

모의 저준위 방사성폐기물 동굴 지하수 유동 평가

황용수, 서은진, 강철형
yshwang@kaeri.re.kr

요약

저준위 방사성폐기물 안전성 평가를 위해 대상 부지를 선정하고 경계 조건을 도입하였다. 연안에 처분장이 위치할 경우를 가상하여 처분장 심도 및 단열까지의 거리 등에 대한 지하수 유동 민감도를 분석하였다. 또한 처분장 진입 터널이 지하수 유동에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 통하여 각 암반별 이동 거리 및 시간을 CONNECTFLOW를 이용해 산정하고, 그 결과들이 방사선적 안전성 종합 평가 코드인 MASCOT의 입력 자료로 활용되도록 하였다.

Key Words: 지하수 유동 평가, 방사선적 종합 안전성 평가, 이동 시간, Connectflow

1. 서론

2008 년 준공 예정인 저준위 방사성폐기물 처분장의 인허가를 위해서는 관련 서류들과 함께 안전성분석보고서와 환경영향평가서의 평가서 작성이 필요하다. 안전성분석보고서 중 가장 중요한 처분장 폐쇄 후 장기 방사선적 안전성 평가에서 고려되어야 할 주요 사항들은 아래와 같다.

- (1) 처분 동굴 터널 배치도와 같은 처분 터널 및 주변 공학적 방벽 설계 자료
- (2) 처분 터널에 거치될 18 가지 평가 대상 핵종들에 대한 선원항(inventory) 정보
- (3) 처분 용기에 함유된 핵종들의 유출 및 인간 생태계로의 이동을 기술하는 사건 (FEP: Features, Events, Processes) 목록 개발
- (4) 사건들로 구성된 처분 핵종 이동 시나리오(Scenario) 구성
- (5) 각 시나리오 별 안전성 평가를 위한 방법론 설정
- (6) 공학적/천연 방벽의 불확실성을 고려한 입력 인자 설정
- (7) 연간 개인 선량(Annual individual dose)이나 위험도(Risk) 평가
- (8) 수정 설계 및 수정 설계안에 대한 평가

본 논문에서는 상기 8 단계의 저준위 방사성폐기물 동굴 처분 안전성 평가 단계 중 (6) 항에 해당하는 지하 매질에서의 지하수 유동 평가 단계에 대해 방법론 및 결과물을 제시하고자 한다. 저준위 방사성폐기물 처분 안전성 평가에 있어서 지하수 유동 평가는 처분 동굴, 공학적 방벽, 천연 방벽, 천연 방벽과 생태계 접면(Geosphere Biosphere Interface: GBI)에서의 지하수 이동 거리(path length), 시간(travel time), 유입 속도(Darcy velocity) 등을 2차원 혹은 3차원 유동 평가를 통해 산정해 종합 안전성 평가 코드인 MASCOT-K나 AMBER의 입력 자료로 최종적으로 사용된다.

2. 평가 대상 지역 경계 조건

평가 대상 지역은 왼쪽에 육지가 오른쪽에 바다가 존재하므로 해수 존재를 고려한 경계 조건들을 설정해야 한다. 모델링 대상 지역 선정 시 왼 쪽 경계 조건은 높은 산의 존재로 인해 불투수 경계 조건이 유효하며, 육지 상부 지역에서는 지하수위에 따라 경계 조건이 설정되어야 하며, 바다에서는 염수를 고려한 경계 조건이 오른쪽에서는 지형 특성을 고려해 불투수 경계 조건이, 하부는 불투수층의 존재를 고려해 불투수 조건이 설정되어야 한다.

3. 평가 입력 자료

그림 1은 평가 지역의 단면 모식도이다. 단열(폭 50m)은 중앙부 30m, 양 측면으로 단열 후광 지역(Fault halo)이 각각 10m씩 발달한 것으로 가정하였다. 설계 자료에 따라 본 연구에서는 처분장 길이 140m, 처분 동굴은 높이 19.7m로 하며 처분장의 심도는 각각 60, 80, 120m로 선정하였다.

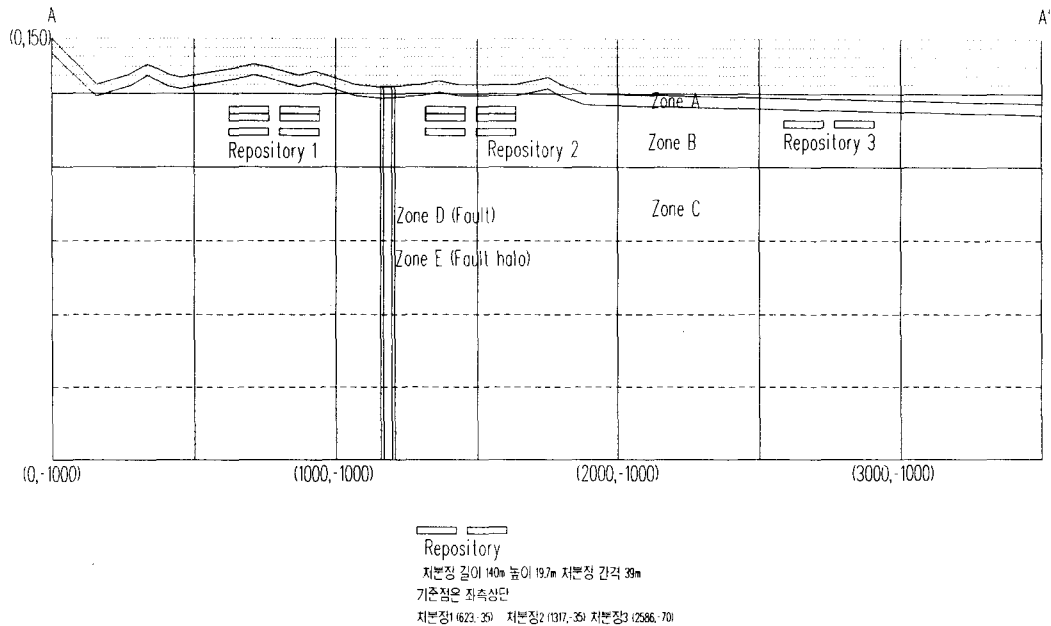


그림 1. 평가 지역 모식도

표 1은 본 연구에서 사용한 입력 자료인 투수 계수와 공극률을 나타낸다.

표 1. 지하수 유동 평가 입력 자료

Items	Permeability(m ²)	Porosity	
Zone A	1.0E-14	0.05	
Zone B	1.0E-15	0.01	
Zone C	1.0E-16	0.005	
Fault zone	Zone A	1.0E-13	0.05
	Zone A Halo	1.0E-14	0.025
	Zone B	1.0E-13	0.02
	Zone B Halo	1.0E-14	0.005
	Zone C	1.0E-14	0.01
	Zone C Halo	1.0E-15	0.0025

4. 지하수 유동 평가

처분 동굴의 심도와 위치에 따른 지하수 이동 및 그에 따른 방사선적 영향을 평가하기 위해서 본 연구에서는 그림 2에 도시된 바와 같이 처분장의 위치를 3곳으로 고려하였다. 즉 단열 왼편에 위치한 처분장 R1과, 단열 오른쪽에 위치한 처분장 R2와 해저에 위치한 처분장 R3를 고려해 지질 지형 조건에 따른 지하수 유동 및 그에 따른 방사선적 안전성을 평가하고자 하였다. R1, R2, R3는 그림에 도시된 바와 같이 2열의 처분 동굴로 구성되어 각 열별로 총 40 만 드럼의 방사성 폐기물을 처분한다고 가정하였다. 처분장 주변 암반 분포는 상부에는 풍화된 응회암, 그 하단의 처분장 위치에는 상대적으로 신선한 응회암이 하단에는 핵종 흡착능이 높은 화강암으로 이루어져 있다고 가정한다.

수리 평가에 사용된 처분장 이름은 U는 상단, R은 중간, L은 하단에 위치한 처분장을 각각 나타내며 왼쪽 열을 2, 오른쪽을 5로 표시하였다. 즉 단열 왼쪽 처분 동굴을 단열로부터 먼 것을 12 가까운 것을 15가 되며, 단열 오른쪽 처분장에 대해서는 단열에 가까운 처분 동굴을 22 먼 것을 25가 된다.

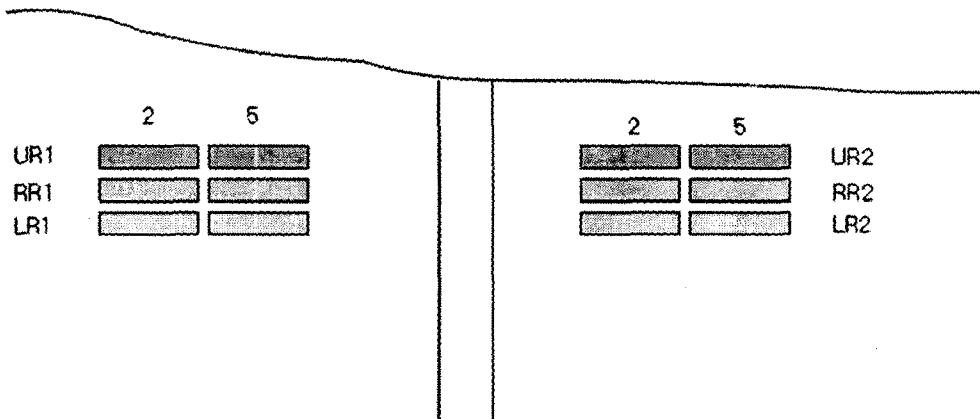
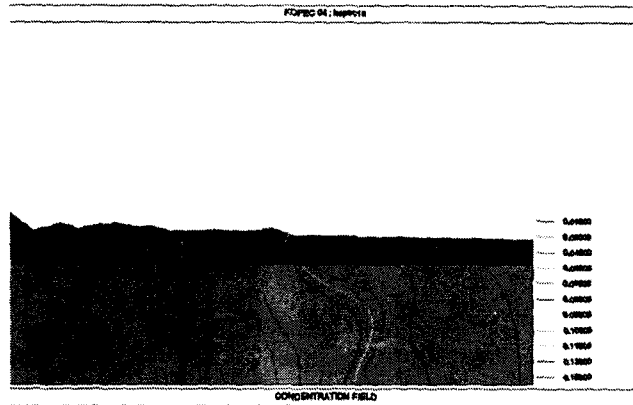


그림 2. 각 위치 별 심도에 따른 명명법

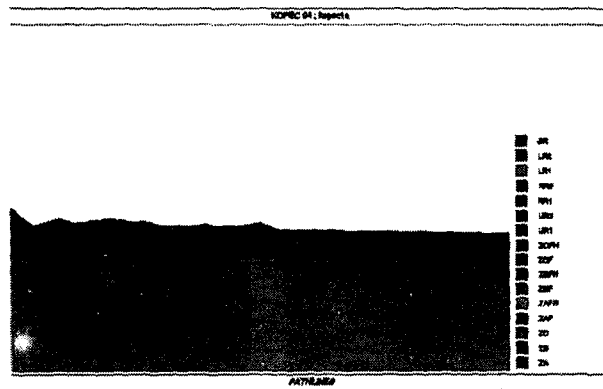
그림 3은 평가 대상 지역에서의 해수 침투 현상을 NAMMU로 해석한 것이다. 담수 이동과 해수 이동은 서로 커플링 되어 있으며 이와 같은 해석을 위해서 NAMMU에는 Newton-Ralphason 방법을 기초로 해수 침투를 규명할 수 있는 기능이 있다.

평가 대상 처분장은 연안에 위치하고 있으므로 해수 침투에 의한 영향을 평가하는 것이 필요하다. 해수 침투는 담수 지하수의 분포를 변화시킬 뿐 아니라 처분장 내 시멘트 및 철 구조물의 열화를 촉진시키고 밴토나이트 방벽의 팽윤을 저지하며 흡착능을 저감시키기도 한다. 그림에 나타난 바와 같이 3 군데 처분장 중 해저에 위치한 처분장의 경우 해수의 농도가 매우 높으나 단열 우측에 위치한 처분장의 경우 염수의 농도가 1% 정도이며 단열 왼편에 위치한 처분장의 경우 해수 침투의 영향은 무시할 수 있다.



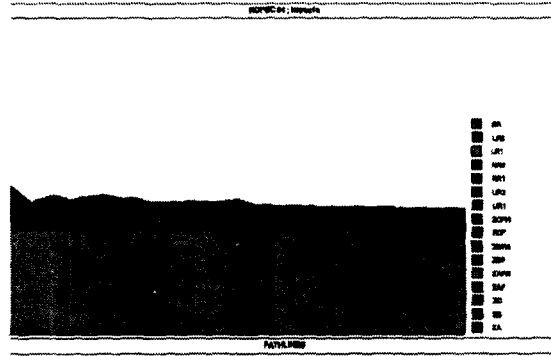
KOPEC 1a Salt
그림 3. 해수 침투 평가 결과

그림 4는 단열 우측 처분장에서 지하수 유동 경로를 나타낸 것이다. 그림에서 도시된 바와 같이 UR, RR 동굴로부터의 좌측 가장 자리로부터의 유출 경로는 처분장 좌측 골짜기로 연결되며 그 외의 유출 경로는 처분장 우측에 위치한 단열로 연결되어 최종적으로 지표면으로 나오게 된다.



KOPEC1aR1
그림 4. R1 처분장으로부터의 지하수 이동 경로 해석 결과

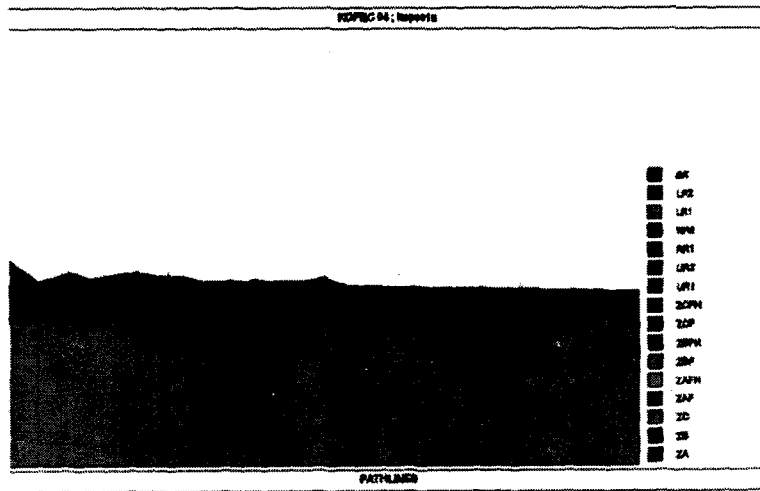
그림 5는 R2 처분장에서의 지하수 이동 경로 해석 결과를 도시한 것이다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 처분장이 연안에 위치하게 되고 또한 내륙에 투수 계수가 상대적으로 높은 단열이 존재하고 지표 지형이 단열로의 국지적인 지하수 유동을 유도하게 되면 같은 처분 심도에서도 미세한 횡축으로의 위치 변화에 따라 지하수 유동 경로가 변화하게 되어 일부는 내륙으로 일부는 해양으로 향하는 복잡한 지하수 유동 경로가 발생하게 된다. 또한 국지적인 표고 분포로 인해 일부 지하수 이동 경로는 단열이나 해양 쪽이 아니라 처분장 상부로 바로 올라갈 수 있다. 이와 같은 경우 비교적 긴 이동 거리가 긴 다른 이동 경로들의 장점이 무시되게 되므로 보다 정확한 평가를 통해 처분장 동굴 위치 및 심도를 정하는 작업이 요구된다.



KOPEC1aR2

그림 5. R2 처분장으로부터의 지하수 이동 경로 해석 결과

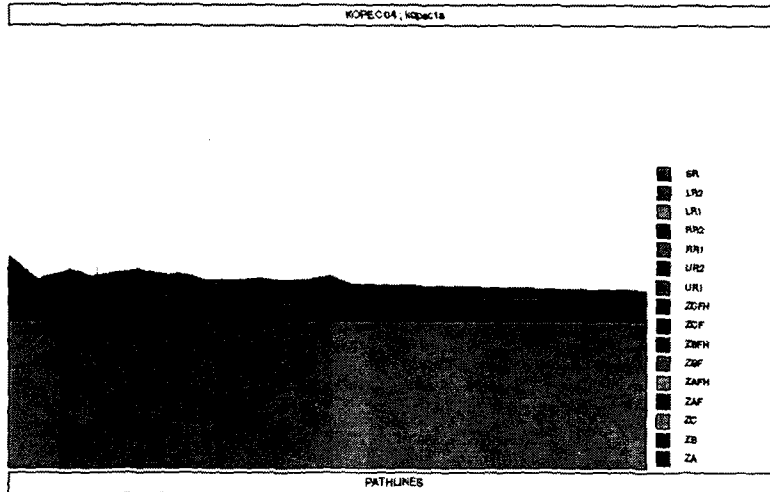
그림 6은 해저에 위치한 R3 처분장으로부터의 지하수 이동 경로를 예측한 것이다. 본 연구에서는 해저 퇴적층의 투수 계수에 대한 정보가 없어 본 연구에서는 퇴적층의 투수 계수를 보수적인 관점에서 일반 표토층의 투수 계수로 가정하였다. 이와 같은 입력 자료를 사용한 결과 퇴적층의 차수 효과가 반영되지 못해 R3 처분장으로부터 이동 경로 거리와 이동 시간이 짧게 산출되었다.



KOPEC1aR3

그림 6. 해저 처분장으로부터의 지하수 이동 경로 해석 결과

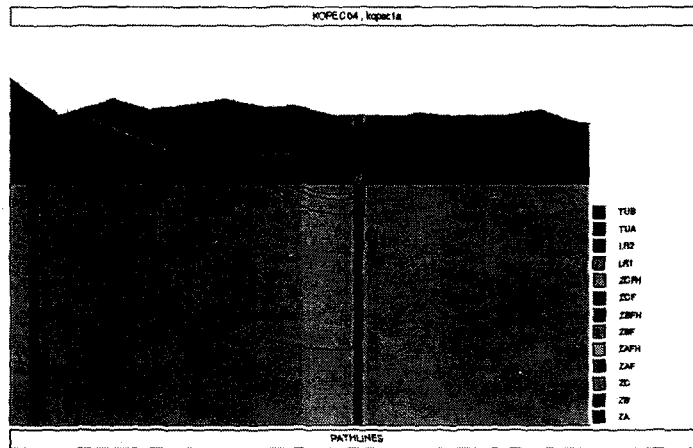
그림 7은 ZA층의 투수 계수를 10 배 감소 시켰을 경우 지하수 이동 경로 및 시간에 대한 평가 결과이다. 평가 결과 표토층의 투수 계수 변화는 해수 침투 및 각 R1, R2, R3 처분장에서의 지하수 이동 경로에 거의 영향을 미치지 못하였다.



KOPEC 4c R1 – ZA k 1 order lower

그림 7. ZA 층의 투수 계수를 10 배 를 10배 낮출 경우 R1 처분장에서 지하수 이동 해석 결과

그림 8은 진입 동굴을 고려한 경우 지하수 이동 경로 및 시간의 변화를 평가한 것이다. 진입 동굴의 경우 일반적으로 주변 암반과 같은 투수 계수를 가지도록 충전하는 것이 이상적이나 현실에서는 투수 계수가 주변 암반보다 높게 시공될 수도 있다. 그림에 나타난 바와 같이 진입 동굴의 투수 계수 변화는 진입 동굴 근처 국지적인 지역에서만 지하수 이동 경로에 영향을 미쳤다. 이는 진입 동굴이 좌측 내륙 지방으로 위치하였고 현재 지표 지형 조건에서는 진입 동굴 투수 계수 변화로 인한 영향이 처분장 좌측 경계면과 가까운 지역에만 영향을 미쳤기 때문이다.



KOPEC 16c – Tunnel k 1 order higher

그림 8. 진입 동굴의 투수 계수가 주변 암반보다 10배 증가할 경우 지하수 이동 경로 해석 결과

5. 결론

본 연구 결과 단열의 위치 및 투수 계수는 처분장 안전성에 큰 영향을 미친다. 처분장에서 단열의 위치가 너무 가까워지면 이로 인한 영향으로 처분장 안전성이 심대하게 영향을 받을 수 있으

므로 처분장이 이러한 위치에 입지해서는 안된다고 주장 할 수도 있으나 이러한 주장을 하기 위해서는 보다 세부적인 평가가 수행되어야 한다.

지하수 유동에 영향을 주는 주요 인자로는 단열 주변 암반 및 단열의 투수 계수와 지표 지형이 도출되었다. 이들의 영향은 독립적으로 나타나는 것이 아니라 서로 상호 결합되어 나타나므로 어느 부지가 적절한지 아닌지를 판정할 수 있는 단일 기준은 성립될 수 없고 예비 지하수 유동 평가를 수행해야지만 어느 부지가 다른 부지에 비해 상대적으로 천연 방벽의 역할을 적절하게 수행한다고 판정할 수 있을 것이다.

본 연구 대상 지역에서는 미세한 지표 지형 변화에도 처분장 지하수 유동 경로가 변화하였다. 이에 대한 원인은 왼쪽 경계면 선정에 있을 수 있다. 만일 충분히 높은 산을 왼쪽 경계면으로 지정했으면 현재 평가에서 나타나는 국지적인 지표 지형 굴곡으로 인한 국지적인 지하수 유동 현상이 사라지고 왼쪽 경계면으로 인해 좌측에서 우측으로 밀고 내려오는 지하수 흐름이 처분장 주변을 지배할 것이다. 장기적으로 큰 홍수나 해일 등이 발생하여 지층이 침식 등으로 변화하게 되면 처분장 안전성에 영향을 줄 수 있으므로 처분장 입지 시에 지표 지형이 지하수 유동 체계에 민감한 부지는 되도록 피해야 한다.

본 연구에서 사용한 투수 계수 값들은 스웨덴 SFR이나 핀란드 Loviisa와 VLJ 처분장의 동일 심도에서의 투수 계수 값들에 비해 1-2 order 씩 높다. 투수 계수가 높은 경우에는 지표 지형이 처분장 주위 지하수 유동에 상대적으로 큰 영향을 미치게 되며, 지화학적 측면에서도 산화 분위기의 강우수가 처분장으로 유입될 수 있어 안전성에 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 진입동굴은 주변 암반에 비해 투수계수가 상대적으로 높으므로 지하수 유동의 주요 통로 역할을 할 수 있다. 따라서 처분장 우측 해안 지방에 진입 동굴이 위치할 경우 처분장에서 유출된 방사성 핵종들이 진입 터널을 통과해 지표면으로 유출될 개연성이 높으므로 진입 동굴은 처분장 좌측인 내륙 지방에 위치하는 편이 안전하다.

본 연구에서는 처분장을 3 가지 다른 심도에 위치한다고 가정한 후 심도 변화에 따른 안전성을 평가해 보았다. 단열에 근접한 처분장 (R15)의 경우 유출 경로가 처분장 근방에 위치한 단열을 통한 것이어서 상대적으로 처분장 심도의 영향이 적었다. 그러나 처분장 위치가 단열로부터 상대적으로 먼 처분장(R12)의 경우는 심부 암반 지역을 통과하는 유동 경로가 형성되었다. 이와 같은 유동 경로가 형성되는 경우 처분장 안전성이 상대적으로 높아지며 미세하나마 심도에 대한 영향을 보이고 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가원자력중장기연구사업 및 (주)한국전력기술이 주관하는 연구 프로젝트를 통해 수행되었습니다.