

## Numerical simulation of groundwater flow in LILW Repository site:I. Groundwater flow modeling

### 중 · 저준위 방사성폐기물 처분 부지의 지하수 유동에 대한 수치 모사: 1. 지하수 유동 모델링

**Kyung Woo Park<sup>1)</sup>**, Sung-Hoon Ji, Chun Soo Kim, Kyung Su Kim and Ji Yeon Kim\*

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

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

**박경우<sup>1)</sup>**, 지성훈, 김천수, 김경수, 김지연\*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

\*한국수력원자력(주), 서울특별시 강남구 영동대로 411

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

#### Abstract

Based on the site characterization works in a low and intermediate level waste (LILW) repository site, the numerical simulations for groundwater flow were carried out in order to understand the groundwater flow system of repository site. To accomplish the groundwater flow modeling in the repository site, the discrete fracture network (DFN) model was constructed using the characteristics of fracture zones and background fractures. At result, the total 10 different hydraulic conductivity(K) fields were obtained from DFN model stochastically and K distributions of constructed mesh were inputted into the 10 cases of groundwater flow simulations in FEFLOW. From the total 10 numerical simulation results, the simulated groundwater levels were strongly governed by topography and the groundwater fluxes were governed by locally existed high permeable fracture zones in repository depth. Especially, the groundwater table was predicted to have several tens meters below the groundwater table compared with the undisturbed condition around disposal silo after construction of underground facilities. After closure of disposal facilities, the groundwater level would be almost recovered within 1 year and have a tendency to keep a steady state of groundwater level in 2 year.

**Key words** : LILW repository site, Groundwater flow modeling, Hybrid-EPM approach

1) Corresponding Author. E-mail : [woosbest@kaeri.re.kr](mailto:woosbest@kaeri.re.kr)

요 약

중·저준위 방사성폐기물 처분 부지의 부지특성조사 결과를 이용하여 처분장 부지의 지하수 유동체계를 이해하기 위한 수치 모델링을 수행하였다. 부지의 투수성 단열대 및 암반단열의 분포 특성에 근거하여 단열망 모델을 구축하고, 이를 이용하여 생성된 10개의 수리전도도장을 지하수 유동 모델링에 반영한 추계론적 Hybrid-EPM 방법으로 수치 모델을 구성하였다. 10회의 지하수 유동 모델링 결과, 처분 부지의 지하수두 및 지하수 흐름은 지표 근처에서 지형적인 요소에 크게 지배를 받는 것으로 나타나며 처분장 심도에서는 주변에 존재하는 투수성이 높은 단열대에 의해 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 특히, 처분 시설 건설 중 사일로 주변 지역에서 수위 강하가 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 처분 시설 폐쇄한 후 지하수위는 1년 이내에 급속히 회복되며, 대략 2년이 지난 후 완전히 회복 될 것으로 분석되었다.

**중심단어** : 중·저준위방사성폐기물 처분 부지, 지하수 유동 모델링, Hybrid-EPM 방법

I. 서론

한국수력원자력주식회사 (KHNP)는 2005년 11월부터 주민 투표를 거쳐 선정된 경주처분 부지에서 중·저준위 방사성폐기물처분장의 건설 및 운영 인허가를 위해 처분 시설 안전성 평가 조사를 수행하였다. 처분 시설 안전성 평가 조사는 부지의 지리 및 인구, 주변 산업특성, 기상 및 수문, 지질, 수리지질, 지화학, 지진, 지질공학, 자연 현상의 특성에 대한 전반적인 부지의 방사선적 안정성 평가 항목을 포함하고 있다. 부지 특성조사는 지질, 수리지질, 지화학, 지질공학에 대한 특성조사를 포함하게 되며, 이 결과를 이용하여 처분장의 장기 성능 평가 및 처분장의 설계에 대한 기본 정보를 제공하게 된다. 또한, 중·저준위 처분장 건설에 대한 환경영향 평가의 기본 자료를 제공하게 된다.

처분 안정성 평가 관련 주요 입력 인자인 핵종의 이동거리와 처분 사일로를 통과하는 지하수의 유량이 지질, 수리지질에 기반한 지하수 유동 모델링을 통해 도출되며, 핵종에 대한 이송 지연 관련 용질 이송 모델은 지화학 자료를 통해 제공되기 때문이다 [1]. 따라서 처분 대상이 되는 지하 환경에서의 지질, 수리지질 및 지화학 특성에 대한 정밀한 조사가 방사성폐기물처분의 안전성 평가에 주요한 영향을 미치게 된다 [2].

일반적으로 결정질 암반에 대한 수리지질특성은 상

부 풍화대 및 층적층으로 이루어진 다공성 매질의 특성과는 달리 심부 암반에 존재하는 투수성 단열에 의해 영향을 받는다. 지하수유동에 대한 결정질 암반을 구성하는 단열을 다공성 매질의 공극으로 가정하여 해석하는 등가다공성연속체 (Equivalent Porous Medium, EPM)로 해석하기도 하지만 [3], 일부 존재하는 투수성 단열이 배경 단열에 비해 투수성이 현저하게 양호하여 대표체적 (Representative Elementary Volume, REV) 개념을 이용하여 단일 투수계수를 입력하는 방법은 현상을 정확히 설명하는 데에 한계가 있다. 따라서, 기반암에 존재하는 단열대를 결정론적 수리인자로서 배경 단열이 분포하는 암반 영역과는 차별하여 모델 영역에 입력하는 접근 방법이 이를 극복하기 위한 한 해결 방법이 될 수 있다. 그러나, 이를 위해서는 심부 영역에 대한 단열대 및 단층에 대한 정확한 3차원적 분포특성이 결정질 암반에서의 수리지질 모델 구성에 필수적인 요소로서 선행되어야 할 부분이다 [4].

결정질 암반에 대한 수리지질특성 연구는 석유 탐사 및 방사성폐기물 처분을 중심으로 활발히 진행되었다. 특히, 방사성폐기물 처분에 대한 심부 결정질 암반의 연구는 1977년부터 운영된 스웨덴의 Stripa 프로젝트를 시점으로 활발한 연구가 지속적으로 수행해 오고 있다 [5, 6, 7, 8, 9]. 국내의 경우 결정질 암반에

대한 지하수 유동 관련 연구는 석유 비축기지의 수리지질에 대한 안정성 평가와 관련하여 다수 수행된 바가 있다 [14, 15]. 그러나, 석유 비축기지 관련 기존의 국내 연구는 강우 자료와 관측공의 수위 자료에 대한 시계열 분석 자료 및 일부 결정론적 단열만을 반영한 지하수 유동 모델링 결과 등 종합적인 부지특성조사에 기반을 두지 못한 일부 제한된 자료만을 이용하여 해석하였기 때문에 결정질 암반의 지하수 유동을 종합적으로 해석하기에는 부족한 부분이 있다.

본 논문에서는 2005년 11월부터 2007년 1월까지 수행된 부지특성조사 자료 중에서 지질, 수리지질의 자료 [16]를 이용하여 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지의 수리지질체계를 종합적으로 분석하였으며, 이를 지하수 유동 모델링에 반영하였다. 또한, 지하수 유동 모델링 결과를 이용하여 처분장 건설에 따른 장기 지하수 시스템의 변화를 예측하고 처분장 설계의 기본 자료를 제공하기 위한 결과를 요약하였다.

## II. 연구 지역

### 가. 지형학적 조건

중·저준위 방사성폐기물 처분 시설의 부지는 우리나라 동남쪽 해안에 위치하며 처분 시설 부지의 중심점을 한국의 횡축 메르카토르 (Transverse Mercator) 좌표로 환산하면 242,714 m E, 248,429 m N이다 (Figure 1). 부지의 동쪽은 동해와 인접하고, 서쪽은 토함산 (745 m), 형제산 (530 m)과 삼태봉 (629 m)으로 이어지는 준령들이 남북 방향으로 발달하여 태백산맥 남단의 준산악지를 이루고 있다. 부지 인근의 주요 수계로는 북쪽에 대동천이 흐르고 서쪽에서 남쪽으로 나산천이 흘러 동해에 유입되고 있다. 처분 시설 부지는 해안가의 낮은 구릉지로서 EL. 200 m 이하의 표고를 이루고 있으며, 동측 해안은 전반적으로 단조로운 형태를 보이나 부분적으로는 만형의 해안에 자갈과 바위가 섞인 소형 사구가 형성되어 있다 [16].

### 나. 지질학적 조건

경주 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지에 분포

하는 암석은 크게 백악기 퇴적암류와 후기에 관입한 화강암류로 구분할 수 있다. 퇴적암류들은 경상충군의 상부 층준에 대비되는 것으로 알려지고 있으며, 주로 이암과 실트스톤, 사암의 호층으로 구성된다. 층리의 발달은 뚜렷하지 않으나 대략 북서 내지 서쪽으로 45도 이상 고각도로 경사하는 경향을 보인다. 화강암류는 백악기 퇴적암류를 관입하며 처분 부지의 중심 지역에서부터 북동부 지역에 걸쳐 분포한다. Figure 2의 지질도에서 보여주는 바와 같이 화강암류

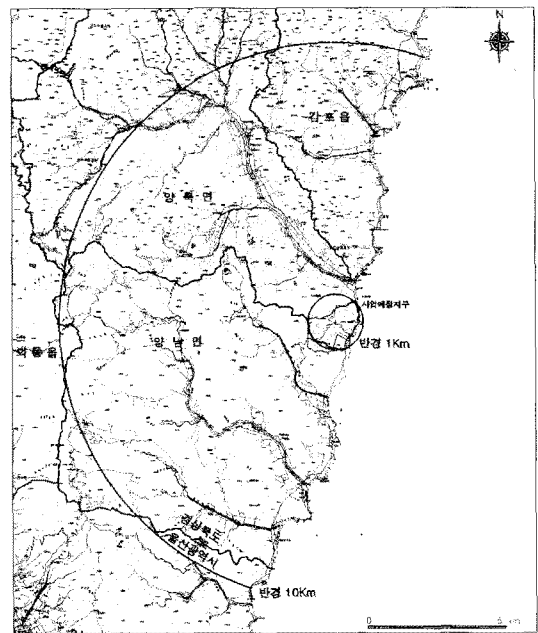


Fig. 1. Administrative district around Gyeong-Ju LILW repository site; 10km of radius and 1km of radius



Fig. 2. Geological map around LILW repository site and location map of boreholes around LILW repository site; KB series well field and DB-series well field

는 중립질의 흑운모화강암과 화강섬록암 내지 섬록암의 특징을 보여주고 있다. 화강섬록암과 섬록암은 부지의 북측에서 남측으로 갈수록 점이적으로 변하는 특징을 보여주는 바, 대체적으로 퇴적암과의 관입 접촉부에서 중심부로 가면서 염기성에서 산성암으로 변화하는 정상성분 누대 심성암체의 양상을 나타낸다. 즉 처분 부지의 남쪽 해안가 일대에는 석영섬록암이 분포하며, 관입체의 중심부가 되는 북쪽으로 가면서 화강섬록암으로 변한다.

처분 부지의 제 4기층으로는 하천이나 지형적으로 저지에 형성된 하상퇴적층 혹은 산록층이 있으며 해안을 따라 고기 해안 단구층이 확인된다. 처분 부지에서 확인되는 해안단구층은 대략 표고 10~15 m 지점과 30~35 m 지점의 단구층이 가장 뚜렷하게 나타난다. 그러나 대부분이 침식되어 단구 지형의 상부 표면에 얇은 사력층을 잔존시키는 정도의 분포를 보이고 있다 [16].

**다. 조사 시추공**

중·저준위 방사성폐기물 처분 부지의 부지특성조사를 위해 처분 부지에서 총 31공의 시추공을 굴착하였다 (KB-series, DB-series를 기준으로 수량을 합산함). KB-조사공은 부지특성조사 초기에 (2005년) 처분 부지에 대한 지질학적 특성 및 수리지질학적 특성 분석을 위해 수직 방향으로 굴착되었으며, DB-조사공은 부지특성조사 결과 처분부지에 존재하는 단층에 대한 확인을 위해 경사공으로 설치되었다. 그 외, 사일로 주변의 상세 지질 조사를 위해 SS-조사공 및 양수시험을 위한 PW 관정군 등이 2005년 이후에 굴착되었으나, 그림으로 도시하지는 않았다 (Figure 2).

**Ⅲ. 지하수 유동 모델링**

**가. 모델링 방법 및 전략**

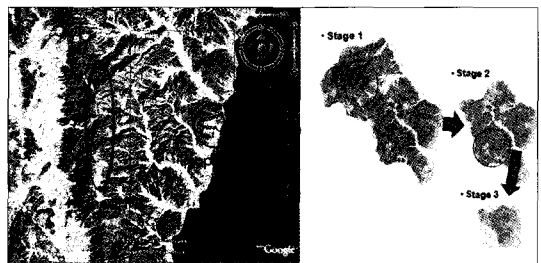
지하수 유동 모델링은 처분 시설에 영향을 미치는 지하수체계에 대한 수리 경계를 설정하여 지하수 유동특성을 이해하고, 처분 안전성 평가에 필요한 정량적인 지하수 유동 인자와 설계에 필요한 처분 시설 건설 후에 예측되는 지하수 체계 변화 자료를 제

공하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 지하수 유동 모델링을 광역 규모와 국지 규모로 나누어 실시하였다.

광역 규모의 지하수 유동 모델링은 광역적인 지하수 유동 시스템에 대한 일반적 이해 및 국지 규모의 지하수 유동 모델에 대한 경계를 설정하기 위해 수행하였다 [10]. 최종 광역 규모를 설정하기 위해 먼저 지형적인 특성을 고려하여 처분 부지 서쪽으로 10 km 이격된 고지대를 포함한 영역을 설정하고, 처분 부지 주변 지하수의 흐름에 영향을 미칠 수 있는 수리 구조를 분석하였다. 광역 규모 지하수 유동 체계 도출을 위한 모델링은 전체 매질을 포화대로 가정하고, 상부 지하수위는 지형 고도에 맞춘 후, 처분 부지 주변의 지하수 시스템에 대한 함양지역 혹은 배출지역에 대한 변화 여부를 입자의 정방향 추적과 역방향 추적기법을 통해 최종 광역 규모를 선정하였다 (Figure 3).

국지 규모 모델의 수리 경계 조건은 본 지역의 지형적인 조건을 기본으로 가능한 독립적인 지하수 유동 체계를 구성하는 지역으로 설정하였다. 그러나 광역 규모와의 지하수 연결성을 고려하여 국지 규모에 발달한 단열대의 연장성을 검토하였으며, 이에 대한 특성은 민감도 분석을 수행하여 국지 규모의 영역을 최종적으로 선정하였다.

광역 규모의 지하수 유동 모델링은 부지에 발달하고 있는 상대적으로 큰 규모의 단열대를 대상으로 부지를 몇 개의 암반 블록으로 구성되는 다공성연속체 매질 (Continuous Porous Media)로 단순화하여 모델을 수행하였다. 따라서 투수성구조영역 (HCD)과 수리암반영역 (HRD)이 구분되지 않았으며, 불포화대 영역도 수리토양영역 (HSD)에 포함되었으나 상



**Fig. 3. Decision of regional scale area for groundwater flow modeling**

부 수리 경계를 지하수면으로 하였기 때문에 불포화대의 지하수 유동 특성은 분석되지 않았다.

한편, 국지 규모의 지하수 유동 모델링은 수리토양 영역 (HSD), 투수성구조영역 (HCD)과 수리암반영역 (HRD)이 포함되어 있으며, 투수성구조영역과 수리암반영역에 대한 수리 입력 인자로서 현장 지질조사 및 수리지질조사 자료를 충분히 반영하기 위하여 주요 입력 인자인 수리전도도를 단열망 모델을 이용하여 도출하였다. 특히, 투수성구조영역과 수리암반영역에 대한 수리전도도는 추계론적 분석을 위해 10회의 상이한 단열망 모델을 구성하여 10개의 다른 수리전도도에 대한 3차원의 자료를 도출하였으며, 이를 각 모델 격자에 수리 인자로 입력하여 각 항목 당 총 10회의 지하수 유동 모델링을 수행하였다.

처분 부지의 동쪽으로 해안과 접하고 있는 부지 특성을 고려하여 해수의 경계를 모델의 경계 조건으로 다루었다. 본 모델링은 해수의 침투 및 확산을 해석하는 용질이동모델을 수행하지 않고 단순히 밀도 차에 의한 수리 경계만을 고려하여 부지의 지하수 유동 체계분석에 초점을 두었다. 건설 후의 지하수 유동 체계 변화를 분석하기 위하여 현재 계획 중에 있는 국도 31호를 영구적인 시설로 고려하여 새롭게 건설된 터널이 지하수 체계에 미치는 영향을 검토하였고, 예비 설계에서 제시하는 처분 시설 배치에 대한 지하수 위 강하 특성을 분석하였다.

#### 나. 전산 코드

지하수 유동을 모사하기 위해 FEFLOW (ver. 5.2)를 이용하였다 [11]. FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System)는 유한요소법 (Finite Element Method, FEM)을 이용한 수치모의 소프트웨어로 유한차분법을 이용한 다른 모델에 비해 보다 정밀한 지형 묘사가 가능하며, 결정적 구조대 (discrete features)를 고려하는 모델이 포함되어 처분 부지에 존재하는 시추공 혹은 지질조사에서 규명된 크고 작은 단열대를 모사할 수 있는 장점이 있다. 또한, 밀도 의존 흐름에 대한 모사가 가능하여 담수와 해수가 만나는 해안 지역을 모의할 때 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다.

### IV. 광역 규모 지하수 유동 모델링

#### 가. 경계 조건 및 입력 인자

지하수 유동 모델링은 수치 모사에 대한 목적 및 부지 고유의 지질학적, 수리지질학적 영역에 따라 접근 방법을 달리한다. 즉, 본 광역 규모의 지하수 유동 모델링은 국지 규모의 모델링에 대한 규모 경계를 제공할 것을 목적으로 수행하였기 때문에 수리지질인자 및 경계 조건 등에 많은 가정을 포함하고 있다. 먼저, 경계 조건은 광역 규모의 수치 영역에서 존재하는 소하천을 고도에 따른 일정수두경계조건으로 가정하여 모델링을 수행하였으며, 모델에 입력된 수리지질인자는 처분 부지에서 현장 수리시험을 통해 도출된 값에 대해 통계적 평균치를 구해 일정한 값을 입력하였다.

본 광역 규모의 모델에서 입력된 수리지질요소는 수리-구조모델에서 분류한 투수성구조영역 (HCD)과 사이에 분포하는 수리암반영역 (HRD), 그리고 상부층을 이루는 수리토양영역 (HSD)으로 구분하였으며, 각 요소별 정의는 아래와 같다.

- HCD : 지질-구조모델에서 제시하는 단열대 중  $Z_{21} \sim Z_{23}$ 과  $Z_{31} \sim Z_{32}$ 의 5조의 큰 규모 단열대로 설정하였으며, FEFLOW에서는 결정론적 구조대 (Deterministic feature)로 입력하였음.

- HRD : 수리암반영역에 대한 수리전도도의 차이가 크지 않아 수리전도도 입력 자료를 통계적으로 분석 단일 값을 입력. 즉, 입력된 수리전도도는 광역규모의 전체 HRD를 대표하게 됨.

- HSD : 지하수면 하부 구간 (포화대)만을 대상으로 하였으며, 수리암반영역 상부에 HSD층을 포함. 수리전도도는 현장 자료에 근거하여 입력.

#### 나. 격자 규모

광역 규모의 격자는 모델 영역의 규모가 가로 3.87 km, 세로 4.56 km로 하나의 층이 3,874개의 노드를 갖는 삼각기둥 요소 (triangular prism element)로 생성되었으며, HCD 근처에는 작은 격자로, 그 외 영역의 격자는 크게 만들어 졌다. 총 5개의 layer로 구성되었으며 layer 1은 지표에서 25 m, layer 2는 50 m,

layer 3는 200 m의 깊이로 설정하였다. layer 4 과 layer 5는 각각 -400 m, -1,000 m의 깊이로 설정하였다 (Figure 4).

**다. 모델링 결과**

**① 지하 수두 분포**

광역규모 모델에서 도출된 수리 수두 분포는 광역 지하수의 유동은 일반적으로 지형적인 요인에 의해 크게 지배를 받는 것으로 나타나고 있다 (Figure 5). 그러나, 결정적 구조대 (deterministic feature)로 고려된 단열대에서 주변 지하수에 비해 수두 값이 현저히 낮은 현상을 볼 수 있으며, 이는 광역 규모의 지하수 유동 모델에서도 큰 규모 단열대는 지하수의 흐름에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 광역 규모의 지하수 유동 모델에서 단열대가 수직으로 입력되어 과장되게 표현될 수 있지만, 그 영향은 무시할 수 없는 것으로 판단된다.

도출된 광역 지하수의 유속에 대한 흐름장은 단열대가 존재하는 지역에서 단위 유량이 현저히 높음으로 나타나 주변 지하수시스템의 흐름을 지배하는

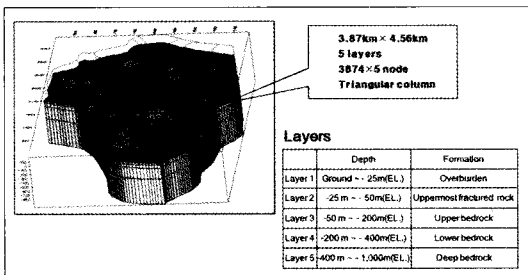
것으로 판단된다(Figure 5). 즉, 단열대가 지하수의 주요한 유동로의 역할을 하지만 단열대를 경계로 양쪽의 지하수체를 구분하는 수리 경계의 역할도 하는 것을 알 수 있다.

**② 지하수 함양 / 배출 지역**

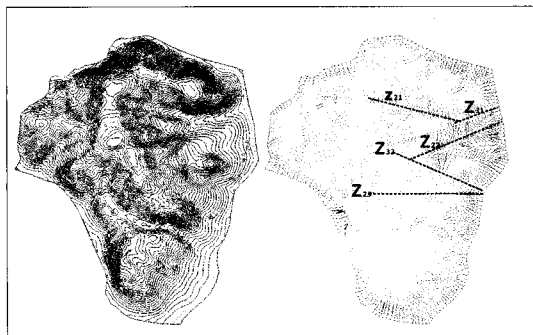
광역 규모의 지하수 유동 모델에서 지하수의 함양 영역과 배출 영역은 Figure 6과 같으며, 적색의 원은 함양을, 청색의 원은 배출을 의미하고, 그 크기는 함양량 혹은 배출량을 의미한다. 강수에 의한 함양이 전체 영역의 상부에서 보이고 있으며, 일정 수두 경계조건으로 설정한 하천을 통해 배출되고 있다. 함양 및 배출에 대한 정량적 해석은 광역 규모의 지하수 유동 모델에서 할 수 없으나, 단열대가 존재하는 지역에서 다른 배출 지역에 비해 좀 더 많은 지하수의 양적 변화를 확인할 수 있다.

**③ 국지 규모 경계 설정**

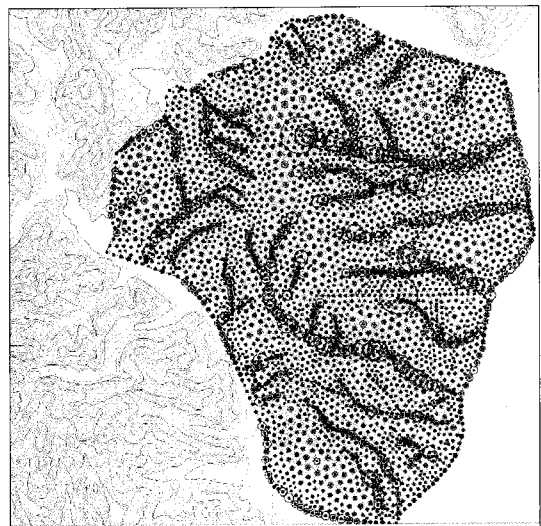
지하수 유동 체계의 적정 규모 설정에 있어서 문제점은 영역을 지나치게 크게 설정하거나 혹은 작게 설정하는 경우이다. 또한 수치 묘사의 영역 설정은 모델의 결과가 경계에 직접 영향을 받지 않는 범위에서 최소한의 크기로 설정하는 것이 바람직하며, 경계 조건을 설정하는 것은 모델링의 핵심이지만 수리지질학적 이해 없이는 쉽게 접근하기 어렵다. 따라서



**Fig. 4. Grid resolution and layered geologic information for regional scale groundwater flow modeling in Gyeong-Ju LILW repository site**



**Fig. 5. Simulated hydraulic head distribution and groundwater flux in regional scale area**



**Fig. 6. Recharge and discharge area in regional scale area; Red circle means a recharge area and blue circle means discharge area. And, the radius of circle is a magnitude of recharge and discharge rate.**

본 모사에서는 광역 지하수 유동 모델 해석에 따른 지하수두 및 지하수의 속도 분포 결과를 이용하여 처분 부지를 포함하는 영역에서 무유량경계 (no flow boundary)를 구하여 국지 규모의 지하수 유동 모델의 경계로 설정하였으며, 이는 본 지역의 지형적인 특성과도 일치하고 있다 (Figure 7).

## V. 국지 규모 지하수 유동 모델링

### 가. 가정 조건

본 지역의 지하수 조건은 과거 빙하시대 이후로 현재와 같은 정류 상태가 발달하고 있으며 앞으로도 이러한 조건이 유지되는 것으로 가정하였다. 그리고 국지 규모 지하수 유동 모델링에서 입력되는 투수성구조영역은 기존에 현장 지질 조사에서 확인된 투수성구조영역과 선구조 분석에서 도출된 결과를 이용하였다. 그러나 단열망 모델 결과 도출된 수리전도도 분포는 투수성구조영역, 소규모의 단열대 및 암반 매질의 구분 없이 암반 블록 (HRD-1, 2)의 투수성을 대표하는 것으로 가정하였고, 해수와 의 경계는 해수의 확산과 혼합이 없는 밀도 차에 의하여 형성되며, 자연 상태에서 본 지역에 해수 침투는 없는 것으로

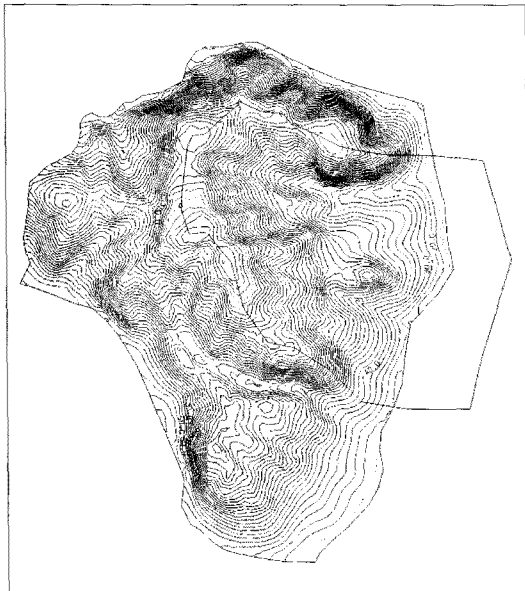


Fig. 7. Selection of local scale groundwater flow area from the result of regional scale groundwater flow modeling

가정하였다.

### 나. 개념 모델

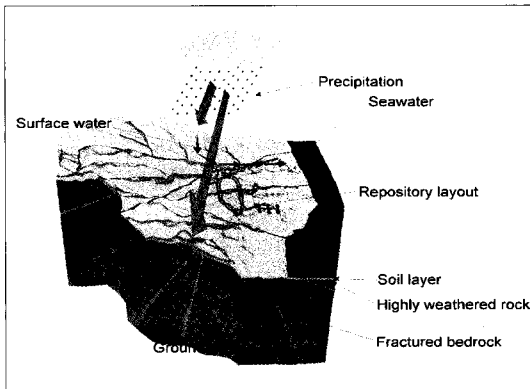
본 지역의 수리지질특성 (hydrogeological setting)은 지형적인 조건과 이를 구성하는 지하매질로 설명된다. 처분 시설 인근 지역은 서쪽으로 약 200 m의 산릉선으로 구성되며 인접한 해안으로 비교적 완만하게 동쪽으로 경사진 지형적인 특성으로 인해 독립적인 지하수 체계를 형성하고 있다. 이는 부지의 서쪽에 발달하고 있는 고산 지대 (EL. 440~750 m)도 분기되는 산릉선 (EL. 200~400 m)과 사이에 발달하는 하천 계곡 등으로 국지규모 지하수 유동 체계에 수리적 영향과 지하수 환경에 영향을 미치지 못하고 있다.

지하수의 유동력은 처분 시설 부지 서쪽의 산릉 지대에서 제공되고 있으며, 이는 국지 지하수계의 수리 경계를 이루고 있다. 전반적인 지하수는 서쪽의 고지에서 해안 방향으로 유동하고 있으나, 지형적인 특성으로 수리 경사는 0.08~0.15의 범위를 갖으며 국지적으로 남북방향의 지하수 유동도 유지되고 있다. 본 지역의 지하수 함양은 저지대와 해안가를 제외한 모든 지역이 함양 지역으로 고려되며, 지하수 배출은 해안과 부지 내에 분포하는 소규모 하천 (creek)을 따라 일어나는 것으로 해석된다.

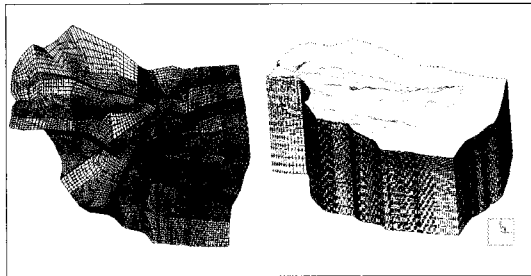
지하수 유동 체계를 분석하는 과정은 강수가 지하수 체계로 침투, 통과 및 배출하는 유동 현상을 정의하는 것이다. 강수에 의해 처분 시설 부지로 유입된 물은 지표수를 따라 지표수체로 흘러가거나, 지하로 침투 (infiltration)되어 지하수로 함양된다. 지표수로 흘러가는 물은 하천을 통해 바다로 흘러가게 되며, 함양된 지하수가 바다로 배출되기까지 토양층으로 구성된 수리토양영역, 투수성 단열로 구성된 투수성구조영역, 소규모 단열이 존재하는 기반암의 수리암반영역을 거친다 (Figure 8).

### 다. 격자 규모

국지 규모 모델의 격자는 모델 영역의 규모가 가로 2.95 km, 세로 2.65 km로 하나의 층이 23,618개의 노드를 갖는 사각기둥 요소 (quadrilateral prism



**Fig. 8. Conceptual model for local scale groundwater flow modeling in LILW repository site**



**Fig. 9. Grid resolution of local scale groundwater flow modeling**

element)로 구성되어 있다 (Figure 9). 각 층의 노드는 도로 터널 및 처분 시설이 없는 지역에서 가로 1 m~30 m, 세로 1 m~15 m 간격으로 설정되었으며, 도로 터널 및 처분 시설 (건설 및 운영동굴과 사일로를 포함)이 위치하는 지역에서는 이 시설을 적절히 반영하는 격자를 구성하였다. 또한, 단열대 및 지표 수계를 반영하기 위하여 격자 모양을 정사각형이나 직사각형의 정형화된 형태가 아닌 임의의 육면체로 변형하여 구성하였다. 모델 영역내의 단열대 및 도로 터널, 처분시설에 대한 수직적 배치를 용이하게 하기 위해 각 layer에 대한 고도를 조정하여 총 40개의 layer를 갖는 모델을 구성하였다.

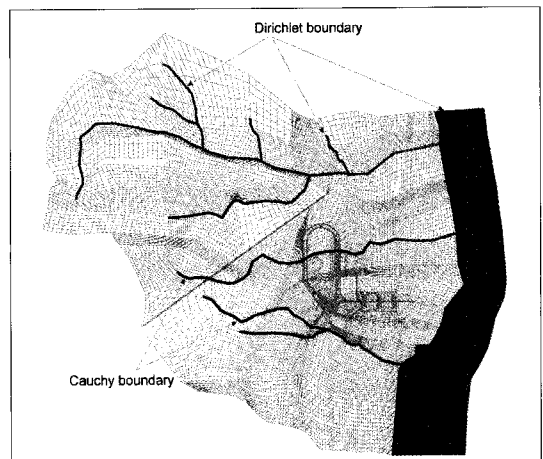
**라. 경계 조건 및 입력인자**

처분 시설 부지의 국지 규모 수치 모델링의 상부 초기 조건은 처분 부지 내 굴착된 조사공에서 관측한 지하수위 값을 기준으로 수리 수두 값을 설정하였다. 지하수위가 관측되지 않는 영역에서는 모델의 해발

고도를 기준으로 GL. -10 m의 일정 값을 두었다. 상부 지하수위는 부지의 함양량과 수리전도도에 의하여 모델에서 결정되며, 초기 지하수위의 설정은 정상 상태 (steady state)의 지하수 유동 모델링 과정에서 최종 수치해로의 수렴 속도에 관계되므로 가능한 한 작은 범위의 오차를 갖도록 초기 조건으로 지하수두 값을 입력하게 된다.

국도 31호선 터널 굴착 후 혹은 처분 부지의 건설 및 운영 동굴, 그리고 사일로를 건설한 후에 대한 부정류상 (transient state) 지하수 유동 모델링의 초기 조건은 정상류 상태의 지하수 유동 모델링 결과 도출된 지하수두를 이용하였다.

지하수 유동 모델링의 하천에 대한 경계 조건은 제 1경계 조건 (Dirichlet boundary condition)과 제 3경계 조건 (Cauchy boundary condition)을 사용하였는데, 제 1경계 조건에 대한 수리 수두는 경계 조건이 존재하는 지점의 해발고도 값을 지하수두 자료로 이용하였다. 처분 부지 및 국도 터널과 이격된 북쪽 영역에 존재하는 큰 규모의 하천은 하천에 대한 해발고도 값으로, 모델의 동쪽 영역에 존재하는 동해는 첫 번째 layer에서 해발고도 0으로 깊이에 따라 해수의 밀도(1,021kg/m<sup>3</sup>)를 고려하여 제 1경계 조건을 설정하였다. 처분 부지 주변에 존재하는 소규모 하천에 대해서는 제 3경계 조건을 이용하였다. 먼저 하천의 해발 고도에 맞도록 수리수두를 설정하였으며, 하천에서 매질로의 지하수의 유량에 대한 투수도



**Fig. 10. Numerical boundary condition for local scale flow modeling**



(transfer rate)는 수리토양영역에 대한 값으로 제시하였다 (Figure 10). 지하수의 경계조건으로 설정된 지역 외의 지표층에서는 모델에서 교정된 함양률에 의해 일정하게 지하로 함양되는 함양경계로서 수치 모델에 입력하였다.

본 국지 규모의 모델에서 입력된 수리지질요소는 수리-구조모델에서 분류한 투수성구조영역 (HCD)과 사이에 분포하는 수리암반영역 (HRD), 그리고 상부층을 이루는 수리토양영역 (HSD)으로 구분하였으며, 각 요소별 정의는 아래와 같다.

- HCD : 지질-구조모델에서 제시하는 단열대 중  $Z_{21} \sim Z_{23}$ 과  $Z_{31} \sim Z_{32}$ 의 5조의 큰 규모 단열대를 포함한 처분 부지의 선구조 분석에서 도출된 총 71개의 단열대

- HRD : 수리-구조모델에서는 HRD 1~ HRD 3의 3개 세부 암반영역으로 구분하였으며, HRD 1~2의 수리전도도는 배경 단열을 이용한 DFN 모델에서 도출하여 적용하였고, HRD 3의 수리전도도는 단일 값을 적용

- HSD : 지하수면 하부 구간 (포화대)만을 대상으로 하였으며, 토양층 및 상부 풍화대를 포함. 수리전도도는 현장 자료에 근거하여 모델링 교정 과정을 거쳐서 도출

위의 수리지질요소에 근거하여 투수성구조영역에 대한 단열대는 결정론적으로 모델에 입력되고, 수리암반영역에 존재하는 배경 단열은 추계론적으로 모델에 입력되어 단열망 모델을 구성하였으며, 이를 통해 HSD의 하부 영역에서 수치모델에서 구성된 각각의 격자에 대한 수리전도도 값을 도출하였다. 결과적으로 HSD의 하부 영역에 대한 수치모델 격자는 생성되는 배경 단열의 추계론적 특성에 의해 공간적으로 다양한 수리전도도 값을 가질 수 있으므로, 이를 고려하기 위해 총 10회의 수리전도도장을 생성하여 수치모사를 수행하였다.

### 마. 수치 모델 단계

처분 부지의 국지 규모 지하수 유동 모델링은 다음의 시간 이력 절차로 수행하였다.

- 1 단계 : 자연 상태의 지하수 유동 체계 분석

- 2 단계 : 국도터널, 건설·운영동굴과 사일로 건설에 따른 지하수 유동체계 변화

- 3 단계 : 처분시설 폐쇄 후 지하수위 회복예측

### 바. 모델 교정

지하수 유동 모델의 교정은 조사공의 관측되는 지하수위를 근거로 하였으며, 초기 함양량 자료 (Table 1)와 현장 수리시험에서 도출된 토양층 및 상부 풍화대의 수리전도도를 교정하여 관측공의 지하수위와 수치 모델에서 도출되는 모사 수위에 대해 오차를 줄이는 과정으로 수행되었다.

일반적으로 지하수 함양량은 지형, 강수량 (강수강도, 강수기간), 식생, 토양의 수리특성 및 지하수면의 심도 등 다양한 요인에 의하여 달라지므로, 이를 정확하게 추정하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 본 지하수 유동 모델에서는 부지특성조사에서 계측, 분석한 함양량 자료를 지하수 함양률의 초기 자료로 사용하였으며 (Table 1), 지하수 유동 모델링에서 도출된 모사 수위와 조사공의 관측 수위를 비교하여 그 오차를 줄이는 방향으로 함양률을 변화시켰다. 함양률에 대한 수치모델의 교정을 위해 초기 함양률을 기준으로 최대 변위를 50%로 두어, 관측 수위 및 모사 수위에 대한 목적 함수를 구성하여 최적의 오차를 갖는 시추공의 함양률 자료를 모델의 함양률로 결정하였다 (Figure 11). 최종 교정된 함양률 결과는 Table 2와 같다.

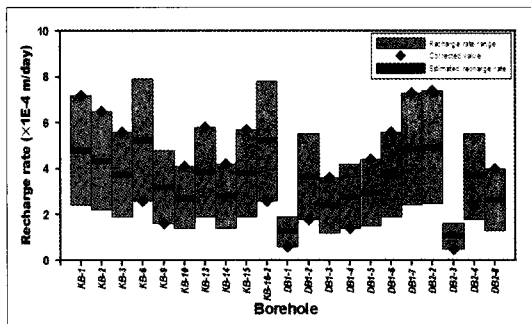
수리전도도는 포화대 지하수 유동 모델링에서 함양률과 더불어 중요한 수리지질인자이다. 처분 부지에서 암반 블록에 대한 수리전도도는 항공사진으로 분석된 선구조를 바탕으로 시추공과 지표에서 확인되는 단열대 및 개개의 단열들을 단열망 (DFN) 모델로 분석한 결과를 이용하였다. DFN 모델의 특성상

**Table 1. Initial recharge rate which was obtained from in-situ test in boreholes.**

Borehole	%	Borehole	%	Borehole	%
KB-1	13.95	KB-13	11.19	DB1-5	2.14
KB-2	1.26	KB-14	8.16	DB1-6	2.73
KB-3	10.91	KB-15	11.10	DB1-7	14.15
KB-6	15.27	KB-16-2	15.23	DB1-8	5.48
KB-7	16.18	DB1-1	3.74	DB2-2	14.32
KB-9	9.27	DB1-2	10.59	DB2-3	3.20
KB-10	7.87	DB1-3	7.05	DB2-4	10.75
KB-11	17.94	DB1-4	8.08	DB2-8	7.67

**Table 2. Calibrated recharge rate using the numerical simulation**

Borehole	Initial value ( $\times 10^4$ m/day)	Calibrated value ( $\times 10^4$ m/day)	Borehole	Initial value ( $\times 10^4$ m/day)	Calibrated value ( $\times 10^4$ m/day)
KB-1	4.79	7.2	DB1-1	1.28	0.6
KB-2	4.33	6.5	DB1-2	3.64	1.8
KB-3	3.75	5.6	DB1-3	2.42	3.6
KB-6	5.24	2.6	DB1-4	2.77	1.4
KB-9	3.18	1.6	DB1-5	2.94	4.4
KB-10	2.70	4.1	DB1-6	3.75	5.6
KB-13	3.84	5.8	DB1-7	4.86	7.3
KB-14	2.80	4.2	DB2-2	4.92	7.4
KB-15	3.81	5.7	DB2-3	1.10	0.5
KB-16-2	5.23	2.6	DB2-4	3.69	2.3
			DB2-8	2.63	4



**Fig. 11. Estimated recharge rate and calibrated recharge rate; calibrated values were obtained from numerical calculation**

같은 단열인자로 발생되는 단열망은 수없이 많으나, 총 10회의 단열망을 선정하여 모델링에 사용될 격자의 수리전도도 값을 구하였으며, 각각의 모델 수리전도도 분포를 수치모델에 입력하여 수치 모사를 수행하였다. 그러나 모델을 구성하고 있는 상부 도메인(상부 토양층 및 암반 풍화대)은 다공성 매질의 특성을 보이므로 단열망 모델로 도출된 암반영역의 수리전도도 값을 반영하여 그 수리적인 특성을 해석하는데 많은 오차를 야기한다. 따라서, 단일 값으로 입력된 상부 토양층 및 암반 풍화대에 대한 수리전도도의 값에 대한 교정이 필요하며, 이를 위해 시추공을 기준으로 그 영역을 구분하여 상부 토양층 및 암반 풍화대에 대한 영역별 수리전도도 값을 도출하였다.

모델 교정을 위해 초기 지하수 유동모델에서 사용된 수리전도도는 현장수리시험을 통해 도출된 수리전도도 값에 근거하였으며, 시추공 별로 각 수리전도도 값을 증감시켜 관측공의 지하수위와 모델 수위와의 오차를 줄이는 방향으로 수리전도도를 교정하였

다 (Table 3). 수리전도도에 대한 모델 교정은 시추공에서 관측된 수위를 이용하여 모델에서 도출된 수위와의 최적화 과정을 통해 다시 모델의 인자를 결정하는 방법을 이용하였으며, PEST software (ver. 9.0)을 활용한 trial-and-error 방법을 통해 공간적 수리전도도 분포 특성을 도출하였다 [12, 13].

**사. 지하수 유동 모델링 결과**

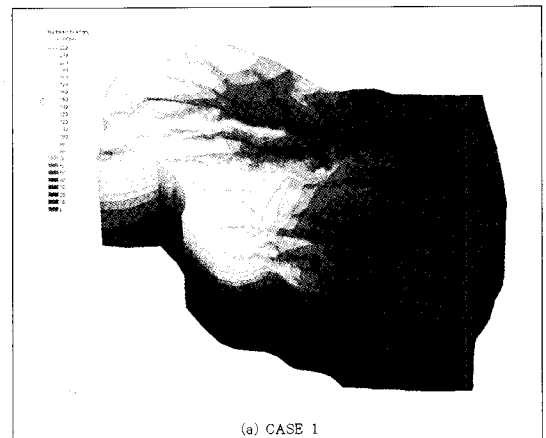
**① 자연 상태 지하수 유동 체계**

- 지하수두 (Hydraulic head) 분포

처분 부지의 정류상 (steady state) 지하수 유동 모

**Table 3. Calibrated hydraulic conductivity of HSD**

	Initial value (m/s)	Model case	Average calibrated value (m/s)		
			Kx	Ky	Kz
HSD 1 (Soil domain)	$4.49 \times 10^{-6}$	CASE 1	$1.15 \times 10^{-6}$	$2.05 \times 10^{-6}$	$6.77 \times 10^{-7}$
		CASE 2	$1.17 \times 10^{-6}$	$2.34 \times 10^{-6}$	$6.87 \times 10^{-7}$
		CASE 3	$1.20 \times 10^{-6}$	$2.54 \times 10^{-6}$	$6.67 \times 10^{-7}$
		CASE 4	$1.21 \times 10^{-6}$	$2.64 \times 10^{-6}$	$6.57 \times 10^{-7}$
		CASE 5	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.20 \times 10^{-6}$	$6.82 \times 10^{-7}$
		CASE 6	$1.21 \times 10^{-6}$	$2.59 \times 10^{-6}$	$6.62 \times 10^{-7}$
		CASE 7	$1.20 \times 10^{-6}$	$2.50 \times 10^{-6}$	$7.10 \times 10^{-7}$
		CASE 8	$1.18 \times 10^{-6}$	$2.28 \times 10^{-6}$	$6.93 \times 10^{-7}$
		CASE 9	$1.12 \times 10^{-6}$	$2.34 \times 10^{-6}$	$6.50 \times 10^{-7}$
		CASE 10	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.46 \times 10^{-6}$	$6.56 \times 10^{-7}$
HSD 2 (Weathering zone)	$2.61 \times 10^{-6}$	CASE 1	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.45 \times 10^{-6}$	$5.93 \times 10^{-7}$
		CASE 2	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.44 \times 10^{-6}$	$6.12 \times 10^{-7}$
		CASE 3	$1.18 \times 10^{-6}$	$2.35 \times 10^{-6}$	$6.43 \times 10^{-7}$
		CASE 4	$1.17 \times 10^{-6}$	$2.25 \times 10^{-6}$	$6.33 \times 10^{-7}$
		CASE 5	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.45 \times 10^{-6}$	$6.02 \times 10^{-7}$
		CASE 6	$1.18 \times 10^{-6}$	$2.30 \times 10^{-6}$	$6.38 \times 10^{-7}$
		CASE 7	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.30 \times 10^{-6}$	$6.40 \times 10^{-7}$
		CASE 8	$1.16 \times 10^{-6}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$6.16 \times 10^{-7}$
		CASE 9	$1.05 \times 10^{-6}$	$2.12 \times 10^{-6}$	$5.80 \times 10^{-7}$
		CASE 10	$1.11 \times 10^{-6}$	$2.21 \times 10^{-6}$	$6.09 \times 10^{-7}$



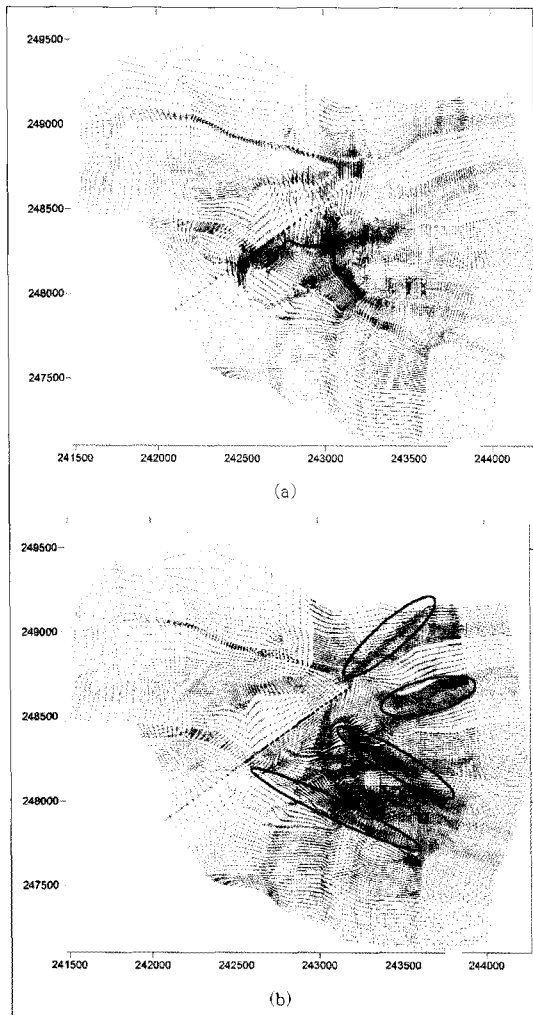
**Fig. 12. 3-dimensional head distribution from numerical simulation (Case 1)**

텔링 결과, 총 10개의 모델링 결과 중 Case 1에 대한 지하수두 분포는 Figure 12와 같다. 총 10개의 모델에서 유사한 지하수두 분포를 나타내었으며, 관측공에서 측정된 지하수위를 잘 반영하였다. 3차원적으로 지하수두 분포는 지형적인 요소에 크게 지배를 받는 것으로 나타났다.

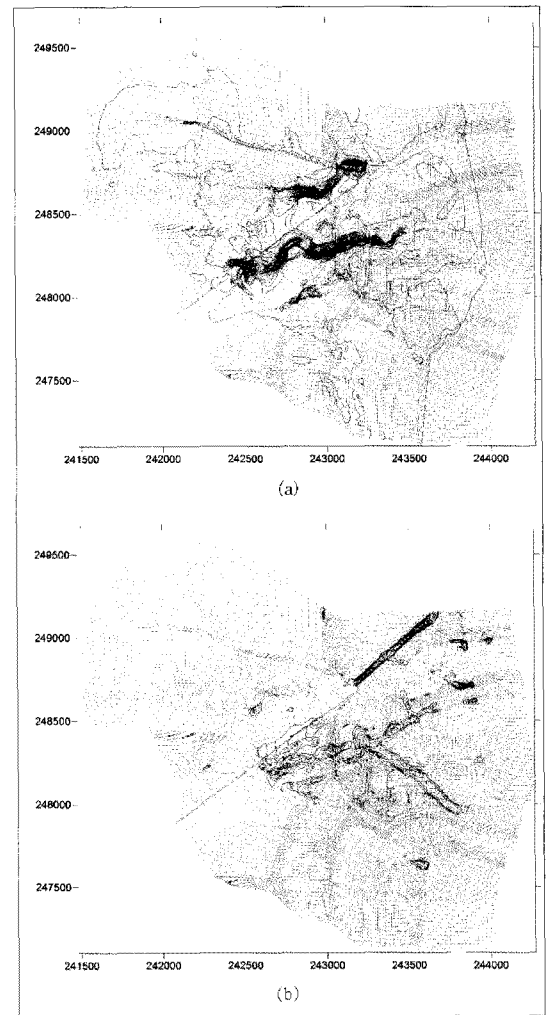
**- 지하수 유동량 (Hydraulic flux)**

처분 부지의 지하수 흐름은 전체적으로 지형적인 특성을 반영하였다 (Figure 13(a); Case 1). 토양층 및 상부 풍화대에서 지하수 흐름은 지하수두 분포에서 확인된 바와 같이 지형적 특성을 반영하여 고지대

에서 저지대로 지하수의 유동이 발생하는 것으로 분석된다. 이는 전체 10개의 모델 결과에서 유사한 양상을 관측할 수 있다. 그러나 처분 심도에서는 심부 영역에 존재하는 투수성이 높은 단열대에 의해 지하수의 흐름이 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다 (Figure 13(b)의 타원표기부분). 이는 지하수 유동량 분포 결과에서도 잘 확인된다. 지표에서의 지하수 유동량은 전체적으로 경계 조건으로 입력된 하천에 의해 크게 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 처분 심도에서 유동량에 대한 등유동량선 (contour)에서 보는 바와 같이 해당 심도에 존재하는 고투수성 단열대의 주



**Fig. 13. Distribution of Darcy velocity from numerical simulation (Case 1) : (a) surface level, (b) repository level (El.-86m)**



**14. Distribution of groundwater flux from numerical simulation (Case 1) : (a) surface level, (b) repository level (El.-86m)**

변 영역에서 큰 지하수의 유동량을 확인할 수 있다 (Figure 14(b)).

② 지하 시설물 건설 후 지하수 유동 체계

처분 부지의 국지 규모 지하수 유동 모델링에 고려되는 지하 시설물은 다음과 같다.

- 국도 31호선 터널
- 처분 시설 건설 · 운영 동굴
- 6개의 사일로

위의 각 지하 시설물의 건설에 따른 지하수 유동 체계 변화를 모사하기 위해 수치 모델에서 각 시설물에 대한 경계 조건을 지하 시설물이 위치하는 해발 고도에 맞추어 제 1경계 조건으로 설정하고, 초기 조건을 자연 상태의 지하수두 분포로 입력한 후 부정류상 지하수 유동 모델링을 수행하였다 (Figure 15).

건설 후 지하수 유동 체계 해석에 대한 기간은 처분 지역의 예상 착공일과 완료일이 2007년 10월부터 2009년 10월까지, 2년 동안의 공사 기간을 갖는 31호선 국도 터널 (나산터널)을 고려하여, 처분 시설의 건설 · 운영 동굴과 사일로의 경우도 같은 일정으로 2년 동안의 부정류 모델링을 수행하였다.

- 지하수두 (Hydraulic head) 분포

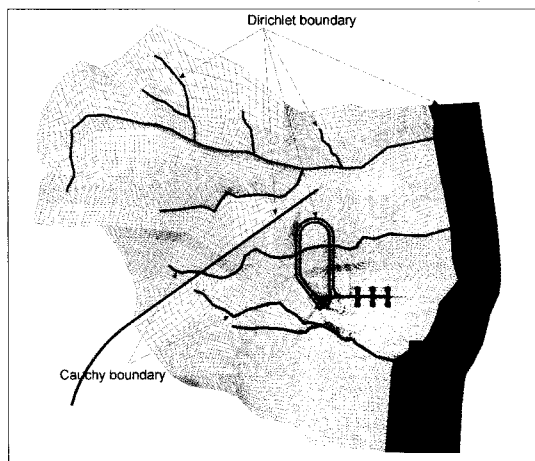
처분 부지 주변의 각 지하 시설물 건설에 따른 부정류상 지하수 유동 모델링을 수행한 결과, 10개의 수치 모델 결과를 평균하면 지하수위 분포는 Figure 16과 같다. 처분 시설 건설 전 지하수위는 25 m에서 60 m

의 지형적인 특성을 반영한 수위 양상을 보였으나, 국도 터널 및 처분 시설 건설에 따라 지하 시설물 주변의 지하수위가 현저하게 강하되고 있는 양상을 확인할 수 있다. 그 수치를 살펴보면 부정류상 수치 모델링 결과 관측공에서 나타나는 수위는 초기 수위에 비해 최대 57.1 m 수위 강하를 나타냈다 (Table 4).

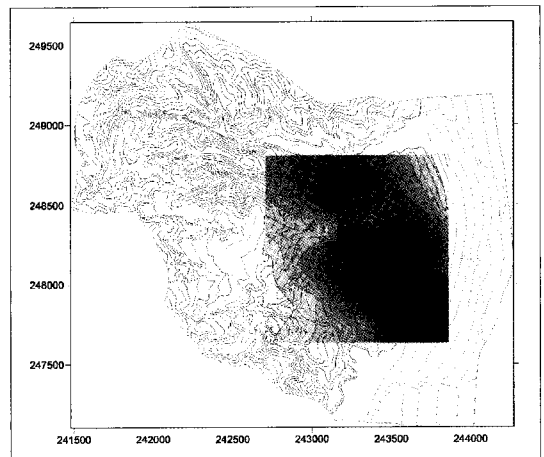
10개의 수치모델 중 Case 1의 모델링에서 도출되

**Table 4. Drawdown of groundwater level related to construction of the underground facilities around Gyeong-Ju LILW site after 2 years ; This result is average value of 10 cases in borehole.**

Borehole	Observed value (EL, m)	Simulated value(initial) (EL, m)	Simulated value(after 2yr) (EL, m)	Drawdown(m)
KB-1	30,6	26,0	-4,9	-30,9
KB-2	56,9	50,6	39,7	-10,9
KB-3	69,5	68,7	64,0	-4,7
KB-6	22,9	26,1	13,9	-12,3
KB-9	19,4	18,7	-38,5	-57,1
KB-10	64,6	49,8	-0,1	-50,0
KB-13	65,8	53,8	28,3	-25,5
KB-14	52,5	51,6	23,2	-28,4
KB-15	103,3	95,7	90,4	-5,3
KB-16-2	100,7	93,9	90,3	-3,6
DB1-1	7,3	8,9	5,7	-3,2
DB1-2	1,4	8,6	5,1	-3,5
DB1-3	37,3	23,6	12,4	-11,2
DB1-4	6,1	6,3	-6,4	-12,7
DB1-5	50,9	40,6	-5,5	-46,0
DB1-6	22,8	23,0	-23,0	-46,0
DB1-7	77,4	60,9	55,0	-5,9
DB2-2	60,4	54,2	23,8	-30,4
DB2-3	10,3	25,7	13,9	-11,7
DB2-4	44,9	51,7	46,6	-5,2
DB2-8	80,1	69,7	58,1	-11,6



**Fig. 15. Numerical boundary condition for the underground facilities related to the Gyeong-Ju LILW repository**



**Fig. 16. Drawdown of groundwater level related to construction of the underground facilities around LILW repository site after 2 years (average value of all 10 cases)**

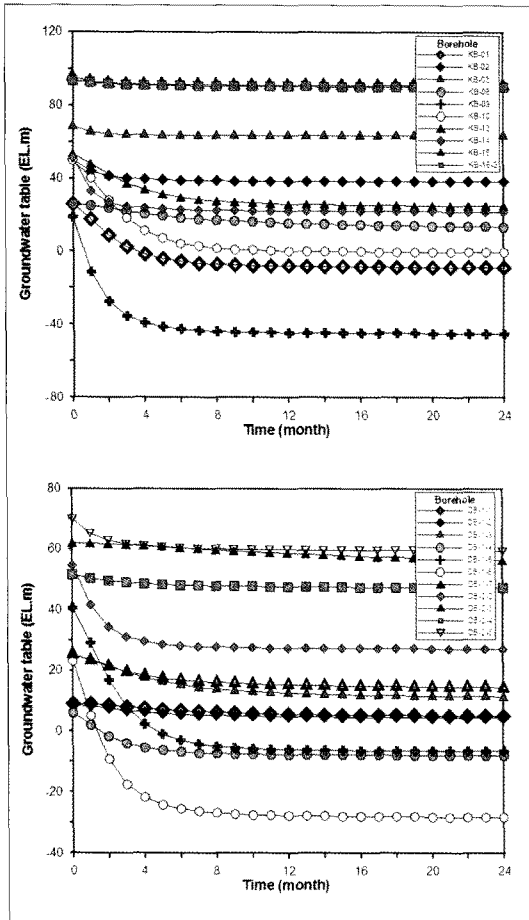


Fig. 17. Drawdown of groundwater level related to construction of the underground facilities with transient state flow simulation (Case 1)

는 관측공의 수위 강하 자료를 이용하여 분석한 결과, 특히 사일로 주변의 관측공에서 수위 강하가 크게 발생함을 확인할 수 있었다 (Figure 17의 KB-9, KB-10, DB1-5, DB1-6, DB2-2). 주목할 것은 사일로 주변의 지하수위가 해수면 이하 (음의 값)로 강하되어 만약 처분 부지 건설 후 시설이 장기간 운영되어 지하수위가 안정화 된다면 부분적으로 해수 유입이 있을 것으로 판단된다. 그러나, 처분 부지의 정확한 운영 이력에 맞는 해수 침입 모델을 수행하여야 보다 정확히 확인할 수 있을 것이다.

- 지하수 유동량 (Groundwater flux)

국도 31호선 터널 및 처분 시설 (건설·운영동굴 및 사일로)이 건설된 후 지하수 단위 유량 (Darcy 속도) 및 유동량 (Q)에 대한 2차원 분포를 도출하였다.

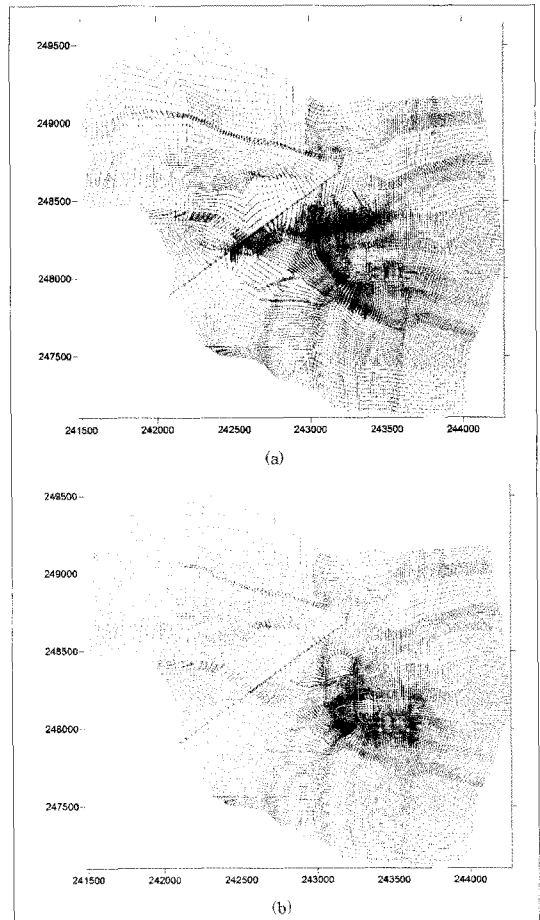


Fig. 18. Velocity vector distribution related to construction of the underground facilities (Case 1) ; (a) surface level, (b) repository level (El.-86m)

토양층에서의 지하수 흐름은 처분 시설 건설 전과 큰 변화 없이 전체적으로 지형적인 특성을 잘 반영하였으며 (Figure 18), 전체 10개의 모델링 결과에서 유사한 양상을 보인다. 반면 처분 심도 영역에서는 건설·운영 동굴 및 사일로 주변의 지하수 유속이 빨라지는 양상을 확인할 수 있다. 또한, 토양층에서의 지하수 유동량은 하천을 따라 큰 유동량을 보이는 것으로 분석되었으며, 처분 심도 영역에서는 건설·운영 동굴 및 사일로 주변 지역에서 지하수 유동량이 큰 값을 보였다. 이는 경계 조건으로 입력된 지하 시설 물에서 주변 지역에 비해 수리수두가 낮기 때문에 수 두 구배가 커짐으로 해서 발생하는 현상이다.

특히, 처분 심도에서 지하수 단위 유량과 유동량을 분석한 결과 해당 영역에 존재하는 투수성이 높은 단열

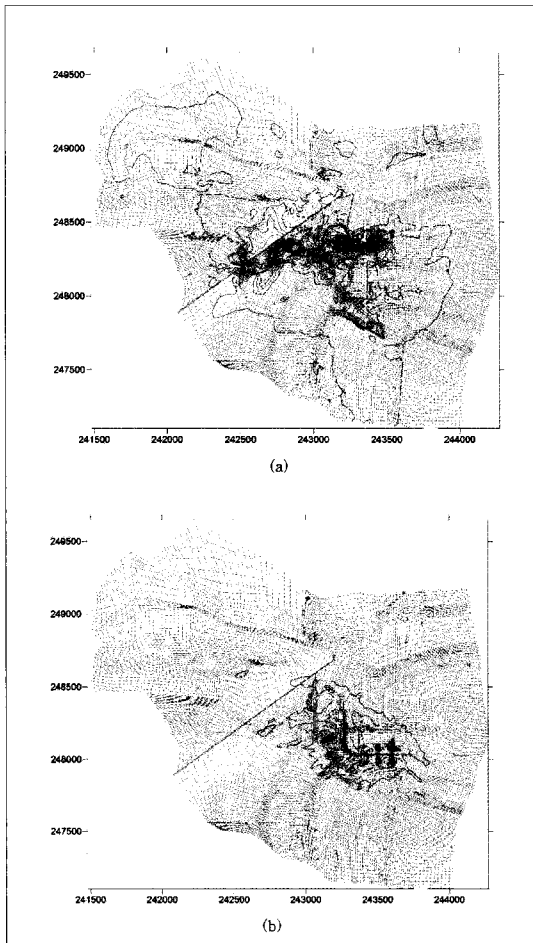


Fig. 19. Groundwater flux distribution related to construction of the underground facilities (Case 1); (a) surface level, (b) repository level (El.-86m)

대에 의해 지하수 유동량 및 지하수 유속이 현저히 영향을 받음을 확인할 수 있었다 (Figure 18, Figure 19).

③ 처분시설 폐쇄 후 지하수 유동체계

건설·운영 동굴 및 사일로를 폐쇄한 후 지하수 유동 체계 변화를 예측하기 위해 부정류상 지하수 유동 모델링을 수행하였으며, 시추공 수위 자료를 기준으로 처분장 폐쇄에 따른 수위회복을 예측하였다. 본 단계의 모델링에서 국도 31호선 도로 터널에 대한 수리경계조건은 유지하는 반면, 건설·운영 동굴 및 사일로에 대한 수리경계조건 (Dirichlet boundary)을 제거하였다. 부정류상 지하수 유동 모델링을 통해 건설·운영 동굴 및 사일로가 폐쇄되었으나, 향후 국도 31호선 도로 터널은 운영되는 상태에서 지하수위가 회복되기까지의 기간을 예측하였다. 부정류상의 모델링 결과로 예측된 지하수위가 회복되는 과정은 Figure 20에 제시하였다. 지하수위의 회복은 건설·운영동굴 및 사일로를 폐쇄한 후 1년 이내에 급속히 회복되며, 대략 2년이 지난 후 국도터널만 건설된 상태의 지하수위로 회복되는 것으로 판단된다.

아. 민감도 분석

① 민감도 분석 인자

일반적으로 수치모델의 민감도 분석은 모델의 입력 자료와 관련하여 어떤 수리지질인자가 주요한 역할을 하는지에 대해 분석하는 것을 목적으로 한다. 본 처분 부지에 대한 국지 규모 지하수 유동 모델링

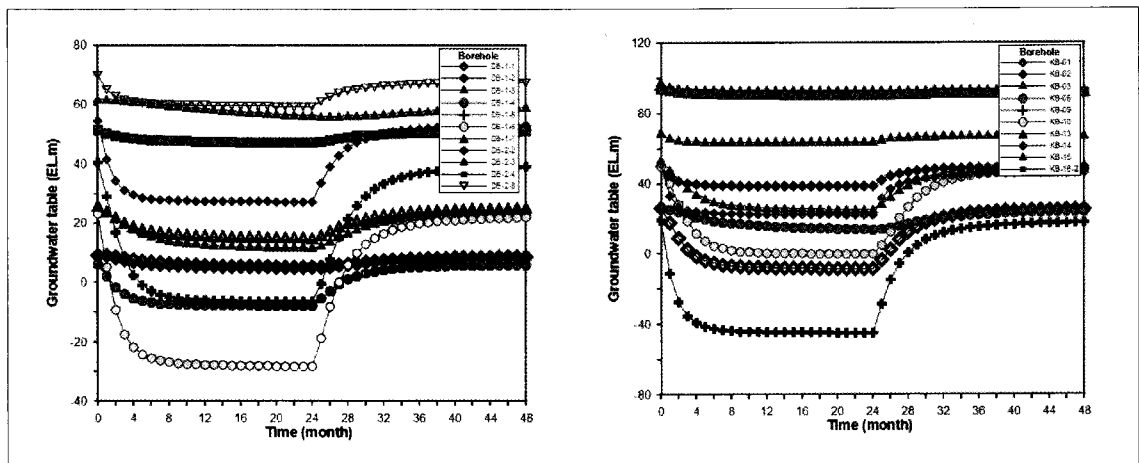


Fig. 20. Recovery of groundwater table after closure of disposal facilities (Case 1)

의 민감도 분석은 안전성 평가에 주요 입력 자료가 되는 사일로를 흐르는 유동량에 초점을 맞추어 수행하였다. 본 민감도 분석은 10가지 Cases 중, Case 2의 경우를 기준으로 하였으며 수리지질인자는 함양률, 수리토양영역의 수리전도도 및 사일로를 둘러싸고 있는 공학적 방벽의 수리전도도로 나누어서 수행하였다 (Table 5). Case 2는 수치 모델링 결과 안전성 평가에 대한 입력 자료로서 처분 시설이 폐쇄된 후 사일로를 흐르는 지하수의 유동량이 다른 Case 들에 비해 비교적 크게 도출되는 모델이다.

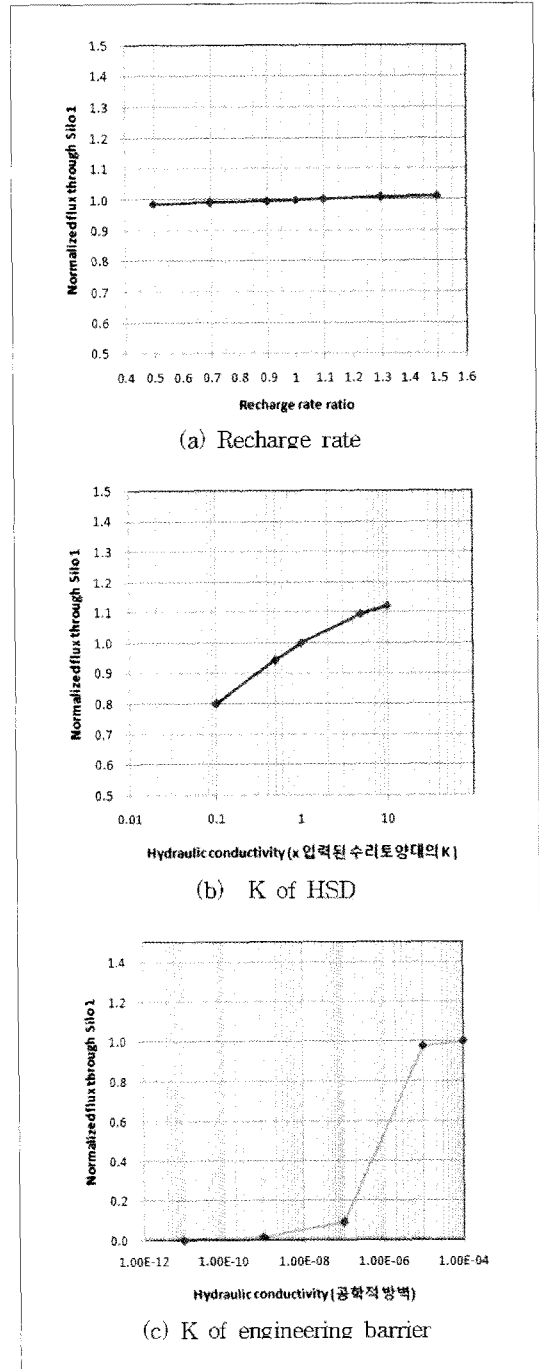
함양률은 국지 규모 지하수 유동 모델링 부지의 지하수두 분포에 주요한 수리지질학적 인자이다. 일반적으로 함양률은 분포하는 식생, 지형의 특성 및 강우량의 강도에 따라 공간적으로 다르게 분포한다. 본 민감도 분석에서는 부지의 수리지질조사 결과 제시된 함양률에서 0.5 ~ 1.5 배의 값을 수치 모델에 입력하여 각각의 적용된 함양률이 사일로를 통과하는 지하수 유동량에 대한 정량적 특성을 확인하였다. 함양률과 함께, 국지 규모 지하수 유동 모델링 부지의 지하수두 분포에 주요한 수리지질학적 인자의 하나로 수리토양영역의 수리전도도가 있다. 현장 조사 결과 도출된 수리토양영역의 수리전도도는 일부 국한된 시추공에서 도출된 결과를 이용하여 제시하였기 때문에, 이에 대한 민감도 분석을 실시하여 만약 수리토양영역의 수리전도도가 안전성 평가에 입력될 인자에 민감할 경우, 향후 수행될 건설 중현장 조사에 대한 새로운 방향을 제시할 수도 있다.

공학적 방벽은 방사성폐기물 처분장으로부터 핵중누출의 억제(containment)를 목적으로 하며, 본 과업에서는 콘크리트 방벽을 고려하고 있다. 이 콘크리트 방벽의 주요한 특성 중 하나는 시간이 지남에 따라 열화를 수반하여, 일정 시간이 경과된 후 방벽으로서의 역할을 잃게 되는데, 본 민감도 분석에서는 콘크리트 방벽의 수리전도도를 콘크리트가 건전한 상태

에서 최종 열화된 상태까지 수치적으로 변화하여 사일로를 통과하는 지하수 유동량에 대한 정량적 특성을 확인하였다.

**Table 5. The range of input parameters for the sensitivity analysis**

Input parameter	Range
Recharge rate	Input recharge rate × (0.5 ~ 1.5)
K of HSD	Input K of HSD × (1 × 10 <sup>-11</sup> ~ 1 × 10 <sup>0</sup> m/s)
K of engineering barrier	K of engineering barrier = 1 × 10 <sup>-11</sup> tu/s ~ 1 × 10 <sup>-4</sup> tu/s



**Fig. 21. Results of sensitivity analysis on input parameters**

**② 민감도 분석 결과**

지하수 유동 모델의 수리지질인자에 대한 민감도 분석 결과는 Figure 21과 같다. 함양률에 대한 민감도 분석결과, Case 2에 입력되는 모델의 함양률 보다 50% 작게 입력했을 때, 사일로 1을 흐르는 유량은 기준유량에 비해 98.7%의 유량이 흐르며 함양률의 변화에 따라 선형으로 바뀌는 양상을 확인할 수 있었다.

수리토양영역의 수리전도도에 대한 사일로를 흐르는 지하수의 민감도는 80% ~ 110%의 범위를 갖고 변한다. 특이한 사항은 입력된 수리전도도에 비해 큰 수리전도도가 입력되는 것에 비해 적은 수리전도도가 입력될 때, 지하수의 유동량에 대한 변화가 큼을 알 수 있다. 또한, 함양률에 비해 상대적으로 큰 민감도를 보여 향후 수리지질조사에서 이에 대한 정확함 값의 도출이 필요하다고 판단된다.

처분 사일로를 둘러싸고 있는 공학적 방벽의 수리전도도에 대한 민감도 분석 결과를 공학적 방벽이 열화된 상태를 기준으로 해서 정규화 하여 도시한 결과, 수리전도도가  $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-5}$  m/sec 사이에서 사일로를 지나는 지하수의 유동량이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 주변 암반의 수리전도도보다 클 경우 암반을 통과하는 지하수가 유입되고, 암반 수리전도도 보다 작을 경우 방벽의 수리전도도 만큼의 지하수가 유입되기 때문으로 판단된다.

요약하면, 일반적으로 지하수 유동과 관련하여 매질의 함양률은 모델 영역의 지하수위에 민감하며, 지하수위를 결정하는 주요 인자가 된다. 그러나, 처분 부지에 대한 지하수 유동 모델링에서의 주요 도출 인자인 지하수 유동량에 초점을 맞출 경우, 함양률에 대한 입력 자료로서의 중요성은 수리토양영역 혹은 주변 암반의 수리전도도에 비해 현저히 감소되는 것으로 분석되었다. 따라서, 본 모델링의 민감도 분석 결과, 사일로 주변의 암반영역에 대한 수리전도도가 가장 민감한 인자로 되며, 지하수 유동량 분석에 있어서는 사일로 주변의 수리전도도를 주요한 입력 인자로 고려할 수 있다.

**Ⅶ. 결 론**

경주 중·저준위 방사성폐기물 처분 부지의 부지

특성조사 결과를 이용하여 지하수 유동 모델링을 수행하였다. 지하수 유동 모델링은 광역 규모와 국지 규모로 나누어서 수행하였으며, 광역 규모의 모델링은 국지 규모에 대한 경계를 결정하기 위해 수행하였으며, 국지 규모의 모델링은 처분 부지에 대한 지하수 유동의 이해와 처분장 건설에 따른 지하수 유동 체계의 변화를 종합 분석하기 위해 수행하였다. 본 논문의 국지 규모 지하수 유동 모델링에서 고려된 수리지질요소는 수리토양영역, 투수성구조영역, 수리암반영역이 있으며 투수성구조영역 및 수리암반영역에 대한 수리전도도는 분리 단열망 (Discrete Fracture Network; DFN) 모델을 이용하여 도출된 결과를 모델 영역에 반영한 Hybrid-EPM 접근 방법을 이용하였다. 따라서, 총 10개의 다른 단열망을 대표하는 지하수 유동 모델링을 수행한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 광역 규모 지하수 수치 모의 결과의 지하수두 및 지하수속도 분포 특성을 이용하여 처분 부지를 포함하는 영역에서 무유량경계 (no flow boundary)를 구하여 국지 규모의 지하수 유동 모델의 경계로 설정하였다.

- 국지 규모의 지하수 유동 모델링 결과, 처분 부지의 정류상 (steady state) 지하수 유동 모델링 결과, 지하수두 및 지하수 흐름은 지표 근처에서 지형적인 요소에 크게 지배를 받는 것으로 나타나며, 심부 영역에서는 주변에 존재하는 고투수성 단열대에 의해 영향을 받음을 확인할 수 있었다.

- 중·저준위 방사성폐기물 처분 시설과 관련하여 지하에 국도 31호선 터널, 건설/운영 동굴 및 6개의 사일로가 건설되며, 각 시설의 건설에 따른 지하수 유동 체계 변화를 모사 결과, 사일로 주변 지역에서 수위 강하가 크게 발생하는 것으로 분석된다. 특히 사일로 주변의 지하수위가 해수면 이하 (음의 값)로 강하된 결과가 도출되었다.

- 처분 시설 건설 중 지하수의 유동량은 지하 시설물이 위치할 영역에서 현저히 증가하게 되며, 지하수 유속 또한 빨라지는 양상을 확인할 수 있다. 처분 심도에서는 주변에 존재하는 고투수성 단열대에 의해 지하수 유동량이 상당한 영향을 받음을 확인할 수 있



었다.

- 건설/운영동굴 및 사일로를 폐쇄한 후 지하수 유동 체계 회복은 건설/운영동굴 및 사일로를 폐쇄한 후 1년 이내에 급속히 회복되며, 대략 2년이 지난 후 국도터널만 건설된 상태의 지하수위로 회복되는 것으로 판단된다.

- 수치 모델의 민감도 분석 결과, 국지 규모의 지하수 유동 모델링에서 주요 도출인자인 지하수 유동량에 초점을 맞출 경우, 사일로 주변의 암반영역에 대한 수리전도도가 가장 민감한 인자로 분석되었다.

### 감사의 글

이 논문은 중·저준위처분장 부지특성조사의 일환으로 수행되었으며 일부 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업과제의 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] Molinero, J., Samper, J., "Large-scale modeling of reactive solute transport in fracture zones of granitic bedrocks," *Journal of contaminant hydrology*, 82(3/4) pp.293-318(2006).
- [2] Shirai, M., Chiba, R., Fomin, S., Chugunov, V., Takahashi, T., Niibori, Y., Hashida, T., "Numerical Model of Fluid Flow through Heterogeneous Rock for High Level Radioactive Waste Disposal," *Water dynamics*, pp.57-62(2007).
- [3] Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, pp.569(1979).
- [4] Tiren, S.A., Askling, P., Wanstedt, S., "Geologic site characterization for deep nuclear waste disposal in fractured rock based on 3D data visualization," *Engineering geology*, 52(3/4), pp.319-346(2003).
- [5] Backblom, G., "The Aspo Hard Rock Laboratory—a step toward the Swedish final repository for high-level radioactive waste," *Tunnelling and underground space technology*, 6(4) ,pp.463-467(1991).
- [6] John B. and, David H., Äpsö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes(Review of Task 6C), R-05-33, Svensk Kärnbränslehantering AB(2005).
- [7] Dershowitz B, Klise K, Evaluation of fracture network transport pathways and processes using the Channel Network approach, SKB IPR-02-34, Svensk Kärnbränslehantering AB(2002).
- [8] Dershowitz B, Winberg A, Hermansson J, Byegard J, Tullborg E-L, Andersson P, Mazurek M, Äpsö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes, Task 6C, A semi-synthetic model of block scale conductive structures at the Äpsö HRL, SKB Report IPR-03-13, Svensk Kärnbränslehantering AB(2003).
- [9] Hodgkinson D.P., Black J.H., Äpsö Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes: Review of Tasks 6A, 6B and 6B2, Quintessa Report, QRS-1178B-1, Version 1.0(2005).
- [10] JNC TN, Development and management of the technical knowledge base for the geological disposal of HLW-H17 report, Japan Nuclear Cycle Development Institute(2005).
- [11] Diersch, H.-J.G., Schatzl, P., Grundler, R., and Clausnitzer, V., FEFLOW 5.2: Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, User's Guide, WASY GmbH(2005).
- [12] Doherty, J., Brebber, L. and Whyte, P.,

- PEST-model independent parameter estimation, User's Manual, Watermark Computing, Corinda, Australia(1994).
- [13] Doherty, J., Model-Independent Parameter Estimation(PEST) User's Manual 5th Edition, Watermark Numerical Computing (2004).
- [14] 정현영, 송무영, 이경주, "지하 석유비축기지 주변의 지하수 개발에 의한 수리지질학적 영향의 수치해석 연구," 지질공학회지, 11(1), pp.37-53(2001).
- [15] 조성일, 김천수, 김경수, 송무영, 전한석, "지하공동굴착 시 수리지질조사 자료를 이용한 저장공동 심도의 지하수체계 연구," 지질공학회지, 14(1), pp.93-104(2004).
- [16] 한국수력원자력주식회사, 중·저준위 폐기물 처분시설 안전성평가보고서(2007).