

Numerical simulation of groundwater flow in LILW Repository site:II. Input parameters for Safety Assessment

중·저준위 방사성폐기물 처분 부지의 지하수 유동에 대한 수치 모사: 2. 처분 안전성 평가 인자

Kyung Woo Park¹⁾, Sung-Hoon Ji, Yong Kwon Koh, Geon Young Kim and Jin Kook KIM*

Korea Atomic Energy Research Institute, Daedeokdaero 1045, Yuseong-gu, Daejeon

*Korea Hydro and Nuclear Power Co., LTD, Youngdongdaero 411, Gangnam-gu, Seoul

박경우¹⁾, 지성훈, 고용권, 김건영, 김진국*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

*한국수력원자력(주), 서울특별시 강남구 영동대로 411

(Received November 24, 2008 / Revised December 04, 2008 / Approved December 16, 2008)

Abstract

The numerical simulations for groundwater flow were carried out to support the input parameters for safety assessment in LILW repository site. As the input parameters for safety assessment, the groundwater flux into the underground facilities during construction, flow rate through the disposal silo after closure of disposal silo and flow pathway from the disposal silo to discharge area were analyzed using the 10 cases groundwater flow simulations. From the total 10 numerical simulation results, the statistics of estimated output were similar to among 10 cases. In some cases, the analyzed input parameters were strongly governed by locally existed high permeable fracture zone at radioactive waste disposed depth. Indeed, numerical simulation for well scenario as a human intrusion scenario was carried out using the hydraulically severe case model. Using the results of well scenario, the input parameters for safety assessment were also obtained through the numerical simulation.

Key words : LILW repository site, groundwater flow modeling, safety assessment

요 약

중·저준위 방사성폐기물 처분 부지 건설될 지하 시설물을 고려하여 지하수 유동 모델링을

1) Corresponding Author. E-mail : woosbest@kaeri.re.kr

수행하였으며, 처분 안전성 평가를 위해 건설 중 지하 시설물로의 지하수 유입량, 처분장 폐쇄 후 처분 사일로로 통과하는 지하수 유동량 및 처분 사일로에서 배출 지역까지의 지하수 유동로에 대한 이동 거리 및 단위 유량에 대한 입력 인자를 도출하였다. 처분장 건설 중 지하수 유입량 및 폐쇄 후 지하수의 유동량은 처분 심도에서 존재하는 다수의 투수성 구조 영역에 의해 영향을 받아 10가지 경우에서 각각 상이한 결과를 나타내었다. 지하수 유동로에 대한 지하수의 이동 거리 및 단위 유량에 대한 결과도 지하수의 유동로에 존재하는 투수성 구조 영역에 영향을 받는 것으로 분석된다. 가상의 인간 침입 시나리오를 위해 우물 시나리오를 가정하여 지하수 유동 모델링을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 처분 안전성 평가와 관련된 입력 인자를 도출하였다.

중심단어 : 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지, 지하수 유동 모델링, 처분 안전성 평가 입력인자

1. 서론

처분장으로부터 지하수를 통한 핵종의 이동 거리, 핵종의 용질 이송과 관련된 지연 특성, 처분 사일로로 흐르는 지하수 유량은 방사성폐기물의 처분 안정성 평가를 위해 경주처분 부지에서 도출되어야 할 주요한 입력 인자이다. 이들 인자는 부지특성조사 결과로 지질 특성, 지하수 유동 특성 및 용질 이동 특성이 잘 설명할 수 있는 종합적인 모델로서 평가 되었을 때 비로소 제시될 수 있다. 따라서 처분 안정성 평가 관련 부지특성조사에서 가장 중요하게 고려해야 할 부분은 처분 부지의 지질 환경을 잘 설명할 수 있는 모델이 제시 되는 것이다.

2005년 국내의 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지로 선정된 경주에서 처분 안전성 평가를 위해 일련의 부지특성평가가 수행되었다. 이러한 부지특성평가의 한 결과로서 Hybrid-EPM 접근 방법으로 지하수 유동 모델링을 수행하였다 [7]. Hybrid-EPM (Equivalent Porous Medium) 접근 방법은 추계론적으로 발생된 10개의 다른 단열망에서 도출된 수리전도도장을 지하수 유동 모델링의 영역에 반영하는 방법으로 부지특성조사 결과에서 투수성구조영역 (Hydraulic conductor domain, HCD), 수리암반영역 (Hydraulic rock domain, HRD)에 대한 자료를 도출하기 때문에 부지 고유의 특성을 반영할 수 있다.

일반적으로 결정질 암반에서 단열을 고려한 지하수 유동은 추계론적 연속체 개념, 분리단열망 개념 및 투

수성 단열을 통한 채널 (channel) 개념을 통해 해석하고 있다. 추계론적 연속체 개념은 현장 조사 결과 도출된 수리인자에 대한 통계적 자료를 이용하여 이를 추계론적 방법을 통해 다수의 가능성 있는 분포장을 구하고, 그 결과를 평균과 표준편차를 이용한 결과로서 제시를 하는 방법이다 [1]. 분리단열망 개념은 결정질 암반의 지하수는 암반 내 존재하는 단열을 통해서 흐른다는 가정 하에 단열의 밀도, 단열 간극 등 기하학적 특성을 이용하여 단열을 생성하고 단열의 투수량계수 (transmissivity, T) 등 수리학적인 특성을 이용하여 지하수의 유동을 해석하는 방법이다 [2, 3]. 채널 개념은 결정질 암반내 존재하는 전체 단열이 지하수의 유동에 관여하는 것이 아니라 일부 투수성 단열에 의해 전체적인 지하수의 유동이 지배를 받는 것을 가정하고, 투수성 단열만을 고려하여 지하수의 유동 및 용질 이송을 해석하는 방법이다 [4].

본 논문에서 이용한 Hybrid-EPM 방법은 추계론적 연속체 개념에 대한 매질의 수리인자 특성을 분리단열망 개념을 통해 도출한 방법으로, 결정질 암반의 지하수 유동 특성 해석에 대한 두 가지 방법을 혼합한 개념이다.

기존의 연구에 따르면 결정질 암반에서 단열에 대하여 추계론적 연속체 개념, 분리 단열망 개념 및 채널 개념으로 결정질 암반에서 지하수 유동 모델을 구성하여 각 모델의 결과를 평가하였는데, 각 모델에서 도출되는 방사성 폐기물 처분의 안정성 분석에 입력되는 인자는 비슷한 통계적 특성을 보였으며, 특히 지하

수의 이동거리 (travel time), 핵종의 지연특성 (transport resistance)과 처분용기를 통한 지하수 유동량 (canister flux)을 각 모델을 통해 도출한 결과, 경계 조건과 대상 영역의 수리지질특성이 보다 정확히 규명된다면 이 결과를 이용한 안전성 평가에 대한 불확실성은 상당히 감소될 수 있다고 하였다 [5]. 따라서, 본 논문을 위해 수행한 Hybrid-EPM의 접근 방법의 경우 중·저준위 처분 부지의 지하수 유동 모델링 결과는 안정성 평가 입력 인자로서 지하수에 따른 핵종의 이동거리, 처분 사일로를 흐르는 지하수의 유량에 대해 비교적 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 것으로 판단된다.

본 논문은 경주 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지에 대한 지하수 유동 모델링에 연속된 것으로 수치모의를 수행하여 도출한 지하수 유동 및 핵종 이송 관련 안전성 평가의 입력 인자에 초점을 맞추어 기술하였다.

II. 안전성 평가 입력 인자

가. 처분 시설 건설에 따른 지하수 유입량

처분 부지 주변에 위치하게 될 지하 시설물은 국도 31호선 도로 터널, 건설·운영동굴 그리고 사일로 6기이다. 이러한 지하 공동들이 위치하게 되면 지하수 유동과 관련하여 수리 경계 조건의 변화가 발생되어 지하수 유동 체계에 변화를 가져온다. 즉, 지하 시설물 내부의 대기와 접한 부분에서 압력 수두 값이 대기압 조건으로 변하여, 수리 수두는 위치 수두와 같은 값으로 변하게 된다. 따라서 주변 지하수가 지하 시설물로 유입된다. 지하수 유동 모델링을 통한 지하수 유입량 분석은 국도 31호선 도로 터널 및 처분 시설 건설에 따른 지하수 유입량을 수치모사로 도출하였다. 안전성 평가의 입력 인자로서 제시되는 지하수 유입량은 10개의 단열망 분포에 대한 수치모사에서 도출된 값과 이의 평균값이다.

지하 시설물로의 지하수 유입량을 구하기 위해 수치 모델에서 구성된 격자에 대한 지하수 유동량 (Q)은 일반적으로 격자의 수직 성분과 수평 성분에 대한 Darcy 속도 (q)에 수직 방향의 격자 면적을 곱한 값

으로 분석하였다 (Figure 1). 즉, 지하 시설물 건설에 따른 국도 31호선 터널 및 건설·운영동굴의 유입량을 구하기 위해 각 시설물이 구성되고 있는 격자에 대한 Darcy 속도와 수치 모델 격자의 면적을 분석하여 유량을 산출하였다.

$$Q_{inflow\ rate} = Darcy\ velocity\ (q) \times area \dots\dots\dots (1)$$

국도 31호선 도로 터널로의 유입량을 구하기 위하여 Figure 2와 같이 격자를 구성하여 수치모델링을 수행하였다. 수치 모델링에서 사용된 경계 조건은 국도 31호선 터널을 제 1경계 조건 (Dirichlet boundary)으로 설정하였으며, 지하 공동 굴착 중 그라우팅 효과를 고려하여 2 m의 간격으로 격자를 구성하여 그라우팅 구간의 수리전도도 값을 1.0×10^{-8} m/s로 설정하여 수치모의를 수행하였다. 또한, 처분 시설의 건설·운영 동굴로의 유입량을 구하기 위하여 Figure 3과 같이 격자를 구성하였다. 진입 터널은 건설 동굴과 운영 동굴로 구성되며, 두개의 진입 터널을 제 1경계 조건으로 설정하였다. 또한, 국도 터

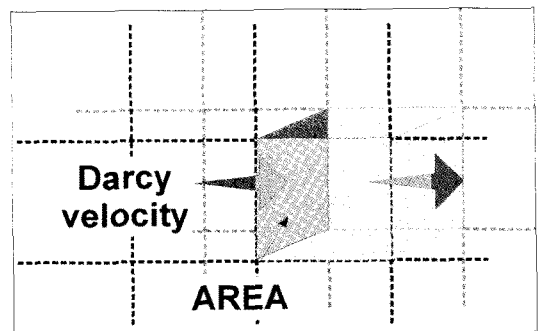


Fig. 1. Conceptual diagram for obtaining the groundwater flow rate flowing into the underground facilities.

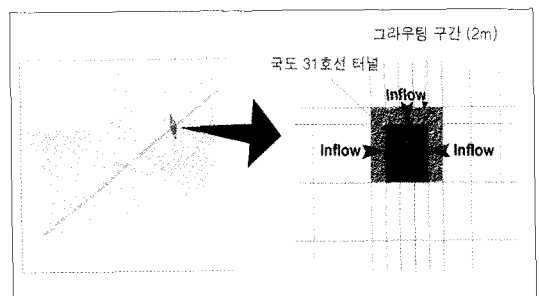


Fig. 2. Constructed mesh for the 31th National road tunnel.

널과 같이 터널 굴착 중 그라우팅 효과를 고려하여 2 m의 간격으로 격자를 구성하고 그라우팅 구간의 수리전도도 값을 1.0×10^{-8} m/s로 설정하고 수치 모의를 수행하였다. 마지막으로 처분 사일로 건설에 따른 지하수의 유입량을 도출하기 위해 Figure 4와 같이 격자를 구성하였으며, 1 m의 그라우팅 효과를 고려하여 1.0×10^{-8} m/s의 수리전도도 값을 입력하였다.

국도 31호선 터널 및 처분 시설 건설에 대한 수치 모사 결과, 지하 시설물의 건설 기간 중 2년 동안 지하수의 평균 일별 유입량은 Table 1에 제시하였으며,

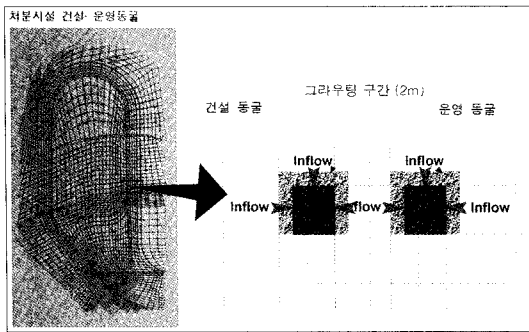


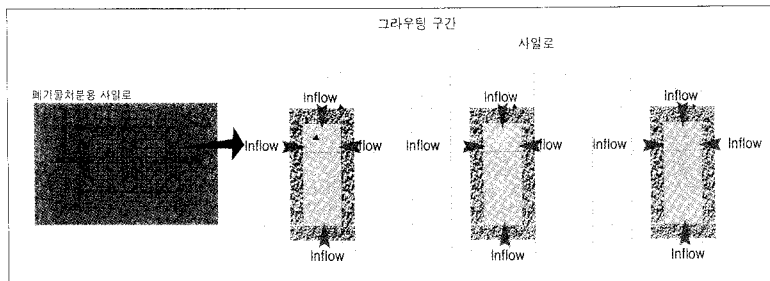
Fig. 3. Constructed mesh for the operation and construction tunnel

2년간의 지하수의 누적 유입량은 Table 2에 제시하였다. Table 1, 2에서 확인되는 바와 같이 국도 31호선 및 사일로의 평균 유입량은 125.1 m³/day 및 322.5 m³/day이며, 사일로에서의 지하수의 평균 유입량은 48.7~62.1 m³/day 로 도출되었다. 각 사일로 별 배치는 Figure 5와 같다.

나. 처분 시설 폐쇄 후 지하수 유동량

처분 사일로를 흐르는 지하수 유동량 분석 방법은 Figure 1에서 제시한 지하수 유입량 산정 방법과 같이 식 (1)을 사용하였다. 처분 시설 폐쇄 후 지하수 유동량은 국도 31호선 터널이 운영 중에 있으며, 처분 시설 건설에 따라 강화되었던 지하수위가 처분 시설이 폐쇄 후 회복되었을 때, 사일로를 통과하는 지하수 유동량을 수치 모사로 도출하였다. 또한 처분 시설 건설 전 상태에서 사일로가 위치하게 될 영역에서 지하수의 유동량을 비교 자료로 제시하였다.

각각의 도출되는 지하수 유동량은 10개 경우에 대한 수치모의에서 도출된 값과 이의 평균 및 표준편차를 제시하였다.



4. Constructed mesh for the disposal silo

Table 1. Average groundwater flow rate into the underground facilities related to the Gyeong-Ju LILW disposal site(Q; m³/day)

	National road tunnel	Construction and operation tunnel	Silo					
			1	2	3	4	5	6
Case 1	120.8	335.3	46.8	38.5	47.9	58.5	55.1	77.1
Case 2	130.5	361.1	59.2	94.1	49.2	53.2	51.4	54.2
Case 3	108.2	302.8	41.6	53.2	41.0	88.5	45.1	53.1
Case 4	135.1	349.5	56.4	57.9	72.4	59.9	42.3	68.4
Case 5	136.9	335.1	44.2	44.0	61.0	44.2	57.0	53.0
Case 6	119.1	307.7	35.8	71.0	50.7	62.5	50.0	51.7
Case 7	121.5	312.9	41.7	69.1	40.1	51.1	49.1	76.6
Case 8	115.4	297.5	45.8	51.1	48.9	62.3	59.3	69.0
Case 9	137.1	331.3	75.6	49.2	58.6	67.5	55.4	50.8
Case 10	126.6	292.8	50.6	63.1	49.9	45.3	52.9	67.7
average	125.1	322.6	48.7	59.1	52.0	59.3	51.8	62.1
Std.	9.8	23.2	11.6	16.1	9.7	12.8	5.3	10.6

Table 2. Total groundwater flow rate into the underground facilities related to the Gyeong-Ju LILW disposal site (Q: m³)

	National road tunnel	Construction and operation tunnel	Silo					
			1	2	3	4	5	6
Case 1	88,184.0	244,732.5	34134.8	28068.5	34952.4	42719.6	40244.9	56283.0
Case 2	95,265.0	263,603.0	43216.0	68707.6	35923.3	38828.7	37551.2	39587.9
Case 3	78,986.0	221,007.5	30392.9	38806.8	29930.0	64605.0	32949.3	38735.3
Case 4	98,623.0	255,135.0	41154.4	42264.1	52861.5	43755.5	30866.6	49898.4
Case 5	99,937.0	244,623.0	32285.0	32141.9	44508.6	32239.0	41600.5	38676.9
Case 6	86,943.0	224,621.0	26168.3	51820.5	36981.1	45614.8	36500.7	37707.4
Case 7	88,695.0	228,417.0	30417.3	50419.6	29284.0	37270.9	35841.5	55906.3
Case 8	84,242.0	217,175.0	33412.8	37284.8	35719.6	45442.5	43304.3	50381.7
Case 9	100,083.0	241,812.5	55187.3	35948.9	42741.5	49239.2	40431.1	37092.8
Case 10	92,418.0	213,707.5	36925.2	46028.0	36405.8	33050.8	38627.2	49410.8
average	91,337.6	235,483.4	36329.4	43149.1	37930.8	43276.6	37791.7	45368.0
Std.	7,143.4	16,907.9	8365.3	11757.0	7064.3	9329.8	3880.3	7757.0

① 자연 상태 (Undisturbed condition)

중·저준위 방사성폐기물 처분장의 사일로 주변의 지하수 유동량을 평가하기 위하여, 우선 건설 전 자연 상태일 때의 사일로 주변의 지하수 유동량에 대한 10개 cases의 결과를 Table 3에 제시하였다. 본 결과는 전술 하였듯이, 처분 시설이 건설되기 전의 사일로 영역에 대한 지하수 유동량을 나타내었으며, 이 결과는 처분 시설이 실제로 수치 모델에 반영된 결과와 비교 자료로서 활용될 것이다.

Table 3과 보는 바와 같이 6개 사일로 위치를 통과하는 총 유동량은 15.26 m³/day로 산출되며, 남쪽의 사일로 (silo 1, silo 3, silo 5)에 비해 북쪽에 위치한 사일로 (silo 2, silo 4, silo 6)에서 더 많은 지하수가 유동하는 것으로 분석된다. 이는 처분 심도 (-80~ -130 m (EL.))에서 존재하는 투수성 단열의 영향이 거나, 국지적인 수두 경사의 차에 기인한 것으로 분석된다. 특히 Case 2의 사일로 2, Case 3의 사일로 4 및 Case 7의 사일로 6의 경우 지하수의 유동량이 다

른 모의 결과의 유동량에 비해 2배 가까운 큰 값을 나타내는데, 이는 국지적인 수두 경사보다는 각 수치 모의의 Case에 대한 해당 심도에 존재하는 투수성 단열에 기인한 것으로 분석된다 (Table 3).

② 처분 시설 폐쇄 후 상태

경주의 중·저준위 방사성폐기물 처분장은 지하 공동에 사일로 형태의 폐기물 적치 구역을 건설하게 된다. 사일로는 구조적 성능 유지 및 핵종 이동의 차단을 위해 콘크리트의 공학적방벽으로 구성되는데, 이 콘크리트는 시간에 지남에 따라 물리적, 화학적 현상에 의해 열화의 과정을 거치게 된다.

위의 열화 과정을 고려하기 위해, 처분 사일로를 구성하는 공학적 방벽의 수리전도도 (hydraulic conductivity, K)를 2단계 ($K = 3 \times 10^{-11}$, 1×10^{-4} m/s)로 나누어 수치 모의를 수행하였으며, 각 경우에 대해 폐쇄 후 사일로를 흐르는 지하수의 유동량을 산출하였다. 처분 사일로 내의 폐기물 적치 구역에 대한 수리전도도는 1×10^{-4} m/s로 설정하였다.

Table 4는 공학적 방벽이 건전한 경우에 사일로를 통과하는 일별 지하수의 유량을 산출한 결과이다. 중·저준위 방사성폐기물 처분장이 건설되기 전의 결과 (Table 3)에 비해 1000배 정도의 적은 유량이 흐르는 것으로 분석되며, 공학적 방벽이 지하수의 흐름에 대한 방어벽이 되어 폐기물 적치 구역 내로 적은 유량의 지하수만 유입되는 것으로 분석된다. Table 6은 공학적 방벽이 열화된 경우에 사일로를 통과하는 일별 지하수의 유량을 산출한 결과이다. 콘크리트 방벽의 열화에 의해 투수성이 커지게 되므로, 공학적 방벽이 건전한 상태에 비해 많은 양의 지하수가 사일

Table 3. Daily groundwater flow rate through the disposal silo in undisturbed condition (Q: m³/day)

Case	Silo					
	1	2	3	4	5	6
1	1.38	1.10	2.83	2.05	1.96	3.71
2	3.06	4.64	2.41	2.33	2.94	2.16
3	1.88	2.43	2.00	4.98	2.35	3.02
4	1.42	2.26	3.54	3.29	2.26	3.75
5	2.18	2.11	2.55	2.09	1.94	3.12
6	1.30	2.68	2.98	2.81	2.34	2.41
7	2.22	2.73	2.01	2.19	1.53	4.24
8	1.39	2.79	2.70	2.85	3.03	2.30
9	3.37	2.32	2.67	3.06	2.87	2.38
10	2.72	2.11	2.45	1.57	1.95	2.97
average	2.09	2.51	2.61	2.72	2.32	3.01
Std.	0.75	0.89	0.45	0.95	0.50	0.71

로를 통과하는 결과를 확인할 수 있으며, 또한 처분장이 건설되기 전의 결과에 비해 2~3배의 많은 유량으로 산출되었다. 처분 사일로별 평균 지하수 유량은 7.08~9.72 m³/day의 분포를 보이며, 자연 상태에서 처분 사일로를 흐르는 지하수량과 같이 남쪽의 사일로에 비해 북쪽 사일로에서 큰 값으로 분석되었다 (Table 3, Table 6).

안전성 평가의 입력 인자로서 처분 사일로의 경계면에서 지하수 단위 유량 (Darcy 속도, $q = Ki$) 자료는 지하수 유동 모델에서 직접적으로 도출될 수 있지만, 각 case 및 6기의 처분 사일도에 따라 다른 값이 도출되며, 또한 같은 사일로에서라도 주변 암반의 투수성 차이에 의해 수직적으로 다양한 분포를 보인다. 따라서, 지하수의 단위 유량을 전체 지점에 대해 도출하여 그 값을 제시하기에는 많은 오차를 야기할 수 있으므로, 본 논문에서는 지하수 유동량 ($Q = KiA$) (Table 4, Table 6)에 대한 자료를 이용하여, 각 사일도에 대한 면적 (4,908 m²)의 반을 지하수의 유입 면적으로 가정하고, 10개 경우에 대한 평균 지하수 단위 유량 (Darcy 속도)을 도출하였다 (Table 5, Table 7).

다. 지하수 유동로 분석

처분 부지의 지하수 유동 특성에 따라 처분 시설로부터 누출된 입자가 지하수를 따라 생태계로 노출되기까지의 유동로를 규명하기 위해서 지하수 유동 모델링의 전산 코드인 FEFLOW (ver. 5.2)에서 제공하는 입자추적기법 (particle tracking method)을 이용하였다 [6]. 지하수 유동로 분석에 이용된 수치 모델

은 경주 중·저준위 방사성폐기물 처분 시설이 폐쇄된 후, 국도 31호선 나산터널이 운영되고 있을 때의 지하수 유동 특성에 대한 정상상태 (steady state)의 모델 결과이며, 입자추적기법을 적용하여 함양지역에서 처분 사일로까지의 지하수 유동 경로 및 처분 사일로에서 배출지역까지의 지하수 유동경로를 분석

Table 5. Darcy velocity at boundary of disposal silo after closure of disposal facilities; K of engineering barrier : 3×10^{-11} m/s (q; m/sec)

Case	Silo					
	1	2	3	4	5	6
1	1.51×10^{-11}	1.62×10^{-11}	1.36×10^{-11}	1.41×10^{-11}	9.17×10^{-12}	2.52×10^{-11}
2	2.65×10^{-11}	1.89×10^{-11}	2.08×10^{-11}	2.28×10^{-11}	1.67×10^{-11}	3.30×10^{-11}
3	2.08×10^{-11}	1.40×10^{-11}	1.55×10^{-11}	1.82×10^{-11}	1.75×10^{-11}	3.70×10^{-11}
4	1.81×10^{-11}	1.53×10^{-11}	1.86×10^{-11}	1.61×10^{-11}	1.40×10^{-11}	3.23×10^{-11}
5	2.03×10^{-11}	1.47×10^{-11}	2.02×10^{-11}	2.27×10^{-11}	1.67×10^{-11}	2.27×10^{-11}
6	1.70×10^{-11}	1.93×10^{-11}	2.19×10^{-11}	1.37×10^{-11}	1.80×10^{-11}	3.48×10^{-11}
7	2.32×10^{-11}	1.43×10^{-11}	2.07×10^{-11}	1.93×10^{-11}	1.54×10^{-11}	3.07×10^{-11}
8	1.19×10^{-11}	1.38×10^{-11}	1.86×10^{-11}	1.76×10^{-11}	1.49×10^{-11}	3.41×10^{-11}
9	2.49×10^{-11}	1.47×10^{-11}	2.13×10^{-11}	1.68×10^{-11}	1.73×10^{-11}	2.38×10^{-11}
10	2.48×10^{-11}	1.50×10^{-11}	2.40×10^{-11}	1.79×10^{-11}	1.57×10^{-11}	2.85×10^{-11}
average	2.02×10^{-11}	1.56×10^{-11}	1.95×10^{-11}	1.79×10^{-11}	1.55×10^{-11}	3.02×10^{-11}
Std.	4.72×10^{-11}	1.94×10^{-12}	3.09×10^{-11}	3.09×10^{-12}	2.55×10^{-12}	4.94×10^{-11}

Table 6. Daily groundwater flow rate through the disposal silo after closure of disposal facilities; K of engineering barrier : 1×10^{-4} m/s (Q; m³/day)

Case	Silo					
	1	2	3	4	5	6
1	6.15	5.36	6.53	8.86	8.31	12.00
2	8.55	13.01	9.22	8.44	8.92	8.71
3	5.80	7.88	6.36	13.27	6.45	8.18
4	7.34	8.13	11.06	8.28	6.47	10.56
5	6.32	6.29	8.71	6.31	8.14	8.00
6	5.12	10.14	7.24	9.50	7.14	8.11
7	6.10	10.72	5.45	7.01	7.01	11.76
8	6.25	7.73	7.13	9.75	8.90	10.34
9	11.66	7.04	8.65	9.49	8.06	8.30
10	7.51	9.44	6.55	6.33	7.70	11.28
average	7.08	8.57	7.69	8.72	7.71	9.72
Std.	1.88	2.28	1.69	2.05	0.91	1.63

Table 4. Daily groundwater flow rate through the disposal silo after closure of disposal facilities; K of engineering barrier : 3×10^{-11} m/s (Q; m³/day)

Case	Silo					
	1	2	3	4	5	6
1	3.20×10^3	3.43×10^3	2.88×10^3	3.00×10^3	1.94×10^3	5.35×10^3
2	5.62×10^3	4.01×10^3	4.41×10^3	4.84×10^3	3.54×10^3	6.99×10^3
3	4.41×10^3	2.97×10^3	3.28×10^3	3.86×10^3	3.71×10^3	7.85×10^3
4	3.83×10^3	3.25×10^3	3.95×10^3	3.41×10^3	2.97×10^3	6.85×10^3
5	4.30×10^3	3.11×10^3	4.28×10^3	4.82×10^3	3.54×10^3	4.81×10^3
6	3.60×10^3	4.08×10^3	4.63×10^3	2.91×10^3	3.81×10^3	7.37×10^3
7	4.91×10^3	3.03×10^3	4.38×10^3	4.09×10^3	3.26×10^3	6.51×10^3
8	2.53×10^3	2.93×10^3	3.94×10^3	3.73×10^3	3.17×10^3	7.23×10^3
9	5.28×10^3	3.13×10^3	4.52×10^3	3.56×10^3	3.67×10^3	5.05×10^3
10	5.25×10^3	3.19×10^3	5.10×10^3	3.79×10^3	3.32×10^3	6.03×10^3
average	4.29×10^3	3.31×10^3	4.14×10^3	3.80×10^3	3.29×10^3	6.40×10^3
Std.	1.00×10^3	4.11×10^4	6.55×10^4	6.56×10^4	5.41×10^4	1.05×10^3

Table 7. Darcy velocity at boundary of disposal silo after closure of disposal facilities; K of engineering barrier : 1×10^{-4} m/s (q; m/sec)

Case	Silo					
	1	2	3	4	5	6
1	2.90×10^{-8}	2.53×10^{-8}	3.08×10^{-8}	4.18×10^{-8}	3.92×10^{-8}	5.66×10^{-8}
2	4.03×10^{-8}	6.13×10^{-8}	4.35×10^{-8}	3.98×10^{-8}	4.20×10^{-8}	4.11×10^{-8}
3	2.74×10^{-8}	3.72×10^{-8}	3.00×10^{-8}	6.26×10^{-8}	3.04×10^{-8}	3.86×10^{-8}
4	3.46×10^{-8}	3.83×10^{-8}	5.22×10^{-8}	3.90×10^{-8}	3.05×10^{-8}	4.98×10^{-8}
5	2.98×10^{-8}	2.97×10^{-8}	4.11×10^{-8}	2.98×10^{-8}	3.84×10^{-8}	3.77×10^{-8}
6	2.42×10^{-8}	4.78×10^{-8}	3.41×10^{-8}	4.48×10^{-8}	3.37×10^{-8}	3.82×10^{-8}
7	2.87×10^{-8}	5.06×10^{-8}	2.57×10^{-8}	3.31×10^{-8}	3.31×10^{-8}	5.55×10^{-8}
8	2.95×10^{-8}	3.64×10^{-8}	3.36×10^{-8}	4.60×10^{-8}	4.20×10^{-8}	4.87×10^{-8}
9	5.50×10^{-8}	3.32×10^{-8}	4.08×10^{-8}	4.48×10^{-8}	3.80×10^{-8}	3.92×10^{-8}
10	3.54×10^{-8}	4.45×10^{-8}	3.09×10^{-8}	2.98×10^{-8}	3.63×10^{-8}	5.32×10^{-8}
average	3.34×10^{-8}	4.04×10^{-8}	3.63×10^{-8}	4.11×10^{-8}	3.64×10^{-8}	4.59×10^{-8}
Std.	8.88×10^{-9}	1.08×10^{-8}	7.96×10^{-9}	9.66×10^{-9}	4.30×10^{-9}	7.68×10^{-9}

하였다. 또한, 안전성 평가의 입력 인자로서 처분 사일로에서 배출지역까지의 지하수의 이동거리 및 지하수 유동로에 따른 단위 유량 (Darcy 속도)을 도출하여 그 결과를 제시하였다. 총 10개의 경우에 대한 입자추적기법의 수치 모사를 수행하였으며 입자의 초기 위치는 Table 8에 요약하였다.

① 지하수 유동 경로

- 함양지역에서 사일로까지

처분 사일로 영역을 흐르는 지하수의 함양 지역을 규명하기 위해 Table 8의 입자 위치에서 역방향 입자추적 (backward particle tracking)을 이용하여 수치 모사를 수행하였다. 전체 10개의 경우에서 비교적 유사한 함양 영역이 도출되었는데, 10개의 Cases 중에서 Case 2의 경우, 처분 사일로의 북서 방향으로 200~300 m 이격된 고지대에서 함양된 지하수가 처분 사일로를 거쳐서 흐르는 것으로 분석된다 (Figure 6(a)). 함양지역에서 함양된 지하수가 처분 사일로까지 도달하는 이동 시간은 매질의 투수성, 수두경사, 이동 거리 및 매질의 공극률을 통해 도출되어야 하지만, 이동 거리만을 기준으로 판단해 볼 때, 처분 사일도에 도달하는 지하수의 유동기간은 비교적 가까운 거리의 함양지역으로 인해 크지 않을 것으로 분석된다.

- 사일로에서 배출지역까지

처분 사일로 영역을 흐르는 지하수의 배출지역을 규명하기 위해 Table 8의 입자 위치에서 정방향 입자추적 (forward particle tracking)을 이용하여 수치

모사를 수행하였으며, 사일로에서 유출되는 지하수가 생태계로 도달하기까지의 지하수 유동로는 각 경우 별로 Figure 6(b)의 유추에 도시하였다. Case 2에서 도출된 Figure 6의 결과와 같이 10개의 cases에서 전체적으로 유사한 지하수의 배출지역 분포가 도출되었는데, 처분 사일로를 통과한 지하수는 처분 부지의 동쪽에 위치한 해안지역으로 (동해) 동남동 방향의 유동로를 갖고 배출되는 것으로 분석된다. 특히, 각 경우별로 매질의 투수성에 대한 불균질성으로 지하수 유동로에 대한 근소한 차이를 확인할 수 있었다.

② 지하수의 이동거리

처분 사일로에서 생태계까지의 흐르는 지하수의 이동 거리를 도출하기 위해 지하수의 배출지역 규명을 목적으로 모사된 정방향 입자추적의 결과를 이용하여 있는데, 총 10개 경우에 대해 결과를 종합하여 각 사일로 별로 통계 값을 Table 9, Figure 7에 제시하였다. 처분 사일로로부터 생태계로 유출되는 지하수 이동 거리는 지하수의 이동 경로 및 사일로의 배치에 따라 사일로 2의 경우 614.49 m로 가장 길며, 사일로 5의 경우가 372.24 m로서 가장 짧은 것으로 분석되었다 (Table 9). 특히, 같은 경도에 위치한 남쪽과 북쪽의 사일로에서 평균 지하수 이동 거리를 분석해 볼

Table 8. X, Y, Z coordinate of particles for particle tracking method

	x cord.	y cord.	z cord.		x cord.	y cord.	z cord.
Silo 1	243414	247990	-80	Silo 2	243414	248080	-80
	243414	247990	-90		243414	248080	-90
	243414	247990	-100		243414	248080	-100
	243414	247990	-110		243414	248080	-110
	243414	247990	-120		243414	248080	-120
	243414	247990	-130	243414	248080	-130	
Silo 3	243504	247990	-80	Silo 4	243504	248080	-80
	243504	247990	-90		243504	248080	-90
	243504	247990	-100		243504	248080	-100
	243504	247990	-110		243504	248080	-110
	243504	247990	-120		243504	248080	-120
	243504	247990	-130	243504	248080	-130	
Silo 5	243594	247990	-80	Silo 6	243594	248080	-80
	243594	247990	-90		243594	248080	-90
	243594	247990	-100		243594	248080	-100
	243594	247990	-110		243594	248080	-110
	243594	247990	-120		243594	248080	-120
	243594	247990	-130	243594	248080	-130	

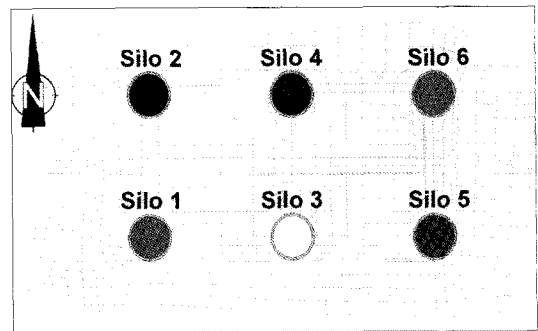


Fig. 5. Layout of disposal silos

Table 9. Statistics of travel length of groundwater from disposal silo to discharge area (Unit: m)

	Average	Std.	Min	Max
Silo 1	523.08	27.84	468.13	577.87
Silo 2	614.49	22.83	564.00	656.71
Silo 3	449.10	29.19	395.69	497.10
Silo 4	513.78	22.38	468.96	565.46
Silo 5	372.24	22.91	329.44	441.96
Silo 6	409.13	26.40	365.01	458.50

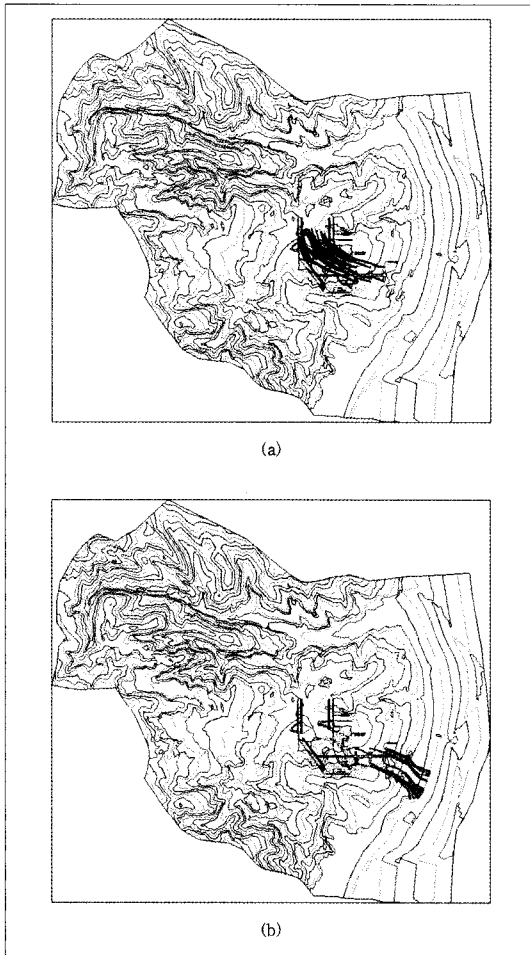


Fig. 6. Flow pathway around Gyeong-Ju LILW site (Case2) ; Figure (a) demonstrate the pathway from recharge area to disposal silo and figure (b) describe the pathway from disposal silo to discharge area. Inner contour is the hydraulic head distribution at surface level.

때, 사일로 1, 2의 경우 90 m에 가까운 차이가 나반면에 사일로 5, 6에서는 37 m 정도로 배출지역에 가까울수록 지하수의 이동거리에 대한 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이는 해안에서 가장 떨어진 사일로 2를 통과하는 지하수가 상대적으로 다른 사일로를 통과하는 지하수에 비해, 수직적으로 깊은 심도를 통해 흐르기 때문에 나타나는 차이로 판단된다.

③ 지하수유동로에 따른 평균 지하수단위유량

처분 사일로에서 생태계까지의 흐르는 지하수의 평균 지하수 단위 유량을 도출하기 위해 지하수의 이동거리 도출에서와 같은 정방향 입자추적의 결과를

이용하였다. 각 사일로를 통과하는 지하수가 생태계로 흐르는 동안 처분 지역 주변의 수두경사 및 암반의 수리전도도에 의해 결정된 지하수의 평균 단위 유량은 $2.30 \sim 2.55 \times 10^{-8}$ m/sec의 분포를 보이며 (Table 10), 각 사일로 별로 도출되는 지하수의 단위 유량에 대한 편차는 크지 않은 것으로 분석된다 (Figure 8).

Ⅲ. 인감침입 시나리오

처분 시설이 폐쇄된 후 발생할 수도 있는 예상하지 않은 사건에 대하여 환경 영향을 분석하는 것은 방사성폐기물의 안정적 처분 및 처분에 대한 안전성과 관련하여 주요한 수행 과제이다. 본 논문에서는 미래에 있을 예상치 않은 다양한 인간 침입 시나리오 중 처분 시설 폐쇄 후 일정 기간의 제도적 관리가 종료된 후, 미래의 후손이 처분 부지 주변에 우물을 설치하여 양수한 물을 농업용수 혹은 생활용수로 이용하는 것을 가정하였다. 즉, 인간 침입 시나리오 중 우물 시나리오 (well scenario)를 가정한 안전성 평가에 대한 입력 자료를 지하수 유동모델링을 통하여 제시하였다. 본 논문에서 가정한 우물시나리오 중 가장 최악의 상황은 처분시설 폐쇄 후 사일로 주변에 양수정이 설치되거나, 사일로를 흐르는 지하수 유동의 하류 방향에 양수정을 설치하고 우물에서 일정 규모의 양수하는 경우가 될 수 있다. 이 때, 사일로 영역을 통과하는 지하수 유동량의 변화를 분석하였고, 안전성 평가의 입력 자료로서 양수정의 설치에 따른 사일로 경계면에서의 단위 유량 및 지하수의 이동거리를 도출하였다.

가. 우물 제원 및 양수 조건

처분 부지 주변 지역에서 생활용수 혹은 농업용수

Table 10. Statistics of Darcy velocity of groundwater from disposal silo to discharge area

	unit:(m/sec)			
	Average	Std.	Min	Max
Silo 1	2.38×10^{-8}	5.42×10^{-9}	1.47×10^{-8}	4.42×10^{-8}
Silo 2	2.49×10^{-8}	4.40×10^{-9}	1.85×10^{-8}	3.73×10^{-8}
Silo 3	2.50×10^{-8}	6.56×10^{-9}	2.70×10^{-9}	4.28×10^{-8}
Silo 4	2.55×10^{-8}	6.64×10^{-9}	1.55×10^{-8}	4.80×10^{-8}
Silo 5	2.30×10^{-8}	5.46×10^{-9}	1.22×10^{-8}	3.57×10^{-8}
Silo 6	2.49×10^{-8}	7.07×10^{-9}	1.20×10^{-8}	4.66×10^{-8}

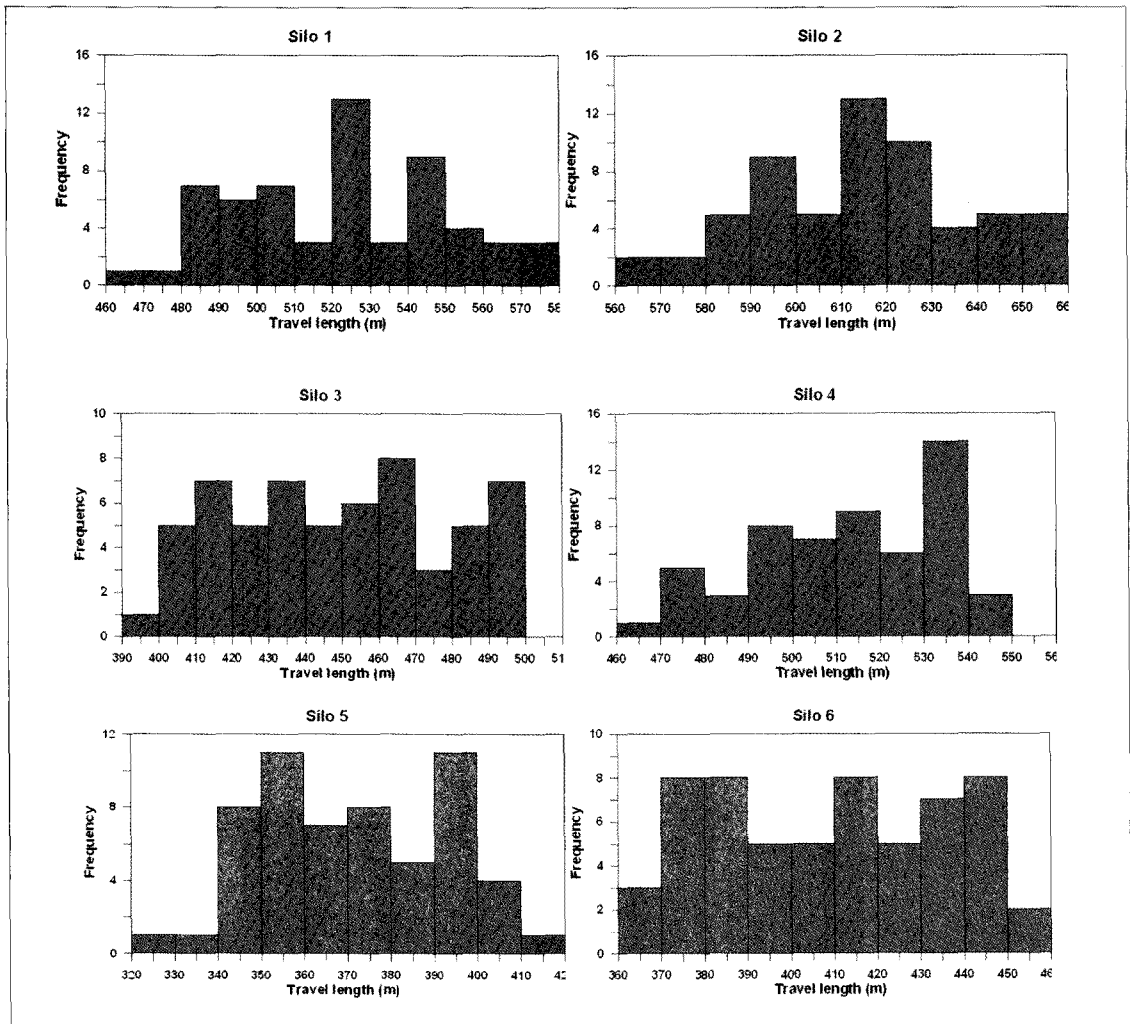


Fig. 7. Histogram of travel length for groundwater flow from disposal silo to discharge area

로 이용되는 대형 우물은 관련 지방자치단체에 신고 및/혹은 허가에 의해 사용하고 있다. 따라서, 우물 시나리오 해석에 사용하는 우물 제원은 처분 부지에서 주변 환경 여건을 감안하여 기존에 굴착된 우물의 지방자치단체 혹은 관련 기관 (한국농촌공사, 한국수자원공사 등)의 개발 기준을 준용하여 우물의 제원을 적용하였다. 본 논문의 우물 시나리오 해석을 위해서 설정한 가정 및 관련 제반 조건을 아래와 같이 요약할 수 있다 (Table 11).

- 사일로 주변에 양수정을 2개소 (양수정 1 및 2) 설치하는 경우를 가정하고 각각의 경우에 대하여 독립적으로 분석.

- 양수량은 현재 처분 부지 인근에 설치되어 허가 받은 양수량 중 최대값을 가정하여, 연간 50,000 m³ (≒137 m³/day)의 지하수를 각 양수정에서 취수.

- 양수정의 설치 규모는 생활용수 개발 조건으로 가정함에 따라, 구경은 20 cm로 하고 우물 보호를 위한 케이싱은 연안 1m까지 설치하며, 그 하부는 다공성 파이프로 우물 스크린을 설치하는 것으로 가정.

Table 11. Description of pumping well

Borehole	N(Y)	E(X)	EL. (m)	Casing depth	Well radius	remarks
Pumping well 1	248,032.5	243,608.9	38.8~-105	10.0m	20cm	SS-4, KB-9
Pumping well 2	247,906.3	243,675.2	19.0~-105	8.0m	20cm	GM-1, GM-2

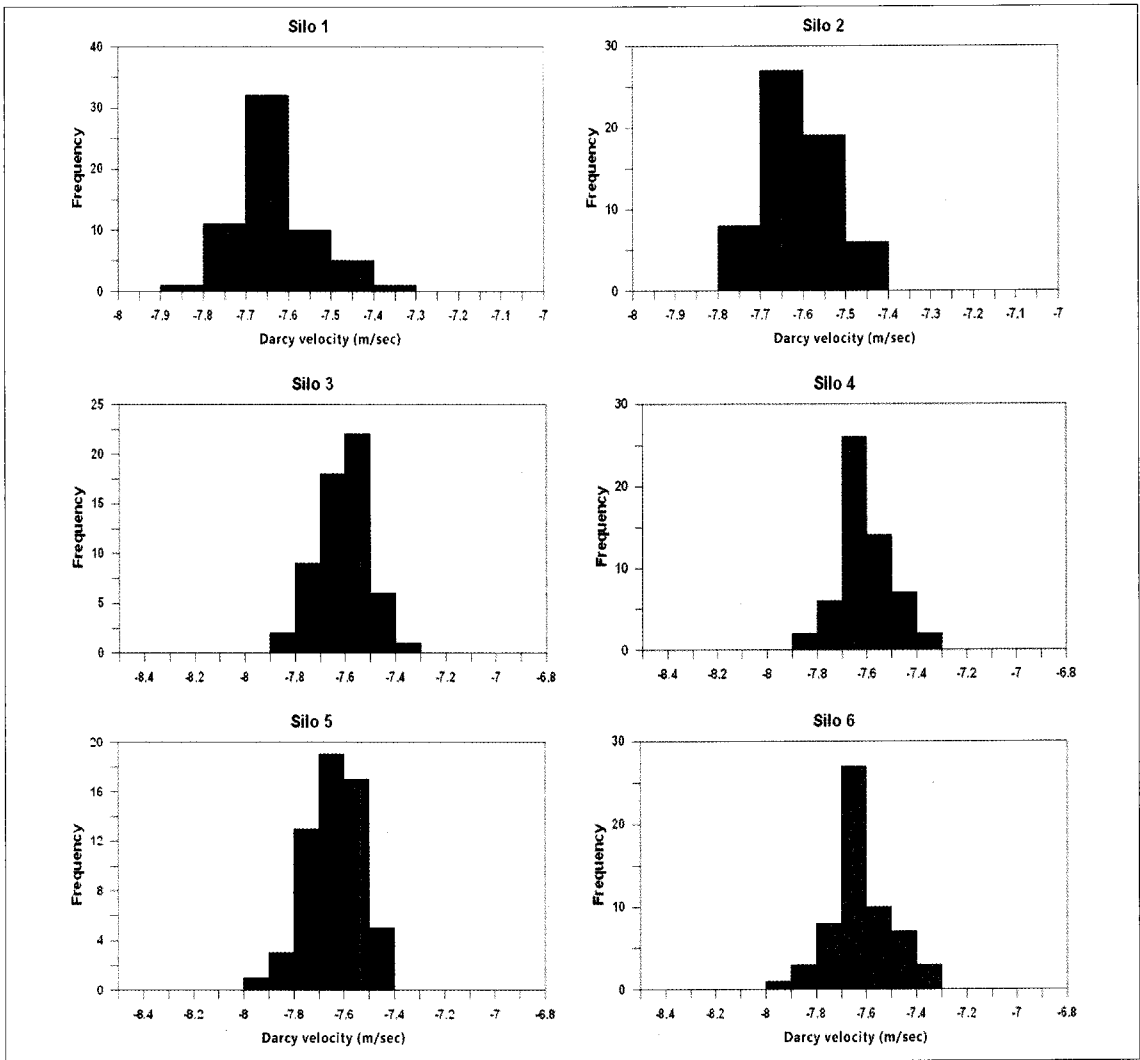


Fig. 8. Histogram of logarithmic Darcy velocity for groundwater flow from disposal silo to discharge area

- 양수정 공저 심도는 사일로 of 최상부와 최하부의 중간 심도인 EL.-105 m까지 위치.

- 양수정 1은 사일로 5번과 6번의 중앙 지점에 위치하며, 양수정 보호용 케이싱의 심도는 이들 사일로로부터 가장 가까운 거리에 위치하는 시추 조사공의 SS-4 및 KB-9번 자료를 반영하여 지표 하 10.0 m까지 설치.

- 양수정 2의 위치는 양수를 하지 않은 상태일 때의 전체 사일로로부터 유출되는 오염원의 입자운 (particle plume) 중앙에 배치하고, 거리상으로 5번 사일로에서 지하수 유동 방향 100 m 하류지점에 위

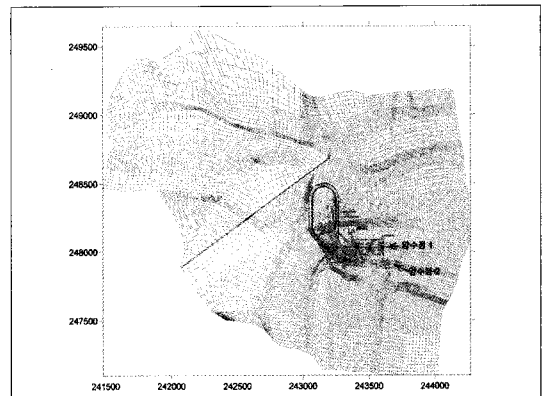


Fig. 9. Location of pumping well for well scenario

치 (Figure 9).

- 양수정 2의 구경과 굴착 심도는 양수정 1과 동일하며, 양수정 2의 제원은 주변에 설치된 시추조사공 GM-1, GM-2 참조하여 양수정 보호 케이싱을 지표하 8.0m까지 설치하는 것으로 함.

한편, 사일로를 통과하는 지하수유동량의 분석은 아래와 같이 시간 종속적 진화 및 다양한 영역에서의 유동량과 Darcy 속도 등을 산출하였다.

- 사일로의 콘크리트 건전 및 열화 후 상태.
- 양수 상태에서 생태계로의 유동량, Darcy 속도 및 이동거리.

나. 우물 양수영향 해석

우물 시나리오를 위해 국지 규모 지하수 유동 모델링에서 처분 사일로부터 배출 지역까지의 지하수의 Darcy 속도가 빠르고, 이동거리가 짧아 처분 안전성 평가에 가장 불리한 Case 2를 기준으로 모델링을 수행하였으며, 모델 영역에서 양수정 1과 양수정 2를 설치하여 우물 시나리오에 대한 정상 상태의 지하수 유동 모델링을 수행하였다. 우물 시나리오를 위해 유한 요소법을 이용한 전산 코드인 FEFLOW (ver. 5.2)를 사용하였다 [6].

우물이 없는 경우 Case 2의 지하수 유동 모델링 결과를 요약하면 자연 상태에서 폐기물 구역을 통과하는 지하수의 유동량은 2.33~4.64 m³/day의 범위로 분석되며, 사일로 4에서 최소값인 2.33 m³/day, 사일로 2에서 4.64 m³/day의 값으로 각각 산출되었다. 콘크리트 방벽이 건전한 경우 폐기물영역을 통과하는 지하수 유동량은 3.54~6.99×10⁻³ m³/day의 범위로 자연 상태에서 폐기물 구역을 통과하는 지하수의 유동량에 비해 현저히 적은 지하수량이 도출되며, 사일로 5에서 최소값인 3.54×10⁻³ m³/day, 사일로 6에서 6.99×10⁻³ m³/day의 최대값을 나타냈다. 이는 사일로를 둘러싸고 있는 콘크리트 시설이 지하수 유동에 있어 수리적 방벽의 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다. 콘크리트 방벽이 열화된 경우에 8.44~13.01 m³/day의 지하수가 각 사일로를 통과하는 것으로 분석되며, 사일로 4에서 최소값을, 사일로 2에서 최대값을 갖는 것으로 산출된다. 특히, 자연 상태, 콘크리

트 방벽이 건전한 상태 및 열화된 상태에서 각 사일로에 대한 지하수의 유동량의 양적 비율이 전체적으로 같지 않은 결과가 도출되는데, 이는 폐기물 구역과 콘크리트 방벽, 사일로를 둘러싸는 처분영역 암반의 수리전도도 차이에 기인하는 것으로 판단된다 (Table 12).

가상의 인간 침입 시나리오인 우물 시나리오를 고려하기 위해 콘크리트 방벽이 열화된 후, 미래에 발생 가능한 양수정의 개발에 의한 양수 영향을 모델 결과로서 도출해 보았다. 양수정 1에서 연간 50,000 m³의 물을 양수하는 경우, 사일로 내부 폐기물 적치 영역을 통과하는 지하수 유동량은 13.30~22.19 m³/day의 범위로 분석되었으며, 사일로 2에서 최대 유동량인 22.19 m³/day, 사일로 3에서 13.30 m³/day의 최소 값으로 각각 산출되었다 (Table 13). 폐기물 구역을 통과하는 지하수의 유동량을 양수정 개발이 없는 상태와 비교해 볼 때, 각 처분 사일로의 폐기물 구역에서 양수정 1이 설치될 경우 통과하는 지하수 유동량은 비례적으로 증가 되지 않는데, 이는 양수정 1이 사일로 5, 6의 사이에 위치하는데 기인하는 것으로 분석된다. 즉, 양수정과 거리상으로 가까운 사일로 5, 6에서 지하수 유동량이 크게 증가하며 양수정과 비교적 먼 사일로 1, 3에서는 유동량이 감소하게 된다.

양수정 2에서 연간 50,000 m³의 물을 양수하는 경우, 사일로 내부 폐기물 적치 영역을 통과하는 지하수 유동량은 12.45~21.89 m³/day의 범위로 분석되었으며, 사일로 2에서 최대 유동량인 21.89 m³/day,

Table 12. Groundwater flux through the disposal silo without pumping well (m³/day)

	Silo1	Silo2	Silo3	Silo4	Silo5	Silo6
Undisturbed condition	3.06	4.64	2.41	2.33	2.94	2.16
Before deterioration	5.62×10 ⁻³	4.01×10 ⁻³	4.41×10 ⁻³	4.84×10 ⁻³	3.54×10 ⁻³	6.99×10 ⁻³
After deterioration	8.55	13.01	9.22	8.44	8.92	8.71

Table 13. Groundwater flux through the disposal silo with pumping well (m³/day)

	Silo1	Silo2	Silo3	Silo4	Silo5	Silo6
After deterioration of engineering barrier	8.55	13.01	9.22	8.44	8.92	8.71
Pumping well 1	13.91	22.19	13.30	15.51	15.36	16.44
Pumping well 2	13.71	21.89	12.74	14.05	15.73	12.45

사일로 6에서 12.45 m³/day의 최소값으로 각각 산출되었다 (Table 12). 폐기물 구역을 통과하는 지하수의 유동량을 양수정 개발이 없는 상태와 비교해 볼 때, 각 처분 사일로의 폐기물 구역에서 양수정 2가 설치될 경우, 통과하는 지하수 유동량은 비례적으로 증가 되지 않는데 이는 양수정 2가 남쪽에 위치한 사일로 1, 3, 5와 가깝기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 양수정과 거리상으로 가까운 사일로 1, 3, 5에서 지하수 유동량이 크게 증가하며 양수정과 비교적 먼 사일로 2, 4, 6에서는 유동량이 감소하게 된다.

다. 양수 효과에 따른 안전성 평가 인자

양수 효과에 따라 관련되는 안전성 평가 인자 중

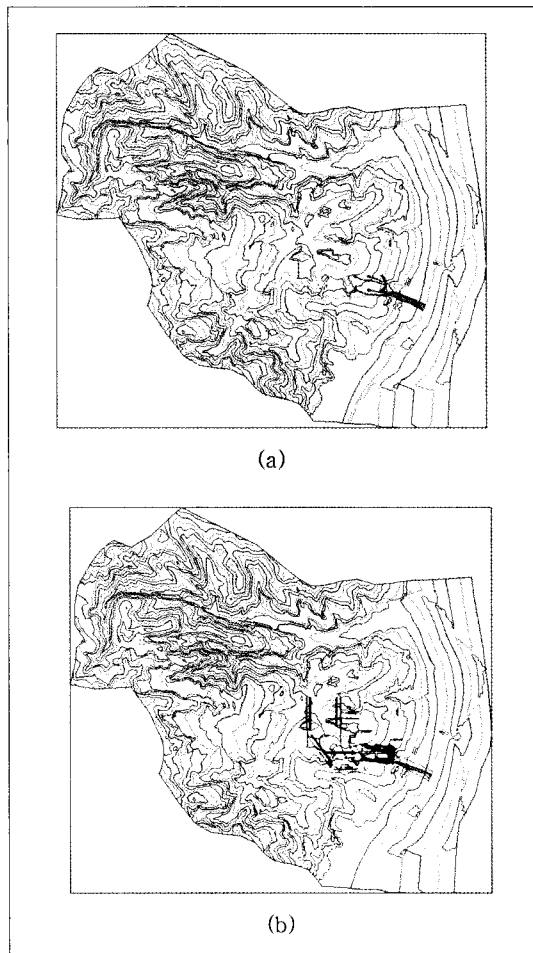


Fig. 10. Pathway analysis with pumping well 1 (Case 2) ; before deterioration of engineering barrier (a), after deterioration of engineering barrier (b),

사일로에서 양수정까지 지하수운 (groudwater plume)의 Darcy 속도 및 평균 이동 거리를 도출하기 위해, 입자 추적 기법을 이용하여 처분 사일로에서 유출되는 입자의 Darcy 속도 및 이동 거리를 도출해 보았다 (Figure 10, Figure 11). 본 안전성 평가의 인자 도출은 콘크리트 방벽의 열화가 진행되었을 경우에 한정하여 분석하였다 (Table 14, Table 15).

양수 효과에 따른 지하수의 Darcy 속도는 양수정 1이 설치되었을 때 양수정과 거리가 가까운 사일로 5, 6에서 평균 Darcy 속도가 현저히 큰 값을 보이고 있다 (Table 14). 또한, 양수정 2가 설치된 경우 양수정 2와 가까운 위치에 있는 사일로 1, 3, 5에서의 Darcy 속도가 사일로 2, 4, 6에 비해 크게 도출되어 양수정에 의한 양수 효과를 보인다고 판단된다. 양수정 설치에 따라 사일로에서 노출되는 입자의 평균 이동 거리는 Table 15와 같으며, 특히 사일로 5, 6 사이에 위치한 양수정 1의 경우, 입자의 이동 거리가 사일로 1에 비해 사일로 2에서의 값이, 사일로 3에 비해 사일로 4에서의 값이, 사일로 5에 비해 사일로 6에서의 값이 현저히 큼을 알 수 있다. 이는 자연 상태의 지하수 유동 방향이 서북 방향에서 동남 방향으로 향하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 양수 효과에 의한 지하수 유동 방향의 벡터와 자연 상태의 지하수 유동 방향의 벡터에 대한 합을 충분히

Table 13. Groundwater flux through the disposal silo with pumping well (m³/day)

	Silo1	Silo2	Silo3	Silo4	Silo5	Silo6
After deterioration of engineering barrier	8.55	13.01	9.22	8.44	8.92	8.71
Pumping well 1	13.91	22.19	13.30	15.51	15.36	16.44
Pumping well 2	13.71	21.89	12.74	14.05	15.73	12.45

Table 14. Average Darcy velocity with pumping well from disposal silo to pumping well or discharge area (m/sec)

	Silo1	Silo2	Silo3	Silo4	Silo5	Silo6
Pumping well 1	5.14×10 ⁻⁸	3.48×10 ⁻⁸	6.83×10 ⁻⁸	4.67×10 ⁻⁸	1.34×10 ⁻⁷	1.31×10 ⁻⁷
Pumping well 2	3.47×10 ⁻⁸	3.40×10 ⁻⁸	3.71×10 ⁻⁸	3.70×10 ⁻⁸	3.87×10 ⁻⁸	2.75×10 ⁻⁸

Table 15. Travel length of groundwater with pumping well from disposal silo to pumping well or discharge area (m)

	Silo1	Silo2	Silo3	Silo4	Silo5	Silo6
Pumping well 1	253.4	294.4	169.6	174.0	66.8	68.2
Pumping well 2	314.6	401.0	218.4	342.6	138.6	297.4

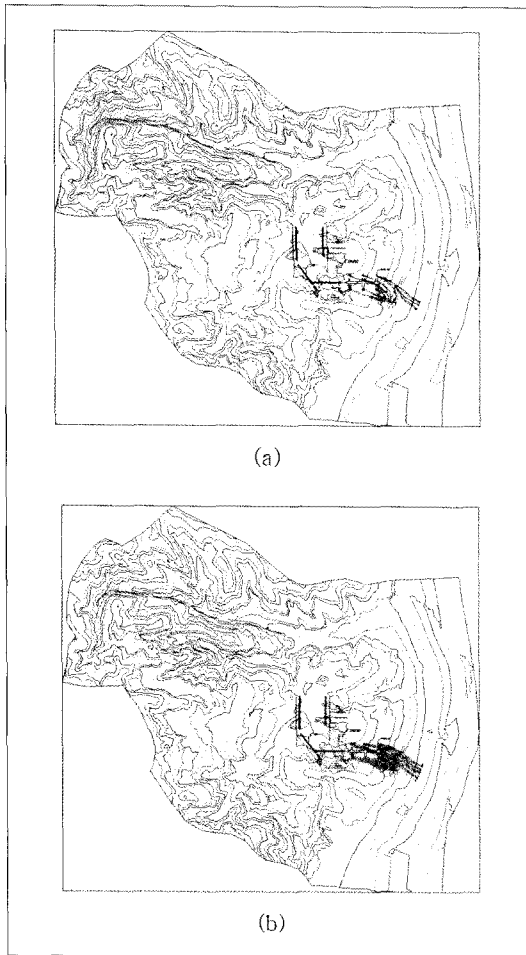


Fig. 11. Pathway analysis with pumping well 2 (Case 2) ; before deterioration of engineering barrier (a), after deterioration of engineering barrier (b)

반영한다고 분석된다.

IV. 결 론

경주 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지에 건설 될 지하 시설물을 고려하여 지하수 유동 모델링 결과, 처분 안전성 평가를 위해 건설 중 지하 시설물의 지하수 유입량, 처분장 폐쇄 후 처분 사일로로 통과하는 지하수 유동량 및 처분 사일로에서 배출 지역까지의 지하수 유동로에 대한 이동거리 및 단위유량을 도출하였다. 또한, 가상의 인간침입시나리오를 위해 우물 시나리오를 가정하여 지하수 유동 모델링을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 처분 안전성 평가

와 관련된 입력 인자를 도출하였다.

- 처분 시설 건설 기간 중, 지하 시설물의 지하수 유입량을 구한 결과, 국도 31호선 및 진입터널의 평균 유입량은 $125.1 \text{ m}^3/\text{day}$ 및 $322.5 \text{ m}^3/\text{day}$ 이며, 사일로에서의 지하수의 평균 유입량은 $48.7 \sim 62.1 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 도출되었다.

- 처분 시설 폐쇄 후, 콘크리트 방벽의 열화 과정을 고려하여 수치 모사를 수행한 결과, 공학적 방벽이 건전한 경우에 사일로를 통과하는 지하수의 유량은 처분장이 건설되기 전의 결과에 비해 적은 유량이 흐르는 것으로 분석되며, 공학적 방벽이 열화된 후, 사일로를 통과하는 지하수의 유동량은 처분장이 건설되기 전에 비해 2~3배의 많은 유량으로 산출되었다. 이는 공학적 방벽의 성능이 처분 부지의 안전성에 주요한 영향을 미치는 것을 의미한다.

- 처분 부지의 지하수 유동 특성에 따라 처분 시설로부터 누출된 입자가 지하수를 통해 생태계로 누출되기까지의 유동로를 입자추적기법을 이용하여 규명한 결과, 함양 지역은 처분 사일로의 북서 방향으로 200~300 m 이격된 고지대이며, 배출지역은 처분 부지의 동쪽에 위치한 해안지역으로 동남동 방향의 유동로를 갖는 것으로 분석되었다. 처분 사일로로부터 생태계로 유출되는 지하수 이동 거리는 지하수의 이동 경로 및 사일로의 배치에 따라 차이가 나는데, 배출지역에서 멀리 떨어진 사일로에서 그 지하수의 유동로가 수직적으로 깊은 영역을 통해 흐르는 것으로 분석된다.

- 지하수의 체류 시간에 대해 이동 거리만을 기준으로 판단해 볼 때, 처분 사일로를 지나는 지하수의 연대는 비교적 가까운 거리의 함양지역으로 인해 크지 않을 것으로 판단된다.

- 인간 침입 시나리오 중, 우물 시나리오를 고려하여 지하수유동모델링의 Case 2 모델을 이용하여 수치 모델링을 수행하였다. 가상의 2개의 우물에서 연간 $50,000 \text{ m}^3$ 의 물을 양수한다고 가정하였을 때, 사일로 내부 폐기물 적치 영역을 통과하는 지하수 유동량은 양수정이 없을 때에 비해 현저한 증가를 나타내었다. 하지만, 각 사일로별 지하수 유동량은 양수정이 없을 때의 값과 비교해 볼 때, 사일로와 양수정의

위치 관계 및 매질의 불균질성 등으로 인하여 비례적으로 증가 되지 않았다. 특히, 처분 사일로에서 배출 지역까지 지하수의 Darcy 속도 및 이동 거리를 산출한 결과, 사일로와 양수정의 위치 관계가 처분 사일로에서 배출 지역까지 형성되는 수두 구배에 변화를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

and Clausnitzer, V., FEFLOW 5.2: Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, User's Guide, WASY GmbH(2005).

[7] 한국수력원자력 주식회사, 중·저준위 폐기물 처분시설 안전성평가보고서(2007).

감사의 글

이 논문은 중저준위처분장 부지특성조사의 일환으로 수행되었으며 일부 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업과제의 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사 드린다.

참고문헌

[1] Johan G Holmen, On the flow of groundwater in closed tunnels, SKB TR 97-10, Svensk Kärnbränslehantering AB(1997).

[2] Dershowitz, B., Rock joint systems, Ph.D.thesis, MIT, Cambridge, Mass, 764pp(1984).

[3] Bear, J., Tsang, C. F., and de Marsily, G., Flow and contaminant transport in fractured rock, Academic Press, Inc., San Diego(1993)

[4] Magnus Odén, Auli Niemi, Chin-Fu Tsang and Johan Öhman, Regional channelized transport in fractured media with matrix diffusion and linear sorption, Water Resour. Res., 44, W02421, doi:10.1029/ 2006WR005632 (2008).

[5] Selroos, J.-O., Walker, D.D., Strom, A., Gylling, B., Follin, S., Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock, Journal of hydrology, pp.174-188(2002).

[6] Diersch, H.-J.G., Schatzl, P., Grundler, R.,