

Fault Reactivation에 의한 가상 방사성폐기물 처분장 주변 지하수 유동 변화 평가 : 2차원 케이스 스터디

서은진, 황용수, 한지웅 (한국원자력연구소)

1. 서 론

지하 심부에 거치된 고준위 방사성폐기물은 지하수에 용해되어 용기가 부식된 후, 확산에 의해 벤토나이트 완충재, 분산 및 이류를 통해 결정질 암반층을 통과한 후 최종적으로 지역 주민들이 거주하는 생태계로 유출된다. 이와 같이 유출된 방사성 핵종 이동은 지하수 유동 경로를 따라 이루어지므로 지하수 유동 평가 결과물은 처분장 안전성 평가를 위해 필요하다. 본 연구에서는 다공질 매질에서의 지하수 유동 해석 코드인 NAMMU [1]를 이용하여 처분장 폐쇄 후 주변 단열이 재활성화되어 단열 특성이 변할 경우 지하수 유동에 끼치는 영향을 분석해 보았다. 이러한 지하수 유동 평가 결과는 처분장 안전성 평가 코드인 MASCOT-K [2]에서 필요한 유동 경로 길이 및 시간 산정에 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 구체적인 단열 재활성화 시점이 지하수 유동에 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 수행함으로써 미래 특정 시점의 자연 환경 변화가 처분 안전성에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고자 한다.

2. 본 론

일반 대중들이 방사성폐기물 처분장 안전성을 우려할 때 대두되는 문제 중 하나가 기존 단층이 재활성화 될 경우 전체 처분장 안전성에 큰 영향이 없느냐는 것이다. 이러한 국민적 우려를 불식시키고 처분 안전성에 대한 신뢰성을 제고하기 위해서는 처분장 주변 단층대가 재활성화 될 경우 이 영향에 의한 지하수 유동 및 방사성 핵종 유출 현상을 예측하는 연구가 필요할 것이다. 본 논문에서는 단층 재활성화에 따른 지하수 유동 변화 현상을 정량적으로 분석하고 이 결과를 이용해 추후 방사선적 안전성 평가를 수행하고자 한다.

2.1 평가 모델링

본 연구에서는 지표면 내 전체 표토 층과 암반이 포화되었다고 가정하고 가상의 처분 위치를

설정하여 정상 상태에서의 2차원 지하수 유동 평가를 수행하였다. 전체 암반이 포화되었다는 가정 하에서는 지하수위 분포는 지표면을 따라 설정된다. 고준위 방사성폐기물 처분장은 지하 심부에 위치하므로 이러한 지표 경계의 설정이 지하 심부에서의 지하수 유동 평가 결과에 미치는 영향은 크지 않을 것이라 생각된다.

그리고 미래 불특정한 시점에 처분장 인근 단열이 재활성화되어 단열 특성값인 투수계수와 폭이 변한 경우를 가정하였다. 본 평가에서 적용한 단열 특성값의 변화는 우리 나라 양산 단층대 내 입실 단층의 자료를 이용하여 예측하였다. 입실 단층대의 경우 지진으로 인해 기존 단층대에 약 1.2 m 정도의 추가적인 변화가 발생한 것으로 제시 [3]되고 있으며 보수적인 관점에서는 처분장 중심이나 주변에 강력한 지진이 발생하더라도 유출된 방사성 핵종들의 이동 통로인 단층대는 10 m 이하의 변화를 겪을 것으로 판단해도 무리가 없을 것이라는 연구 결과 [3]를 바탕으로 본 평가에서는 극히 보수적인 관점에서 단열 변화값을 투수계수가 10배, 폭이 10 m 증가한 것으로 가정하였다.

그림 1은 평가 대상 지역을 나타낸다. 그림 1의 두 개의 단열(fracture) 중 오른쪽에 위치한 단열 (fracture 2)이 미래 불특정 시점의 자연 변화로 재활성화된 경우를 가정하였다. 또한 각 단열은 중앙부 외에 양 측면으로 단열 후광 지역(fault halo)이 각각 발달한 것으로 설정하였으며 처분장의 위치에 따른 단열 변화로 인한 영향을 분석해 보았다.

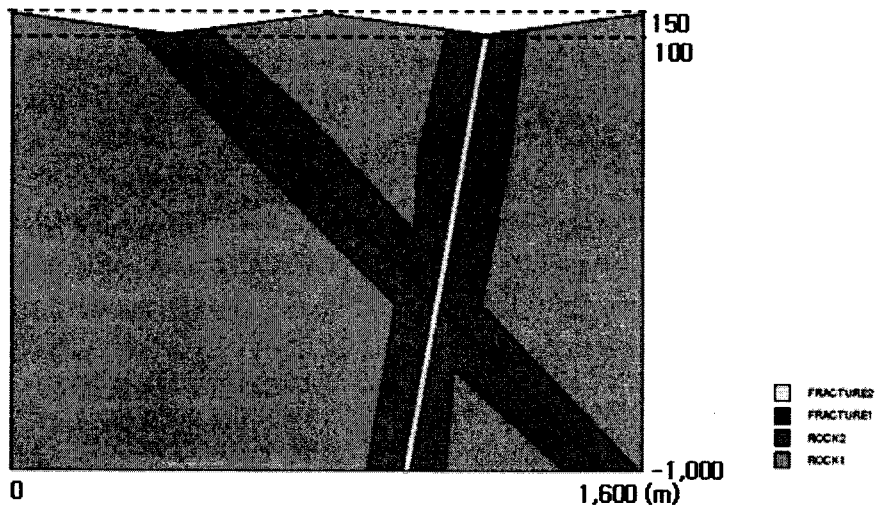


그림 1. 평가 대상 지역 및 암반 구성도

2.2 평가 입력 자료 및 경계조건

표 1은 NAMMU 코드를 이용한 지하수 평가 입력 자료인 투수 계수와 공극률을 나타낸다. 단열 재활성화된 경우 단열의 투수계수가 10배, 폭이 10 m 가 증가한 것으로 보수적으로 가정하였다.

표 1. 지하수 유동 평가 입력 자료

Items		Permeability(m ²)	Porosity	Aperture(m)
Before Fault Reactivation	Rock 1	1.0E-15	0.03	
	Rock 2	1.0E-14	0.03	
	Fracture 1	1.0E-13	0.03	10
	Fracture 2	1.0E-13	0.03	15
After Fault Reactivation	Rock 1	1.0E-15	0.03	
	Rock 2	1.0E-14	0.03	
	Fracture 1	1.0E-13	0.03	10
	Fracture 2	1.0E-12	0.03	25

본 평가에서는 지표면 내 전체 표토 층과 암반이 포화되었다고 가정하므로 육지 상부 경계 조건은 지하수위 분포 라인을 따라 설정된다. 지하수위 아래에 위치한 암반은 잔류 지하수 압력 (residual pressure)을 받으므로 아래와 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$P^R = \rho_f g z$$

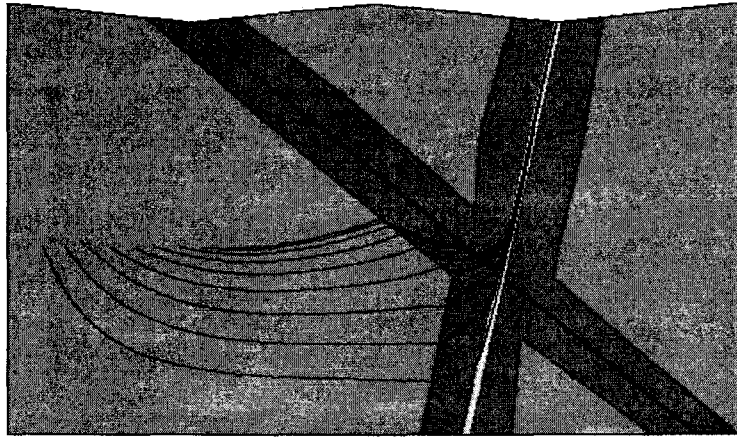
여기서 ρ_f 는 담수의 밀도이고,
 g 는 중력 가속도
 z 는 해수면으로부터의 표고차이다.

그리고 평가 영역 오른쪽과 왼쪽 경계는 지형 특성을 고려해 불투수 경계 조건이, 하부는 불투수층의 존재를 고려해 불투수 경계 조건이 설정되었다.

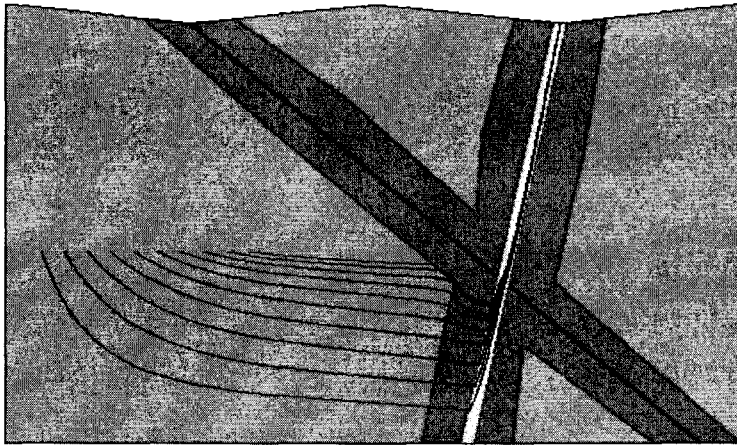
2.3 평가 결과

가상 고준위 방사성폐기물 처분장의 위치 (지하 심도 500 m)를 단열로부터의 거리를 기준으로 다양하게 설정하여 단열 재활성이 처분장에서의 지하수 이동에 미치는 영향을 분석해 보았다.

그림 2는 단열로부터 왼쪽으로 500 - 1,000 m 떨어진 곳에 위치한 처분장으로부터의 지하수 유동 경로를 나타낸다. 그림 2의 (a)와 (b)의 유동 경로를 비교하면 알 수 있듯이 단열 2가 재활성화된 후 일부 지하수 유동 경로는 통과 지역이 변경되는 등 변화를 보이고 있다. 전체 유동 속도를 비교해 보면 최대 1.6배 정도 빨라진 것을 알 수 있었다. 이는 단열로부터의 거리가 멀어 단열 재활성화로 인한 영향을 상대적으로 적게 받았기 때문으로 생각된다. 또한 각 유동 경로에서 단열 2를 통과할 때의 유동 속도만을 비교해 보면 단열에 가까운 위치일수록 유동 속도가 빨라지며 최대 1.6배까지 증가하였다.



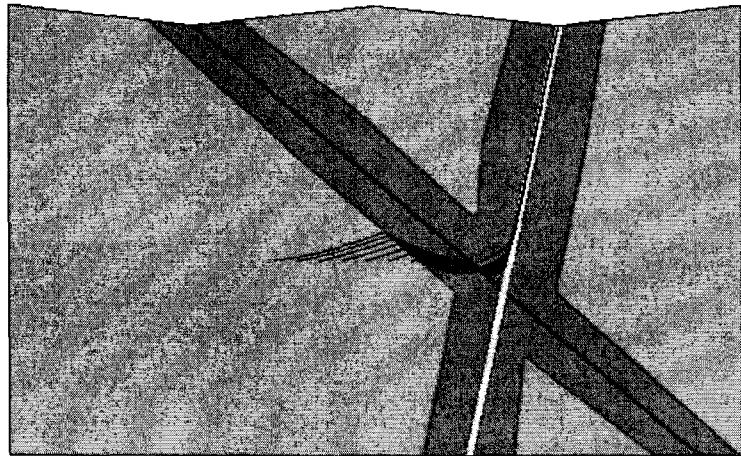
(a) 단열 재활성화 전



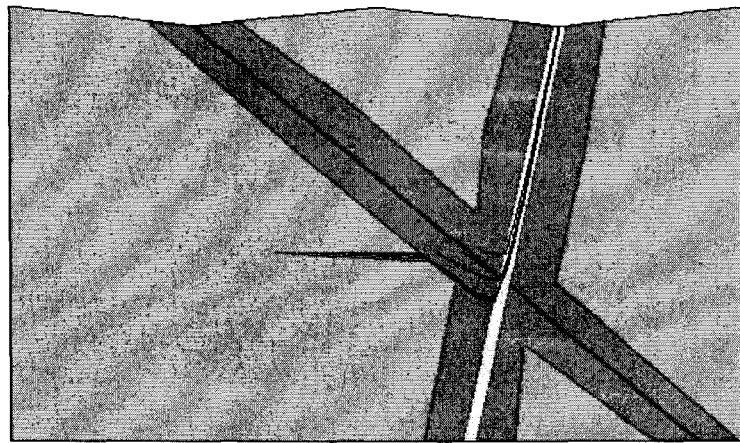
(b) 단열 재활성화 후

그림 2. 단열 왼쪽 500 - 1,000 m 지역에서의 지하수 유동 해석 결과

그림 3은 단열에서 왼쪽으로 50 - 450 m 떨어진 위치로부터의 지하수 유동 경로를 나타낸다. 단열 2가 재활성화된 후 유동 경로가 변경되며 실제 지하수 유동 속도도 증가함을 알 수 있었다. 특히 단열로부터 100 m 내에 위치한 경우 최대 4배까지 유동 속도가 증가하였다. 또한 단열에 가까울수록 재활성 단열 2를 통과하는 경로 뿐만 아니라 다른 암반을 통과하는 경로의 유동 속도 또한 2-3배까지 증가하였다. 이는 재활성 단열 2가 투수계수와 폭의 증가로 인해 인접한 지역을 통과하는 지하수 유동에 미치는 영향이 커진 때문으로 생각된다.



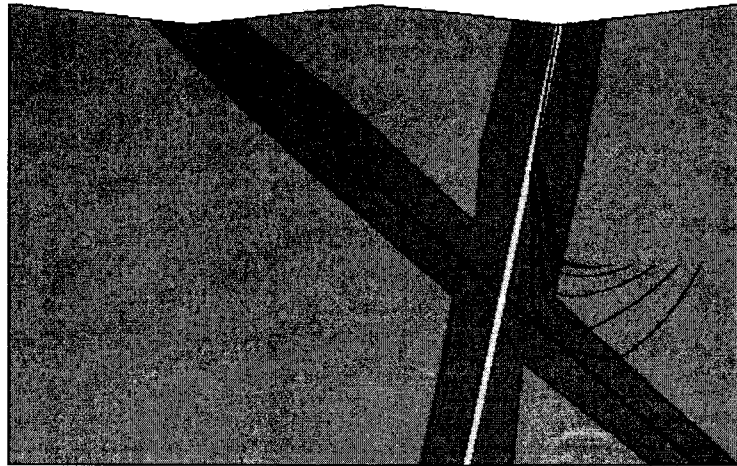
(a) 단열 재활성화 전



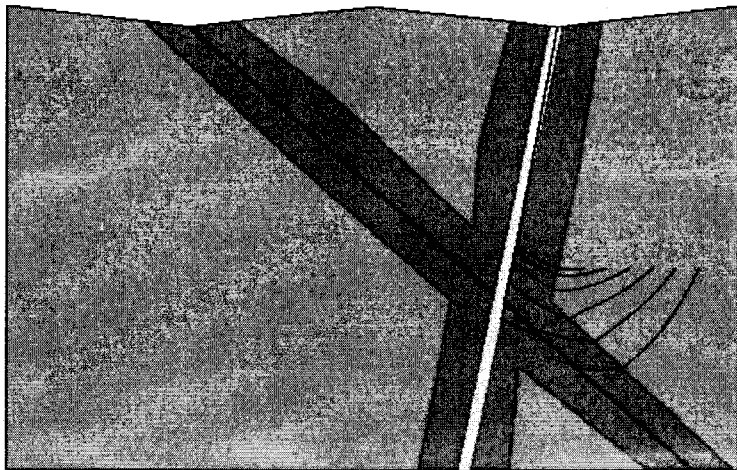
(b) 단열 재활성화 후

그림 3. 단열 왼쪽 50 - 450 m 지역에서의 지하수 유동 해석 결과

그림 4는 단열에서 오른쪽으로 50 - 400 m 떨어진 위치에서의 지하수 유동 경로를 나타낸다. 단열 2가 재활성화된 후 유동 경로가 변화하였고 실제 지하수 유동 속도는 최대 1.5배까지 증가하였다. 본 평가 케이스의 경우 단열 오른쪽에 위치한 처분장에서는 단열 재활성화로 인한 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있었다. 이는 단열 2가 재활성화되기 전에는 단열 2를 통과하는 유동 거리가 짧음으로 인해 상대적으로 단열 2의 변형으로 인한 영향이 적었기 때문으로 생각할 수 있다.



(a) 단열 재활성화 전



(b) 단열 재활성화 후

그림 4. 단열 오른쪽 50 - 400 m 지역에서의 지하수 유동 해석 결과

처분장의 위치별 지하수 유동 평가에서 재활성화된 단열에 근접할수록 재활성화가 유동 속도에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 본 평가 영역의 경우 처분장이 변형된 단열에 가깝게 위치한다 하더라도 최대 4배까지 유동 속도가 증가하였다. 그러나 본 평가에서는 기존 조사 자료를 참조하여 단열 변위값을 최대한 보수적으로 설정하였으므로 이러한 유동 속도 증가값은 처분 안전성 평가 관점에서 지하 매질의 투수계수의 불확실성 등에 비해 처분 안전성에 크게 영향을 미치는 요소가 아닌 것으로 판단된다.

표 2는 이러한 지하수 이동 평가 결과 각 처분 위치에서 지표면까지의 이동 거리와 소요 시간 및 이동 속도를 정리한 결과이다. 경로 1-10은 단열 왼쪽 위치에서의, 경로 11-12는 단열 오른쪽 위치에서의 유동 결과를 나타낸다.

표 2. 각 처분 위치별 지표면까지 이동 거리와 시간 및 속도 요약

단열 재활성화 전	PATH	TRAVEL TIME (YEARS)	PATH LENGTH (M)	Avg. Velocity (M/Yr)
	1	3.62E+04	1.83E+03	5.05E-02
	2	3.14E+04	1.65E+03	5.27E-02
	3	2.69E+04	1.54E+03	5.74E-02
	4	7.47E+03	9.94E+02	1.33E-01
	5	6.18E+03	9.44E+02	1.53E-01
	6	4.78E+03	8.95E+02	1.87E-01
	7	3.28E+03	8.45E+02	2.58E-01
	8	2.03E+03	7.77E+02	3.82E-01
	9	1.23E+03	7.19E+02	5.86E-01
	10	8.70E+02	6.42E+02	7.38E-01
	11	1.49E+04	1.07E+03	7.17E-02
	12	2.17E+04	1.26E+03	5.79E-02

단열 재활성화 후	PATH	TRAVEL TIME (YEARS)	PATH LENGTH (M)	Avg. Velocity (M/Yr)
	1	2.52E+04	1.97E+03	7.84E-02
	2	2.19E+04	1.83E+03	8.36E-02
	3	1.96E+04	1.71E+03	8.75E-02
	4	5.59E+03	1.11E+03	1.98E-01
	5	4.32E+03	1.06E+03	2.45E-01
	6	3.03E+03	1.01E+03	3.32E-01
	7	1.72E+03	9.57E+02	5.56E-01
	8	9.13E+02	8.43E+02	9.23E-01
	9	3.36E+02	7.90E+02	2.35E+00
	10	3.08E+02	6.66E+02	2.16E+00
	11	1.09E+04	1.17E+03	1.08E-01
	12	1.52E+04	1.34E+03	8.83E-02

3. 결 론

본 연구에서는 고준위 방사성폐기물 처분장 폐쇄 후 주변 단열이 재활성화된 경우 처분장으로부터의 지하수 유동에 끼치는 영향을 분석해 보았다. 재활성화로 인한 단열 특성의 변화값은 우리나라 양산 단층대 내 입실 단층의 자료를 이용하여 최대한 보수적으로 예측하였다. 단열 재활성화가 지하수 유동에 미치는 영향을 처분장의 위치별로 평가한 결과 다수의 가상 처분 위치에서

유동 경로에 변화가 발생하였으며 유동 속도의 경우 최대 4배까지 증가하였다. 특히 재활성화된 단열에 가까이 위치한 경우와 재활성화된 단열을 통과하는 유동 거리가 길수록 단열 변형으로 인해 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그러나 재활성 단열의 변위값을 최대한 보수적으로 설정하였으므로 본 평가 결과가 처분 안전성 평가 관점에서 봤을 때 주요 현안이 아닌 것으로 판단되었다.

그리고 한국원자력연구소가 개발 중인 다차원 확률론적 안전성 평가 코드인 MDPSA [4]를 이용하여 단열 재활성화에 의한 지하수 유동을 해석한 결과 일부 유동 경로가 상이한 지역이 있었으나 대부분의 처분장 위치에서 본 평가 결과와 유사한 결론을 얻을 수 있었다.

향후 연구에서는 본 연구 결과를 이용한 방사선적 처분 안전성 평가와 함께 구체적인 단열 재활성화 시점이 지하수 이동 및 방사선적 처분 안전성에 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 수행할 예정이다.

■ 참고문헌 ■

1. L. J. Hartely, C. P. Jackson and S. P. Watson, 1998, NAMMU (Release 6.4) User Guide, AEA Technology.
2. Robinson, P. C. and Y. S. Hwang, 2002, Confidence Building in MASCOT-K, QRS-1106A-1, v3.0, Quintessa.
3. 황용수, 한지웅, 서은진, 이연명, 강철형, 2005, 자연재해 사건에 대한 방사성폐기물 처분장 안전성 평가 방법론, 한국방사성폐기물학회 춘계학술발표회.
4. Ji-Woong Han, Yong-Soo Hwang, and Chul-Hyung Kang, Oct. 27-28 2005, Numerical Method for the Multi-Dimensional Groundwater Flow Analysis in Fractured-Porous Medium with Topography, Kossge International Symposium on Soil& Groundwater Environment, Korea.