

방사성 폐기물 처분장의 확률론적 안전성 분석 방법론에 관한 연구

정재훈, 김강열, 강창순
서울대학교

요 약

방사성 폐기물 처분장의 확률론적 안전성 분석은 방사성 폐기물 처분장의 운영에 앞서 수행되어야 할 과제이다. 따라서, 본 연구에서는 폐기물 처분장의 확률론적 안전성 분석을 체계적으로 수행하기 위한 방법론을 개발하여 제시하였다.

1. 서론

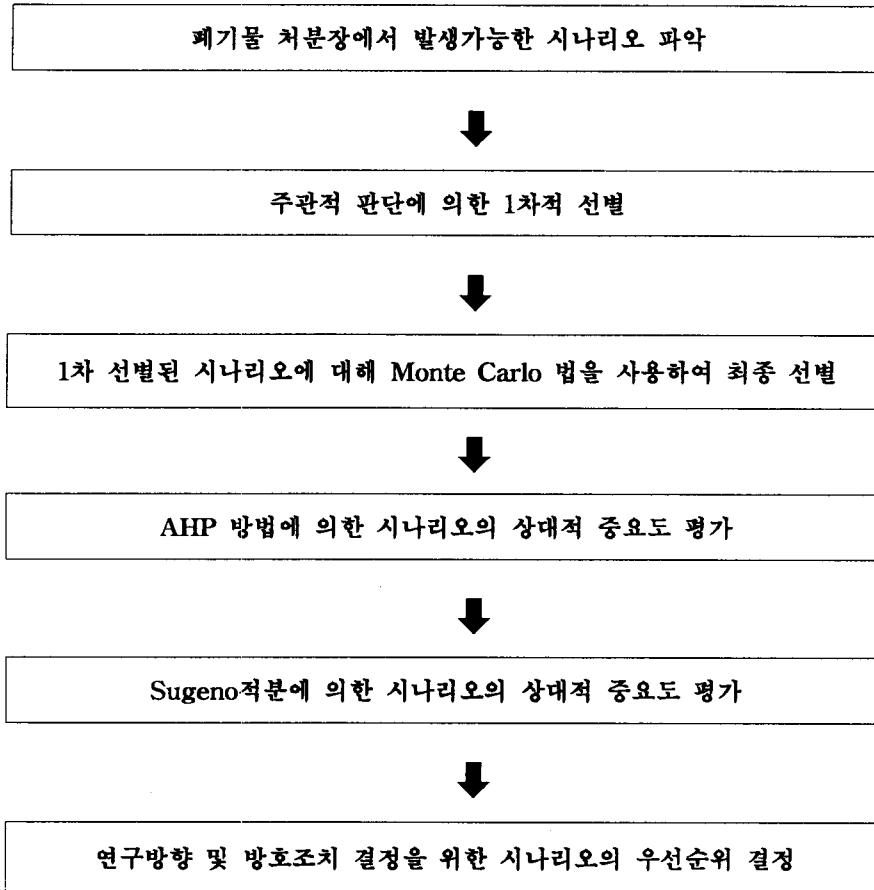
방사성 폐기물 처분장에 대한 확률론적 안전성 분석(PSA, Probabilistic Safety Analysis)은 방사성 폐기물 처분장의 운영에 앞서 실행되어야 할 과제이다. 방사성 폐기물 처분장의 모든 계통에 대한 확률론적 안전성 분석은 처분장으로부터 유출되는 방사성 핵종의 양을 예측하고 그 유출 결과를 규제치와 비교하여 기술적 및 사회적 인식의 관점에서 처분장의 안전성을 입증하는 데 있다. 처분장의 안전성 분석의 의의는 그 분석 결과를 처분장의 설계에 반영함으로써 기술적, 경제적 이익을 확보하는 것이다. 방사성 폐기물 처분장에 대한 확률론적 안전성 평가 방법으로는 사상수목/사고수목법, Monte Carlo simulation, 계통 신뢰도 분석법의 세 가지로 나눌 수 있는데^[1], 본 연구에서는 사상수목/사고수목법의 일종인 방사성 핵종 유출 시나리오를 이용하는 방법에 대해서 고찰하고 이후 수행되어야 할 연구에 대한 방향을 제시하고자 한다.

2. 방사성 핵종 유출 시나리오를 이용한 처분장의 안전성 평가 ^{[2],[3],[4]}

처분장의 안전성 분석에서 방사성 핵종 유출 시나리오를 이용한 방법이 있는데, 이는 미국의 Sandia National Laboratories에 의해 개발된 가장 체계적이고 발전적인 형태이며, 사상수목/사고수목 분석과 같은 이산계통(discrete system)의 분석에 사용된다.^[2]

유출 시나리오법의 주요 내용은 시나리오의 개발, 주요 시나리오의 선별, 시나리오의 분석, 시나리오의 우선순위 결정 등이 있다. 여기서 시나리오 개발을 기존의 문헌을 참고하여 수행하였고, 시나리오 선별은 Monte Carlo법을 이용하였다. 시나리오의 우선 순위 결정을 위해서는 AHP 방법을 사용하였다. 연구 수행의 전체적인 계통적 절차는 그림 1과 같다.

그림 1. 연구 수행의 계통적 절차 도해



2.1 1차 선별된 시나리오

사건과 과정들이 선별되면 선별 사건과 과정을 목적의식적이고 유의미하게 결합하여 시나리오를 개발한다. 최종 선별된 사건과 과정에는 논리적 연결 사건과 방사성 핵종의 이동을 묘사하는 전송사건을 첨가하였다. 이렇게 완전결합을 이루는 사건과 과정들은 시나리오를 구성하기 위하여 결합되며 사건 발생에 따른 시간적인 순서와 이동 순서가 고려된다. 구성된 시나리오는 최종 선별되는데, 선별의 기준은 확률값으로 10^{-3} , 고려의 기준은 10^{-4} 로 잡았다. 그 이유는 처분장 안전성 평가기간인 300년을 보수성을 주어 1000년 동안 안정해야 한다고 가정한 것과 정성적인 판단 자체의 오류를 감안하여 10^{-3} 의 10% 오류를 고려해야 한다는 판단에서이다.

2.2 Monte Carlo법에 의한 시나리오 선별

방사성 폐기물 처분장의 폐쇄후의 성능평가는 시나리오 분석과 결과 분석으로 나눌

수 있는데, 시나리오 분석은 파손전 계통의 거동에 대한 평가를, 결과 분석은 파손후 계통의 거동에 대한 평가를 의미한다. 결과 분석법은 처분장이 건설, 운영, 폐쇄된 이후에야 가능하기 때문에 이에 대한 연구는 수행되지 않았다. 시나리오는 개념적 처분장에 대해 전문가의 정성적인 판단에 의해 선별한다. Monte Carlo법은 시나리오의 사건과 과정에 대해 정성적으로 주어진 Point Value의 상대적 확률값에 내재된 불확실성을 고려하여 시나리오에 대한 발생확률값의 확률밀도함수를 구하여 시나리오를 선별한다. 사건과 과정의 확률밀도함수는 임의의 범위를 가진 상수함수로 가정하여 수행하며, 그 이유는 사건과 과정에 대한 확률밀도함수에 대한 정보가 없는 상태에서 최대의 불확실성을 고려해 주기 위한 것이다. 또한, 난수발생은 각 시나리오의 사건마다 표본추출을 하여 발단사건과 이동과정의 확률값을 곱하여 시나리오의 확률밀도함수를 생성하고, 그 생성값의 중앙값(Median)을 세트의 대표값으로 취한다. 세트마다 각 시나리오에 대한 확률값을 대소로 비교하여 가장 큰 값을 우선순위값 1을 주고 순차적으로 하나씩 증가시켜 세트의 우선순위를 결정한다. 이러한 세트를 반복 시행하여 각 시나리오에 대해 통계처리를 한다. 요약하면, 각 세트의 시나리오에 대한 발생확률값에 대해서는 누적하여 각 시나리오에 대한 발생확률밀도함수를 생성하고 우선순위는 합산하여 시나리오의 발생확률에 대한 최종 우선순위값을 계산한다.

2.3 AHP 방법에 의한 시나리오의 상대적 중요도 평가

AHP(Analytic Hierarchy Process)법은 多 평가기준에 대한 의사결정 판단 이론으로 핵종 유출 시나리오에 대한 상대적 중요도를 평가하는데 사용된다. 상대적 중요도를 평가하기 위해 선별된 시나리오를 동일한 유출사건별로 묶어 단순화된 시나리오로 재구성한다. 그 이유는 동일한 유출사건에 의한 시나리오들 상호간에 정성적이 판단이 어렵고 평가 결과 자체가 무의미하다고 판단되기 때문이다. 시나리오의 상대적 중요도를 평가하기 위해서는 적절한 평가 기준이 선택되어야 하는데, 평가 기준으로는 물리적 타당성, 발생 확률, 잠재적 결과 등이 있다.

2.4 Sugeno 적분에 의한 시나리오의 상대적 중요도 평가

AHP법의 결과에서의 불확실성을 고려하기 위해 애매성(Ambiguity)을 포함한 상대적 중요도를 Sugeno 퍼지적분에 의해 수행한다. AHP법의 결과와 비교하면 우선순위가 역전될 수가 있는데, 그것은 계산 방법의 차이에 의해 발생한 것이다. 그러나, 전체적 영향은 AHP와 거의 동일하게 나타난다.

2.5 민감도 분석

민감도 분석은 어떤 기준의 우선순위에서 부분적 혹은 전체의 변화에 의해 야기되는 효과를 계산하기 위해 수행된다. 평가 기준에 대한 연구의 진행으로 인한 우선순위 변화가 처분장 안전성의 우선순위에 영향을 미치는 정도에 대한 연구가 수행되어야 한다.

2.6 사례 연구

본 연구에서는, 첫째 국내 방사성폐기물 처분장의 안전성 평가를 위해 개념적 처분장

내에서 발생가능한 시나리오 중 안전성 측면에서 중요한 시나리오를 선별하였다. 선별을 위해서는 Monte Carlo법을 사용하였으며, 선별기준으로는 시나리오의 발생확률을 채택하였다.

둘째는 1단계에서 선별된 시나리오에 대해, 우선순위를 부여하기 위한 방법론을 마련하였다. 이를 위해 계산상의 편리함과 결과의 유효성 측면에서 AHP 방법을 도입하였다. 그러나, AHP 방법론은 앞서 언급한 장점에도 불구하고 분석자의 주관적 판단이 개입되게 된다. 따라서, 이 단점을 극복하기 위해 전문가집단을 구성한 후 설문을 구하여 전문가 개개인에 의해 발생하는 주관성을 배제하고자 하였다. 그리고, 시나리오를 평가하는 데 있어서는 평가기준을 설정하고 이 평가기준을 구성하는 세부 평가기준으로 세분하여 설문에 응하는 전문가들이 직접적으로 평가할 수 있도록 하였다. AHP 방법의 결과는 표 1, 2와 같다.

또한, AHP 계산결과를 검증하기 위해 Sugeno 퍼지적분 개념을 도입하였다. 검증결과, AHP 계산결과(즉, 우선순위)와 거의 일치하고 있으며, 각 방법에 대한 결과 비교는 표 3과 같다.

3. 결론

AHP방법의 결과에 의하면 중저준위 방사성폐기물 처분장에서 상대적 중요도가 가장 큰 시나리오는 정상상태 유출 시나리오이다. 여기서 정상상태 유출 시나리오란 지하수의 정상 유동에 의한 시나리오를 말한다. 다음으로는 충전채 실패 시나리오이고 나머지 세 가지 시나리오는 그 중요도가 비슷하게 나타났다. 이는 전문가들이 정성적으로 평가한 방사성핵종 유출 시나리오에 대한 중요도가 기존의 연구결과와 동일하게 나타남을 알 수 있다. 또한 AHP방법에 의한 우선순위는 Sugeno퍼지적분으로 계산한 퍼지기대값의 우선순위와 비슷한 경향을 나타내었다. 이것은 주어진 가정과 얻을 수 있는 자료에서 이 평가가 유효함을 나타낸다. 도출된 상대적 중요도는 정성적 판단을 근거로 하였으므로 구체적 수치보다 그 우선순위가 더 큰 의미를 지닌다. 그 이유는 방사성핵종 유출 시나리오의 상대적 중요도가 직접적으로는 처분장 안전성평가와 관계가 없기 때문이다. 즉, 시나리오에 대한 우선순위를 매김으로써 상대적으로 처분장 안전성 확보에 중요한 시나리오에 대한 연구와 방호 조치를 우선적으로 실시할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 중저준위 방사성폐기물 처분장 안전성에 가장 심각한 영향을 줄 수 있는 시나리오에 대한 우선적인 연구에 의해 그 결과 정도가 미미하다고 밝혀진다면 상대적으로 덜 중요한 시나리오에 대한 연구와 방호 조치가 불필요하다는 것을 의미한다.

이상에서 다음 결론을 도출할 수 있다. 중저준위 방사성폐기물 처분장에서는 자연적 원인에 의한 시나리오가 인간활동 원인에 의한 시나리오보다 더 큰 중요도를 가진다. 그리고 이러한 시나리오들은 모두 지하수 침투와 직접적 관련이 있다. 그러므로, 앞으로 건설될 처분장은 지하수 침투를 방호, 검사, 측정하는 데에 우선적인 주의를 기울여 지하수에 대해 처분장이 안전하도록 설계되어야 하겠다.

표 1. 재구성된 시나리오에 대한 기술

기 호	시나리오에 대한 기술
S1	암반의 균열을 통한 지하수의 정상적인 흐름이 방사성핵종을 우물이나 샘으로 또는 하천이나 강으로 유출하는 시나리오
S2	암반의 균열을 통한 지하수의 정상적인 흐름이 충전재 실패로 인해 지연 작용없이 방사성핵종을 우물이나 샘으로 또는 하천이나 강으로 유출하는 시나리오
S3	균열형성 및 발달에 의해 정상적인 지하수의 흐름이 증가 및 비피압 대수층부터의 지하수가 유입되어 방사성핵종이 유출되는 시나리오
S4	시추가 처분장을 지표와 대수층으로 연결시키는 사건이 발생시켜 시추공이 폐기물을 관통함으로써 발생하는 시나리오
S5	폐기물/암석 상호작용과 폐기물의 영향에 의해 발생한 콜로이드 또는 유기착화제에 의한 시나리오

표 2. 시나리오의 상대적 중요도

부평가기준 \ 시나리오명	S1	S2	S3	S4	S5
실험자료(W ₁ W _{L1} L ₁)	0.048	0.020	0.009	0.014	0.012
이론적 연구(W ₁ W _{L2} L ₂)	0.081	0.054	0.015	0.022	0.027
결과 적용성(W ₁ W _{L3} L ₃)	0.009	0.005	0.005	0.007	0.006
법규적 제약성(W ₂ W _{M1} M ₁)	0.012	0.020	0.010	0.020	0.013
구조적 안정성(W ₂ W _{M2} M ₂)	0.070	0.016	0.043	0.015	0.036
방호 비용(W ₂ W _{M3} M ₃)	0.005	0.012	0.009	0.009	0.008
처분장 부지(W ₂ W _{M4} M ₄)	0.032	0.011	0.020	0.015	0.012
처분장 인구분포(W ₃ W _{N1} N ₁)	0.009	0.008	0.007	0.016	0.008
처분장 부지(W ₃ W _{N2} N ₂)	0.025	0.019	0.019	0.015	0.016
폐기물 유출량(W ₃ W _{N3} N ₃)	0.012	0.017	0.010	0.011	0.015
방호 비용(W ₃ W _{N4} N ₄)	0.006	0.010	0.004	0.005	0.008
방호 계측능(W ₃ W _{N5} N ₅)	0.007	0.008	0.007	0.006	0.010
S(i)	0.316	0.200	0.158	0.155	0.171

표 3. AHP 결과 및 Sugeno퍼지적분 결과 비교

	S1	S2	S3	S4	S5
AHP 결과	0.316	0.200	0.158	0.155	0.171
우선순위	1	2	4	5	3
Sugeno 결과	0.285	0.203	0.176	0.162	0.174
우선순위	1	2	3	5	4

참고 문헌

1. Cho, W. J., Probabilistic Safety Assessment of High-Level Radioactive Waste Repository with the Mechanistically Modeled Failure Rate, KAIST, 1990.
2. Thompson, B. G. J. & Sagar, B., The development and application of integrated procedures for post-closure assessment, based upon Monte Carlo simulation: the probabilistic systems assessment (PSA) approach, *Reliability Engineering & System Safety* 42 (1993)
3. 이재성, 중저준위 방사성폐기물 처분장에서 방사성 핵종 유출 시나리오의 상대적 중요도에 관한 연구, 서울대학교, 1994.
4. 김강열, 중저준위 방사성폐기물 처분장에서의 방사성 핵종 유출 시나리오의 상대적 중요도 평가, 서울대학교, 1995. 2.