 차폐해석을 통해 결정된 캐스크 구조물 형상은 Fig. 1과 같으며 관련 기술기준의 선량률을 만족함과 동시에 국내원전(고리2~4, 영광 1~6, 울진 3~6)의 크레인 취급용량(~110 ton)을 초과하지 않도록 주요 차폐체 치수 및 두께를 결정하였다.

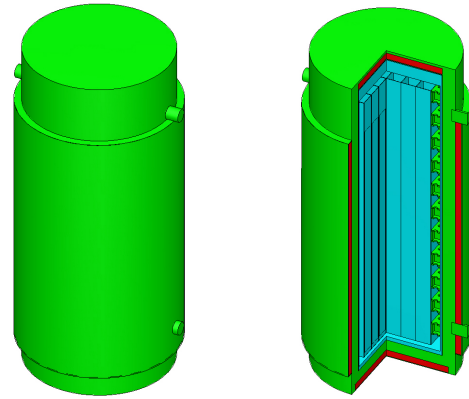


Fig. 1. CASK Model.

사용후핵연료 운반용기에 대한 기술기준에 따르면 방사성물질의 운반 시 운반수단의 외부표면 및 2 m 이격거리에서의 선량률이 각각 0.2 rem/h 및 0.01 rem/h를 초과하지 않아야하고, 가상사고조건 하에서 1 m 이격거리에서의 선량률이 1 rem/h를 초과하지 않아야 한다.

MAVRIC 전산코드를 사용한 차폐해석에서 1 m 및 2 m 이격거리의 선량은 point detector tally를, 표면선량은 mesh tally를 사용하여 선량률을 각각 계산하였다. 계산결과 선량률 관련기준을 만족시키기 가장 까다로운 조건은 정상조건의 캐스크 측면 2 m 이격거리 선량조건으로 나타났다. 계산에 사용된 선속-선량 환산인자는 ANSI/ANS-6.1.1-1977이다. Fig. 2는 캐스크 측면 2 m 이격거리에서의 선량률 분포를 나타내는데 캐스크 외부의 중성자차폐체 레진에 포함된 납(Pb) 첨가물 함량에 따른 선량률 변화를 보여준다. 납 이외의 첨가물은 중성자차폐를 위한  $B_4C$ 이며 1.5 w/o 무게비를 고려하였다.

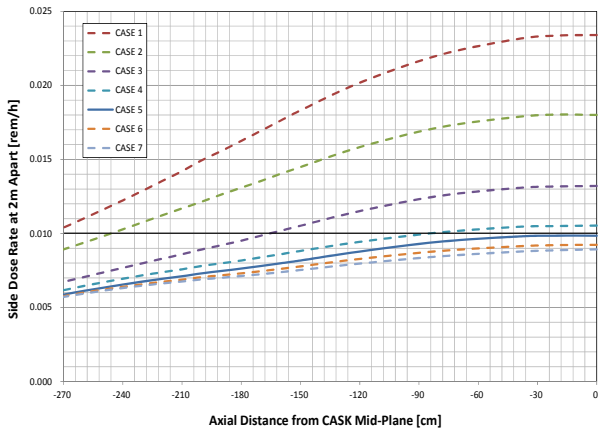


Fig. 2. Side Dose Rate Distributions.

Fig. 2 각 계산모델의 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. CASK Model Cases

경우	계산모델 설명
1	Fig. 1에 보이는 바스켓과 캐니스터 사이 지지구조물 없으며 레진 내 첨가물(B <sub>4</sub> C 및 Pb) 없음
2	그림 1과 같으며(지지구조물 존재) 레진 내 첨가물(B <sub>4</sub> C 및 Pb) 없음
3	경우 2 모델에 레진 내 B <sub>4</sub> C 포함
4	경우 3 모델에 레진 내 Pb 3.0 w/o 추가
5	경우 3 모델에 레진 내 Pb 6.0 w/o 추가
6	경우 3 모델에 레진 내 Pb 7.0 w/o 추가
7	경우 3 모델에 레진 내 Pb 8.0 w/o 추가

위 계산모델 중 레진 내 B<sub>4</sub>C 1.5 w/o 및 Pb 6.0 w/o를 포함한 경우 5 모델부터 선량률 조건을 만족함을 보인다. 또한 경우 1과 경우 2 계산결과는 축방향으로 불연속적인 지지구조물도 일정거리 이상 떨어진 경우에는 방사선차폐(최대 30%) 역할을 함을 알 수 있다.

Fig. 3은 캐스크 외부표면 선량률 분포를 보여주는데 그림에서 불연속 분포의 왼쪽은 중성자차폐체가 미치지 않는 캐스크 외부표면에서의 선량률이고, 오른쪽은 중성자차폐체(레진차폐재)가 있는 외부표면에서의 선량률이다. 그림에서 알 수 있듯이 표면선량은 중성자차폐체 길이에 민감하며 중성자차폐체가 없는 영역에서의 선량률에 의해 중성자차폐체 길이가 결정된다. Fig. 3에서 점선 그래프는 중성자차폐체 길이 400 cm에 해당하는 모델의 표면선량률 분포를 나타내며 규제요건을 만족하는 중성자차폐체 길이는 420 cm이다.

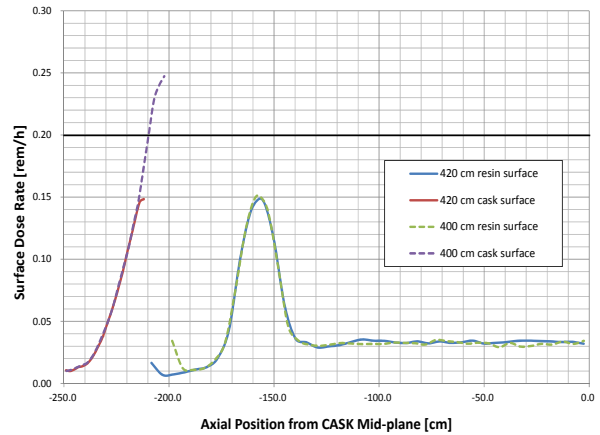


Fig. 3. Surface Dose Rate Distributions.

### 3. 결론

개발된 캐스크 모델(Fig. 1)에 대한 중성자차폐재 내 첨가물(B<sub>4</sub>C 및 Pb)의 최적화된 조성비는 각각 1.5 w/o 및 6.0 w/o이며, 중성자차폐체 축방향 길이는 420 cm이다. 또한 바스켓과 캐니스터 사이의 불연속적인 지지구조물도 차폐에 상당한 영향을 미치므로 차폐해석 모델은 실제형상을 반영하는 3차원 모델 설정이 요구된다.

### 4. 참고문헌

- [1] 원자력안전위원회고시 제2014-50호, "방사성물질의 포장 및 운반에 관한 규정," 2014.
- [2] 10CFR71, "Packaging and Transportation of Radioactive Material," 1996.
- [3] "SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design," ORNL/TM-2005/39, Version 6.1.2, Oak Ridge National Laboratory, June 2011.