

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

서은진^{1)*}, 황용수¹⁾, 한지웅¹⁾

A Case Study on the Effect of Fault Reactivation on Groundwater Flow around a Hypothetical HLW Repository

Eun-Jin Seo, Yong-soo Hwang and Ji-Woong Han

Abstract Radionuclide released from corroded container migrates through groundwater flow pathway in the underground rock. Therefore it is important to study the groundwater flow analysis for total system performance assessment of a HLW repository. In this study assuming a geological change of underground rock in future, the two dimensional groundwater flow analysis is done by the NAMMU, the assessment code for groundwater flow in porous media. Assuming the hypothetical repository with the reactivation of fault in the vicinity of it, the effect of change in aperture and permeability by reactivation of fault around a repository on groundwater pathway is studied.

Key words Groundwater Flow Analysis, Total System Performance Assessment, Fault Reactivation, NAMMU

초 록 처분 용기 부식 후 유출된 방사성 핵종은 지하수 유동 경로를 따라 이동하게 된다. 따라서 지하 암반 내 지하수 유동 평가는 처분 안전성 평가를 위한 기본적인 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 처분 시스템 폐쇄 후 미래 특정 시점에서 지형의 변화가 지하수 유동 경로에 끼치는 영향을 다공질 매질에서의 지하수 유동 해석 코드인 NAMMU를 이용한 평가를 통해 확인해 보았다. 단열에 인접한 지역에 가상의 처분 시스템을 선정하고 처분 시스템 주위에 존재하는 단열의 재활성화가 발생하는 경우, 처분장으로부터의 지하수 유동에 끼치는 영향을 정량적으로 평가해 보았다.

핵심어 지하수 유동 평가, 안전성 평가, 단열 재활성화, NAMMU

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 유출될 수 있다. 이와 같이 유출된 방사성 핵종의 이동은 지하수 유동 경로를 따라 이루어지므로 지하수 유동 평가 결과물은 처분장 안전성 평가를 위해 필요하다. 본 연구에서는 다공질 매질에서의 지하수 유동 해석 코드인 NAMMU¹⁾를 이용하여 처분장 폐쇄 후 주변 단열이 재활성화되어 단열 특성이 변할 경우 지하수 유동에 끼

치는 영향을 분석해 보았다. 이러한 지하수 유동 평가 결과는 처분장 안전성 평가 코드인 MASCOT-K²⁾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

¹⁾ 한국원자력연구소

* 교신저자 : ejseo@kaeri.re.kr

접수일 : 2006년 6월 2일

심사 완료일 : 2006년 7월 20일

핵종 유출 현상을 예측하는 연구가 필요하다. 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 표토층과 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 우리나라 양산 단층대 내 입실 단층의 자료를 이용하여 예측하였다. 입실 단층대의 경우 지진으로 인해 기존 단층대에 약 1.2 m 정도의 추가적인 변화가 발생

한 것으로 제시³⁾되고 있으며 보수적인 관점에서는 처분장 중심이나 주변에 강력한 지진이 발생하더라도 유출된 방사성 핵종들의 이동 경로인 단층대는 10 m 이하의 변화를 겪을 것으로 판단해도 무리가 없을 것이라는 연구 결과³⁾를 바탕으로 본 평가에서는 극히 보수적인 관점에서 단열 변화값을 투수계수가 10배, 폭이 10 m 증가한 것으로 가정하였다.

Fig. 1은 평가 대상 지역을 나타낸다. Fig. 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.

2.2 평가 입력 자료 및 경계조건

Table 1은 NAMMU 코드를 이용한 지하수 평가 입력 자료인 투수 계수와 공극률을 나타낸다. 처분장 주변 암반 분포는 상대적으로 신선한 응회암으로 이루어져 있다고 가정하였고 단열의 투수계수와 공극률은 보

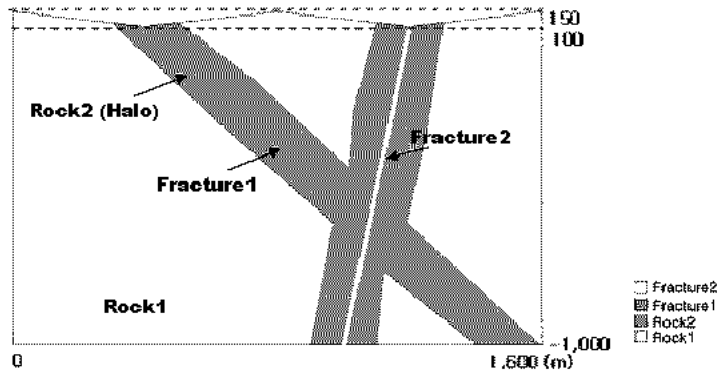


Fig. 1. Cross sectional view of geological strata

Table 1. Input data for groundwater flow analysis

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

수적으로 가정하였다.

단열이 재활성화된 경우에는 단열의 투수계수가 10 배, 폭이 10 m가 증가하는 것으로 그리고 공극률의 변화는 없는 것으로 하는 보수적인 가정을 적용하였다.

본 평가에서는 지표면 내 전체 표토층과 암반이 포화 되었다고 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.

Fig. 2는 단열로부터 왼쪽으로 500-1,000 m 떨어진 곳에 위치한 처분장 1 지역으로부터의 지하수 유동 경로를 나타낸다. Fig. 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.

Fig. 3은 단열에서 왼쪽으로 50-450 m 떨어진 처분장 2 지역으로부터의 지하수 유동 경로를 나타낸다. 단열 2가 재활성화된 후 유동 경로가 변경되며 실제 지하

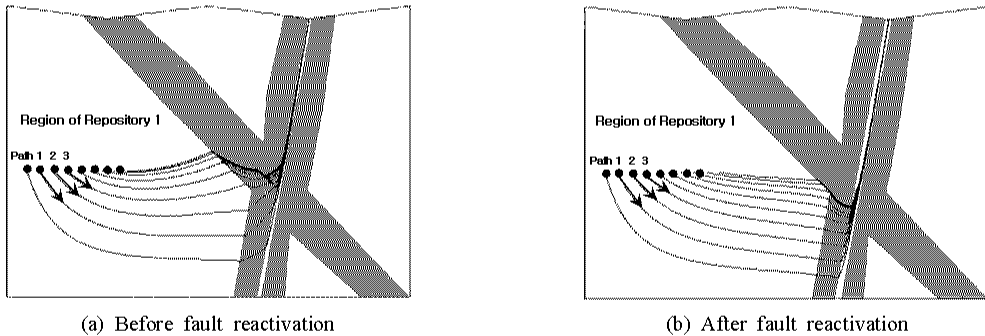


Fig. 2. Change of groundwater flow pathway affected by fault reactivation in the region of Repository 1

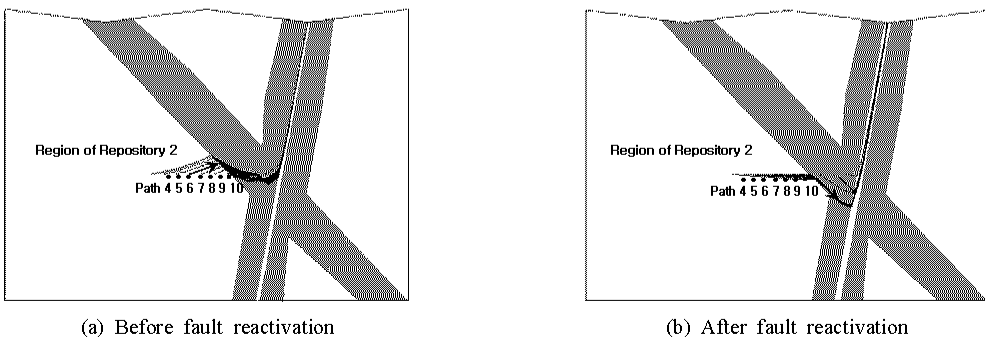


Fig. 3. Change of groundwater flow pathway affected by fault reactivation in the region of Repository 2

수 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 재활성화된 단열 2가 투수계수와 폭의 증가로 인해 인접한 지역을 통과하는 지하수 유동에 미치는 영향이 커진 때문으로 생각된다.

Fig. 4는 단열에서 오른쪽으로 50-400 m 떨어진 처분장 3 지역에서의 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 전 단열 2를 통과하는 유동 거리가 짧음으로 인해 상대적으로 단열 2의 변형으로 인한 영향이 적었기 때문으로 생각할 수 있다.

처분장의 위치별 지하수 유동 평가에서 재활성화된 단열에 근접할수록 재활성화가 유동 속도에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 본 평가 영역에서 처분장이 변형된 단열에 가깝게 위치한 경우 최대 4배까지 지하수 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.

Table 2는 이러한 지하수 이동 평가 결과 각 처분 위치에서 지표면까지의 이동 거리와 소요 시간 및 이동 속도를 정리한 결과이다. 경로 1-10은 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타나는 처분장 1, 2 지역의 지하수 경로에서 임의로 선택한 것이며 경로 11-12는 Fig. 4에서 나타나는 처분장 3 지역의 지하수 경로에서 임의로 선택한 것이다. Table 2에서 단열 재활성화 이전과 이후의 지하수

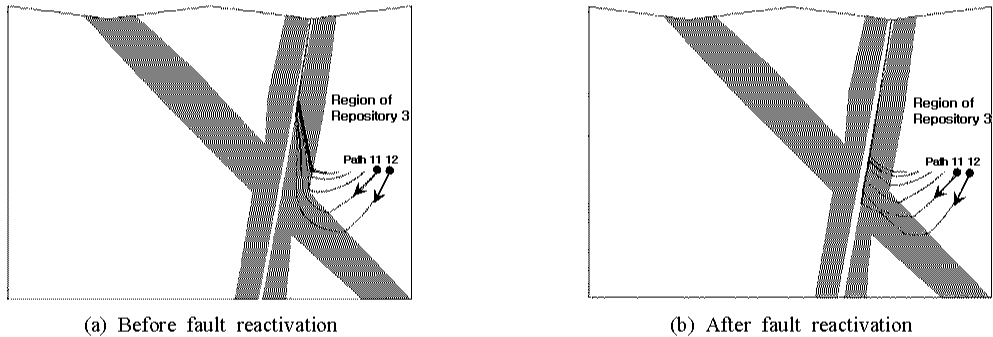


Fig. 4. Change of groundwater flow pathway affected by fault reactivation in the region of Repository 3

Table 2. Summary of groundwater flow study

	PATH	TRAVEL TIME (YEARS)	PATH LENGTH (M)	Avg. Velocity (M/Yr)		PATH	TRAVEL TIME (YEARS)	PATH LENGTH (M)	Avg. Velocity (M/Yr)
	Before Fault Reactivation	1	3.62E+04	1.83E+03		5.05E-02	After Fault Reactivation	1	2.52E+04
2		3.14E+04	1.65E+03	5.27E-02	2	2.19E+04		1.83E+03	8.36E-02
3		2.69E+04	1.54E+03	5.74E-02	3	1.96E+04		1.71E+03	8.75E-02
4		7.47E+03	9.94E+02	1.33E-01	4	5.59E+03		1.11E+03	1.98E-01
5		6.18E+03	9.44E+02	1.53E-01	5	4.32E+03		1.06E+03	2.45E-01
6		4.78E+03	8.95E+02	1.87E-01	6	3.03E+03		1.01E+03	3.32E-01
7		3.28E+03	8.45E+02	2.58E-01	7	1.72E+03		9.57E+02	5.56E-01
8		2.03E+03	7.77E+02	3.82E-01	8	9.13E+02		8.43E+02	9.23E-01
9		1.23E+03	7.19E+02	5.86E-01	9	3.36E+02		7.90E+02	2.35E+00
10		8.70E+02	6.42E+02	7.38E-01	10	3.08E+02		6.66E+02	2.16E+00
11		1.49E+04	1.07E+03	7.17E-02	11	1.09E+04		1.17E+03	1.08E-01
12		2.17E+04	1.26E+03	5.79E-02	12	1.52E+04		1.34E+03	8.83E-02

유동 속도를 비교해 보면 단열 재활성화로 인하여 각 처분 위치에서의 지하수 유동 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

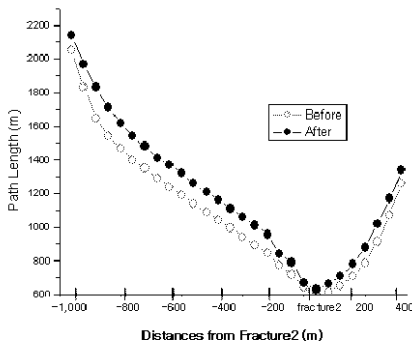
Fig. 5는 Fig. 2 - Fig. 4에 나타난 모든 처분 위치에 대하여 단열 재활성화로 인한 지하수 유동 거리와 유동 속도의 변화를 나타낸 것이다. 단열 재활성화로 인하여 전체 지하수 유동 길이는 큰 변화가 없지만 지하수 유동 속도는 그 증가폭이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 모든 처분 위치에 대하여 전체 경로에서의 단열 재활성화로 인한 유동 속도의 변화와 변형 단열인 단열 2를 통과할 때만의 유동 속도의 변화를 비교해 나타낸 것이다. 전체 경로의 유동 속도 변화 그림인 Fig. 6. (a)를 보면 변형된 단열 2와 가까운 지역에서만 상대적으로 큰 유동 속도 증가를 보이는 반면, 변형된 단열 2를 통과할 때만의 유동 속도 변화를

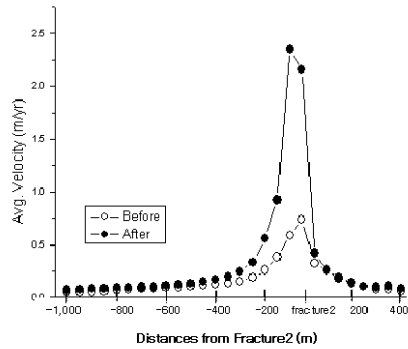
살펴본 Fig. 6. (b)에서는 대부분의 처분 위치에서 단열 2의 재활성화로 인한 유동 속도 증가를 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 고준위 방사성폐기를 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

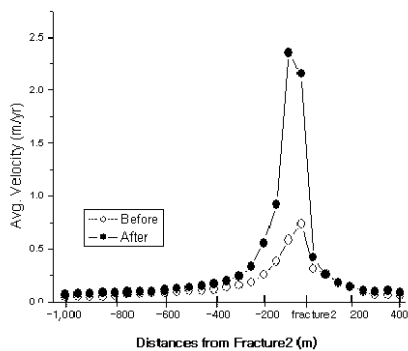


(a) Change of path length

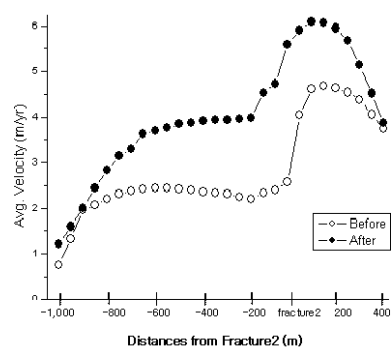


(b) change of flow velocity

Fig. 5. Change of path length and flow velocity affected by fault reactivation in groundwater flow



(a) Flow velocity in total pathway



(b) Flow velocity in fracture2 pathway

Fig. 6. Comparison for flow velocity between total pathway and fracture2 pathway

가까이 위치한 경우와 재활성화된 단열을 통과하는 유동 거리가 길수록 단열 변형으로 인해 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그러나 재활성 단열의 변위 값을 최대한 보수적으로 설정하였으므로 본 평가 결과가 처분 안전성 평가 관점에서 봤을 때 주요 현안이 아닌 것으로 판단되었다.

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.

서 은 진



1997년 경북대학교 공과대학 환경공학과
공학사
2001년 경북대학교 공과대학 환경공학과
공학석사

Tel: 042-868-2230
E-mail: ejseo@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소

황 용 수



1983년 서울대학교 공과대학 원자핵공
학과 공학사
1985년 캘리포니아 대학교 대학원 원자
핵공학과 공학석사
1992년 캘리포니아 대학교 대학원 원자
핵공학과 공학박사

Tel: 042-868-2034
E-mail: yshwang@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소

한 지 웅



1995년 인하대학교 공과대학 기계공학과
공학사
1997년 인하대학교 공과대학 기계공학과
공학석사
2004년 인하대학교 공과대학 기계공학과
공학박사

Tel: 042-868-4853
E-mail: jwhan@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구소