

## 방사성폐기물 처분 시스템 복합시나리오의 안전성 평가를 위한 위험도 평가 방법

김정우, 조동건, 강철형, 이연명, 고낙열, 정종태  
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111  
iw\_kim@kaeri.re.kr

### 1. 서론

방사성폐기물 처분 시스템의 신뢰성 확보를 위하여, 그동안 방사성폐기물 처분장 폐쇄후 장기 안전성 평가를 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 방사성폐기물 처분장의 장기 안전성 측면에서 방사성핵종의 유출 및 이동과 관련하여 다양한 시나리오가 존재할 수 있다. 여기에는 외부의 물리적 간섭 없이 자연적으로 나타나는 정상시나리오와 지진과 같은 자연재해나 통제되지 못한 상황에서 인간에 의한 간섭 등으로 나타나는 비정상시나리오가 해당된다. 또한, 이러한 정상시나리오와 비정상시나리오가 시간에 따라 복합적으로 연계되는 복합시나리오에 대한 평가는 방사성폐기물 처분 시스템의 안전성평가에서 불가피하다.

방사성폐기물 처분 시스템의 안전성 평가 방법은 크게 비통합적 방법(disaggregated approach)과 통합적 방법(aggregated approach)으로 나뉜다. 비통합적 방법에서는 어떠한 시나리오가 발생할 확률과 그 시나리오에 의해서 나타나는 피폭선량을 개별적으로 고려하지만, 통합적 방법에서는 최종적인 위험도(risk)를 평가하기 위하여 피폭선량과 시나리오 발생확률을 동시에 고려한다[1]. 위험도 평가를 통한 안전성 평가는 위에서 언급된 다양한 시나리오를 포함하는 복합시나리오에 대한 안전성 평가를 가능케 한다는 점에서 또 다른 장점이 있다.

이와 관련하여, Seo 등[2][3]은 방사성폐기물 처분장의 복합시나리오에 대한 통합적 위험도 평가 방법을 이론적으로 제시하였다. 하지만, Seo 등[2][3]의 방법은 선행적으로 각 시나리오별 발생확률을 시간에 따른 함수로 구해야 하고, 시나리오 발생확률은 결과적으로 부합하는 피폭선량의 곱으로 해당 시나리오에 의한 위험도가 계산되는데, 이러한 작업을 매 시간별로, 그리고 각각의 시나리오별로 모두 수행해서 모두 합해야 최종적인 위험도가 계산되는 번거로움이 있다. 또한 Seo 등[2][3]의 방법은 연계되는 두 개 이상의 사건(event)으로 구성되는 시나리오에 대해서는 그 사건들에 의한 복합적인 영향을 설명하는데 어려움이 있다.

이러한 선행 연구들의 단점을 보완하기 위하여, 본 연구에서는 복합적/연계적으로 발생하는 여러 사건에 의해 처분시스템에 미치는 영향에 대한 기준(criteria)을 설정하고, 사건의 질적, 양적, 시간적 발생 확률을 고려한 Monte Carlo 방법을 도입하여 효율적인 복합시나리오 위험도 평가 방법을 개발하였다.

### 2. 본론

#### 2.1. 안전성 평가 코드

본 연구에서 사용된 방사성폐기물 처분 시스템 안전성 평가 코드는 한국원자력연구원에서 GoldSim 프로그램을 이용하여 개발된 평가 코드[4]이다.

#### 2.2. 복합시나리오

본 연구에서는 복합시나리오 위험도 평가를 위한 기초연구로써 지진 사건 하나만을 고려하여 10<sup>6</sup>년간 발생할 수 있는 복합시나리오에 대한 위험도 평가를 수행하였다.

지진 사건의 발생은 10<sup>-4</sup> yr<sup>-1</sup>의 평균발생빈도( $\lambda$ )를 가지는 다음의 Poisson 누적확률분포를 이용해서 나타내었다.

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

여기서,  $F(t)$ 는 시간  $t$ 에서 사건 발생확률이다.

발생된 지진은 강도와 처분장으로부터 진원지까지의 거리로 특성지워졌다. 여기서, 지진 강도( $M$ )의 분포는 다음의 log-uniform 누적확률분포( $F(M)$ )로 가정하였다.

$$F(M) = \frac{\ln M - \ln a_1}{\ln b_1 - \ln a_1} \quad (a_1 \leq M \leq b_1)$$

여기서,  $a_1$ 와  $b_1$ 는 각각 지진강도 최소값(5.5)과 최대값(8.0)이다. 진원지까지의 거리( $D$ ) 분포는 다음의 tri-angular 누적확률분포( $F(D)$ )로 가정하였다.

$$F(D) = \begin{cases} \frac{(D - a_2)^2}{(b_2 - a_2)(c_2 - a_2)} & (a_2 \leq D \leq b_2) \\ 1 - \frac{(c_2 - D)^2}{(c_2 - b_2)(c_2 - a_2)} & (b_2 \leq D \leq c_2) \end{cases}$$

여기서,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $c_2$ 는 각각 진원지까지 거리의 최소값(0 km), 최빈값(5 km), 최대값(25 km)이다.

Monte Carlo 방법으로 각 시뮬레이션마다 지진 강도와 진원지까지 거리의 발생확률에 각각 난수 ( $\xi_1$ 과  $\xi_2$ )를 발생시켜 발생할 수 있는 지진강도와 진원지까지의 거리를 다음과 같이 역산하였다.

$$M = \exp(\ln a_1 + F(M)(\ln b_1 - \ln a_1))$$

$$F(M) \rightarrow \xi_1$$

$$D = \begin{cases} a_2 + \sqrt{F(D)(b_2 - a_2)(c_2 - a_2)} & \left( F(D) \leq \frac{b_2 - a_2}{c_2 - a_2} \right) \\ c_2 + \sqrt{(1 - F(D))(c_2 - b_2)(c_2 - a_2)} & \left( F(D) \geq \frac{b_2 - a_2}{c_2 - a_2} \right) \end{cases}$$

$$F(D) \rightarrow \xi_2$$

지진 발생에 의한 처분시스템으로의 영향은 근계 균열암반의 핵종지연 기능 상실과 원계 MWCF에서의 유량( $Q_{MWCF}$ ) 증가가 다음과 같은 기준으로 고려되었다.

$$Event1 : M > 7.5 \Rightarrow near-fieldfail$$

$$Event2 : M/D > 0.5 km^{-1} \Rightarrow Q_{MWCF} \times 10$$

여기서, 근계 균열암반의 핵종지연 기능 상실은 비가역적이고 원계 MWCF에서의 유량 증가가 발생하는 횟수의 최대값은 2회로 가정하였다.

이러한 기준으로 도출된 발생가능 복합시나리오는 총 5가지로 Table 1과 같다.

Table 1. Possible complex scenarios.

Scenario	Events		
S1	Event1	Event2	Event2
S2	Event1	Event2	-
	Event2		
S3	Event2	Event1	Event2
S4	Event2	Event1	-
		Event2	
S5	Event2	Event2	Event1

### 2.3. 위험도 평가 결과

Monte Carlo 방법으로 100회 시뮬레이션한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 검은 실선들은 각 시뮬레이션에서 나타난 피폭선량이고, 붉은색 실선은 그 평균값이다. 녹색 실선은 평균 피폭선량에 위험도 상수( $5 \times 10^{-2} Sv^{-1}$ )를 곱해서 나타는 위험도이다. 그리고, 붉은색 점과 푸른색 원은 각각 Event1과 Event2가 발생한 시점에서의 지진 강도를 나타냈다.

그 결과, Event2보다는 Event1에 의해서 피폭선량의 변화가 나타났고, 그 변화폭은 최대 약 10배 정도로 나타났다. 그리고, 약  $10^5$ 년 이후에는 Event1이 발생하더라도 피폭선량에 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

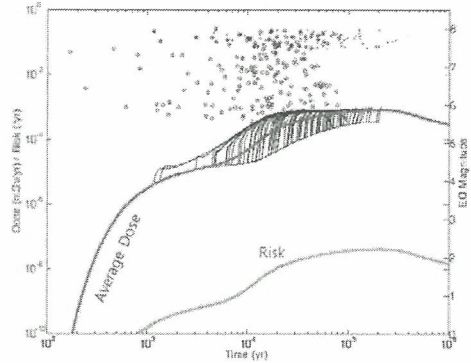


Fig. 1. Simulation results (Monte Carlo approach for 100 times).

100회의 안전성평가 시뮬레이션에 대한 각 시나리오의 발생확률을 Table 2에 계산하여 나타내었다. 그리고,  $10^5$ 회의 Monte Carlo 난수발생을 하여 계산된 각 시나리오별 의사-이론적(Pseudo-theoretical) 발생확률을 함께 나타내었다. 그 결과, 안전성평가 시뮬레이션에서 계산된 시나리오별 확률분포가 이론값과 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Probabilities of each scenarios (Modeling results & pseudo-theoretical values).

Scenario	Simulation	Theory (Pseudo)
S1	0.07	0.041
S2	0.25	0.184
S3	0.02	0.033
S4	0.15	0.141
S5	0.51	0.601

### 3. 결론

본 연구에서는 기존의 안전성평가 코드를 이용하여 Monte Carlo 방법으로 효율적인 복합시나리오 안전성 평가 방법을 개발하였다. 그리고, 위험도 평가에서의 시나리오 발생 확률개념이 본 평가 방법에 잘 적용되어 있음을 확인하였다.

### 4. 참고문헌

- [1] ICRP Publication 81, Pergamon Press (2000).
- [2] J. of Radiation Protection 35(1): 6-11 (2010).
- [3] Annals of Nuclear Energy 49: 96-101 (2012).
- [4] Nuclear Engineering and Technology 42(1): 37-46 (2010).