

## Hydrogeological characteristics of the LILW disposal site

### 처분부지의 수리지질 특성

**Kyung-Su Kim<sup>1)</sup>**, Chun-Soo Kim, Dae-Seok Bae, Sung-Hoon Ji and Si-Tae Yoon\*

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

\*Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd., Youngdongdaero 411, Kangnam-gu, Seoul

김경수<sup>1)</sup>, 김천수, 배대석, 지성훈, 윤시태\*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045번지

\*한국수력원자력(주), 서울특별시 강남구 영동대로 411번지

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

#### Abstract

Korea Hydro and Nuclear Power Company (KHNP) conducted site investigations for a low and intermediate-level nuclear waste repository in the Gyeongju site. The site characterization work constitutes a description of the site, its regional setting and the current state of the geosphere and biosphere. The main objectives of hydrogeological investigation aimed to understand the hydrogeological setting and conditions of the site, and to provide the input parameters for safety evaluation. The hydrogeological characterization of the site was performed from the results of surface based investigations, i.e geological mapping and analysis, drilling works and hydraulic testing, and geophysical survey and interpretation. The hydro-structural model based on the hydrogeological characterization consists of one-Hydraulic Soil Domain, three-Hydraulic Rock Domains and five-Hydraulic Conductor Domains. The hydrogeological framework and the hydraulic values provided for each hydraulic unit over a relevant scale were used as the baseline for the conceptualization and interpretation of flow modeling. The current hydrogeological characteristics based on the surface based investigation include some uncertainties resulted from the basic assumption of investigation methods and field data. Therefore, the reassessment of hydro-structure model and hydraulic properties based on the field data obtained during the construction is necessitated for a final hydrogeological characterization.

---

**Key words** : LILW disposal site, Hydrogeological characteristics, hydro-structural model, hydraulic parameter

---

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

## 요 약

중·저준위방사성폐기물 처분부지에 대한 건설 및 운영 인허가 취득을 위한 종합적인 부지 특성조사가 사업자인 한국수력원자력(주)의 책임 하에 이루어졌으며, 수리지질조사는 부지의 수리지질학적 특성 해석과 방사선적 안전성 평가를 위한 기초자료 생산을 목적으로 수행되었다. 처분부지의 수리지질특성은 주로 지표에서 이루어진 지질조사, 시추조사, 각종 수리시험 및 지구물리탐사 자료를 종합적으로 분석하여 수리지질체계의 특성을 평가하고, 이를 토대로 수리도양영역, 3 개의 수리암반영역 및 5 개의 투수성구조영역으로 구성되는 수리-구조모형을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 수리-구조모형과 수리인자는 지하수유동 모델 해석 업무에 직접 이용되었다. 본 논문의 결과는 지표조사단계에서 얻어진 자료에 근거한 것이므로 수리지질특성과 관련된 제반 조사방법에 가정과 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 현재 진행 중인 지하시설 건설 과정에 취득되는 직접적인 수리지질특성 관련 자료를 종합적으로 재 해석함으로써 부지 특성조사 단계에서의 가정과 불확실성을 저감시킬 수 있고, 최종적인 수리-구조모형의 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

**중심단어** : 중·저준위방사성폐기물 처분부지, 수리지질특성, 수리-구조모형, 수리인자

## I. 서론

처분부지에 대한 수리지질 조사의 목적은 부지 주변의 지하수 분포와 유동상태에 대한 특성을 분석하여 부지의 수리지질학적 특성 해석 및 방사선적 안전성 평가를 위한 기초자료를 생산하는 것이다. 초기에 국제적으로 제시되었던 처분시설의 부지선정기준은 천연방벽의 기능으로서 주로 모암의 특성만을 강조하였고, 주변지역의 지질조건에 따른 지하수유동특성은 심도 있게 다루어지지 않았다. 근래에 제시되는 부지선정기준은 핵종이동의 가능성에 초점을 맞추어 지질구조와 지하수유동체계를 고려하는 처분시설 주변 지질환경의 중요성을 강조하고 있다.

본 논문에서는 처분부지에서 수행된 지표지질조사, 시추조사, 각종 수리시험 및 지구물리탐사 자료를 종합적으로 분석하여 수리지질체계의 특성을 제시하였으며, 현장에서 수행된 수리시험을 근거로 수리인자를 도출하였다. 처분부지에서 수행된 조사 범위는 부지 중심 10 km 지역의 포함하나 본 논문에서는 실제적으로 지하수유동 모델 해석과 안전성 평가가 이루어진 국지규모의 지하수체계특성을 제시하였다.

## II. 수리지질특성

### 가. 지하수계 경계

광역규모의 지하수계는 시설 입지에 의한 지하수계의 변화가 독립적으로 이루어지는 영역까지를 포함하며, 국지규모 지하수계는 처분시설에 직접적으로 수리적 영향을 미치는 지역으로 설정된다. 이는 우선적으로 지형특성과 지질구조 분포를 고려하기 때문에 부지특성에 따라 지하수계의 면적이 달라진다. 본 지역에서는 광역규모 지하수체계 내에 발달하는 큰 규모의 투수성구조가 인지되지 않아 지형적인 특성을 우선적인 조건으로 고려하였다. 본 지역의 지형은 잔구성 산체가 부지 북측의 대종천과 남측의 나산천을 경계로 독립적인 지하수계를 형성하는 특성으로 처분시설 예상위치는 해안저지대에 속한다 (Fig. 1). 광역지하수계 내에서 남북방향으로 발달한 산릉선(EL. 200~233 m)과 이로부터 분기되는 산릉선들은 지하수 분수령으로 무 유동(no flow) 조건을 형성하기때문에 이를 수리경계로 하면, 이 지역의 국지지하수체계는 광역규모의 지하수유동체계로부터 수리적으로 영향을 받지 않는 조건을 갖고 있다.

국지 지하수유동체계의 수리경계는 동해안에 인접하여 발달한 소규모의 지표수 유역을 이루고 있으며, 독립적인 잔구성산지의 산릉선으로 구성되어 지형적으로 수리경계가 뚜렷하게 구분된다. 지하수의 유동 방향은 지표수 유동과 같이 처분시설 서쪽의 산릉선으로부터 동해안으로 형성되고 있다.

**나. 지형, 지질 및 지질구조**

처분부지의 고도분포는 EL. 50 m 이하가 26.3 %, EL. 50~100 m가 28.0 %, EL. 100~150 m는 25.1 %, EL. 150~225 m는 20.6%로 구릉성산지에 해당한다. 지형의 경사도는 20° 미만의 완만한 구릉지가 전체 면적의 46.9 %를 차지하고 20~40°의 다소 험한 산지는 50.7 %, 40° 이상의 급한 비탈면은 2.4 % 내외이다.

처분부지의 반경 1 km 지역에 분포하는 암반매질은 서쪽 지역에 백악기의 퇴적암을 장식반암이 관입하였고, 부지 내에는 제 3기의 화강암류가 관입하였다. 본 지역의 지표층은 계곡을 따라 발달한 하상퇴적물과 풍화대 구성물이 대부분이며 단구퇴적층은 사질 및 사력질(수 mm~수 cm 내외) 퇴적층으로서 소규모로 분포하고, 충적층은 작은 하천을 따라서 미약하게 발달하며 해변을 따라서는 현생의 사질, 사력질, 역질의 퇴적물들이 분포하고 있다.

처분시설부지 주변은 심한 구조적 운동은 받지 않은 것으로 해석하는 반면, 제 3기 이후의 지구조 운동의 영향으로 발생한 취성 단열군들과 이에 따른 파

쇄대의 발달이 보고되고 있다. 국지규모의 부지에 발달하는 단층은 북쪽과 남쪽 경계부에 위치하는 동-서향의 주향을 가지는 단층이며, 시추조사와 지표물리탐사에서 추정되는 큰 규모의 단층대는 2~3개조가 발달하고 있다. 또한 부지 내에 발달하고 있는 소규모 단열대는 지표 뿐만 아니라 시추공에서도 인지되고 있다. 국지규모의 지하수유동체계는 특히 투수성 지질구조의 분포에 의해 지배를 받게 되므로 단층대와 파쇄대는 결정론적으로 해석할 수 있는 규모와 통계학적으로 분석할 수 있는 규모로 분류하여 수리구조모델에서 이들의 분포특성을 논하였다.

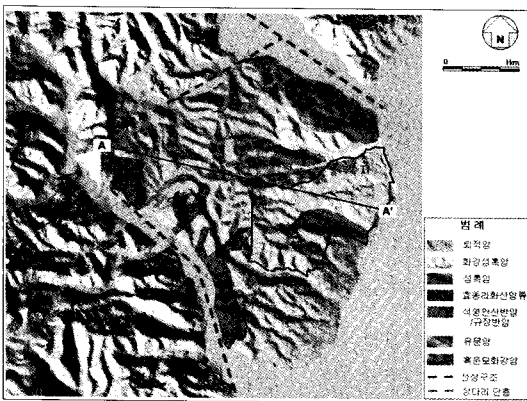
**다. 지하수 함양과 배수 특성**

국지지하수계의 지하수 함양지역은 서부와 남부의 산릉선이 주요 함양지역이며, 북부와 중앙부에 분포하는 산체를 함양지역으로 고려할 수 있다. 함양지역에서 유입된 지하수의 기저유출은 남쪽과 북쪽의 나산천과 대종천으로 이루어지며, 소규모 계곡이나 하천으로 배출되거나 해안으로 배출되는 것으로 평가하였다. 이때 동해안 경계에서의 해수와 접이대는 일반적으로 수두경사가 높은 지역에서 깊게 형성되고 경사가 완만한 지역에서는 낮게 형성된다 [1].

지하수 함양률 산정 방법 중의 하나인 비산출률은 처분시설이 위치하게 될 포화대 매질 조건인 암반대수층에서 시행한 수리간섭시험의 결과로부터 산정되었다. 산정된 비산출률 중 일반적인 자유면대수층의 범위인 0.01~0.3 내에 해당하는 값들을 대상으로 검토한 결과 PW-1 영역은 0.125, PW-2 영역은 0.072, PW-3 영역은 0.165를 각 영역별 비산출률로 결정하였다. 함양률은 이들 비산출률값을 각 영역내 시추공에 직접 적용하여 산출하였으며 그 범위는 최소 6.5%/년에서 최대 57%/년으로 큰 차이를 보였다.

**라. 지하수위 분포특성**

처분부지의 자연상태 지하수위는 다음과 같은 지형적인 요소에 지배되고 있다. 부지의 서쪽고지대는 EL. 100 m (지표 하 0~10 m) 이상의 높은 지하수위가 계속되었으며 가장 낮은 지하수위는 해안가에서 EL. 0.1~4 m(지표 하 4~9 m)로 계속되었다. 중지



**Fig. 1. Regional-scale hydrologic boundary based on the topographical feature.**

대의 지하수위는 남부에서 약 EL. 80 m, 중앙부는 약 EL. 70~75 m, 북부는 약 EL. 63~65 m로 계속되며, 모두 지표 하 10~15 m 하부에 수위를 형성하고 있다. 본 지역의 지하수위는 일부 지역을 제외하고는 지표 하 5~15 m에 형성되는 것이 일반적인 특성이 다 (Fig. 2).

건조주기의 서쪽 고지대의 지하수위는 지표 하 2~10 m, 북쪽의 중지대는 12~15 m, 그리고 부지 중앙부에서는 14~35 m로 상대적으로 낮은 지하수위를 나타냈다. 일부 지역을 제외하고는 지하수위가 10 월 이후에 하강하며, 장마철의 수위 상승은 1~3 m 이나 일부 시추공에서는 4~10 m의 다소 높은 수위 상승을 보인다. 조석(earth tide)의 영향에 의한 지하수위 변화는 서쪽의 고지대 조사공의 지하수위까지 영향을 보인다. 해수(sea tide)에 의한 영향은 해안가 일부에서만 관측되고, 대부분은 조석에 의한 영향으로 해석된다. 이 중 뚜렷한 변화를 보이는 평균지하수위 폭은 0.024~0.053 m의 범위를 가지며, 이러한 변화는 기저지하수위 변화에는 영향을 끼치지 않으나 해수면과 같이 반복적인 진동을 한다.

**마. 해수침투현상**

자연수와 많은 차이를 보여주는 전기전도도값으로 해수침투 여부를 조사한 결과, 부지 북동쪽 경계부에 위치한 DB1-1 시추공에서 지표 하 100 m에서 전기전도도가 800~1,600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 120 m에서는 1,600~

2,400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  로 점진적으로 증가한다. 이 시추공에서는 지표 하 100 m 상부와 130 m 하부에서 단열대가 교차하였다. DB1-2 시추공에서는 190 m 심도에서 16,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 매우 급격하게 증가하고 있으며, 이는 단열대구간과 일치하고 있다. 따라서 이 지역의 해수침투는 단열대가 발달하는 구간에 한정되는 것으로 해석된다.

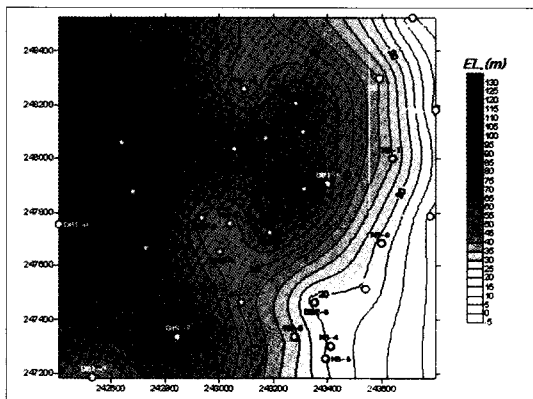
**Ⅲ. 수리-구조모델**

수리-구조모델의 기하학적 골격은 지질조사에서 나타나는 큰 규모의 단열대나 파쇄대로 구성된 투수성구조영역으로서 수리지질 해석에 중요한 기본 틀이 되고 있으며, 암반영역은 큰 규모 단열대 간의 암반 매질로 구성된다. 작은 규모의 단열대나 파쇄대는 조사과정에서 정확하게 정의하기가 어려워 통계적으로 분석하여 암반영역의 수리특성으로 해석하게 된다. 따라서 처분부지의 지하수체계는 투수성구조영역 (Hydraulic Conductor Domain: HCD)과 이들 사이에 분포하는 암반영역 (Hydraulic Rock Domain: HRD)으로 분류하였고, HRD와 HCD의 기하학적 분포는 지질-구조모델 자료에 근거하였다. 지표부근에 분포하는 토질과 상부구간의 수리특성은 수리토양영역 (Hydraulic Soil Domain: HSD)으로 대표하였다. 수리-구조모델 구축에 사용한 각 수리영역의 분류개념과 접근방법은 스웨덴 SKB의 Site Descriptive Model [2]의 형식을 중심으로 하였다.

**가. 투수성구조영역**

**① HCD 정의**

투수성구조영역은 결정론적으로 해석할 수 있는 큰 규모 단열대 (Deterministic Fracture Zone: DFZ) 들로 구성되며, 지하수유동체계의 경계를 형성하고 있는 지질구조를 포함하게 된다. HCD의 수리학적 폭(hydraulic thickness)은 일반적으로 시추공에서 인지되는 특정구간의 암반특성으로 결정하였으며, 단열대의 기하학적 분포에 대한 불확실성은 수리-구조모델에 대한 불확실성으로 취급한다. 단열대에 대한 평균적인 수리인자는 수리시험결과에서 산출하였



**Fig. 2. Groundwater table of the LILW site. The groundwater level was automatically measured from boreholes plotted as circle.**

으며, 수리시험이 수행되지 않은 경우, 주변 단열대의 수리특성이나 일반적인 수리인자를 사용하였다.

처분부지에서 투수성구조영역으로 분류되는 수리영역은 지질-구조모델에서 제시된 큰 규모의 단열대(Z21~Z32)로 대표된다 (Fig. 3). 이들 단열대들은 제한된 지역의 지표조사와 시추공에서 확인되며, 광역규모의 단열대는 없고 국지규모의 단열대들로 해석하고 있다. DFZ의 선정은 지질-구조모델에서 제시하는 자료를 바탕으로 하였으며, 수리특성은 DFZ와 교차하는 시추공의 초음파주사검층 (BHTV) 이미지 자료에서 같은 방향성을 갖는 단열대 구간을 선정하여 이 구간의 수리시험자료를 활용하였다.

② 수리특성

HCD를 구성하는 DFZ의 수리특성은 Table 1에 요약하여 제시하였으며 각 DFZ의 투수량계수는 심도에 따른 변화는 고려하지 않았고 단일투수성으로 해

석하였다. 정압시험결과로 도출된 투수량계수는 10<sup>-6</sup>~10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>/s, 양수시험 관측공(PW1-1)에서 수행된 순간수위강하시험은 10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, 양수시험에서 산출된 결과는 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s 의 범위를 갖는다. 양수시험에서 도출된 투수량계수는 다소 높은 경향을 보이고 있으나 양수시험 지역의 특수성과 시험방법 및 정압주입시험자료를 고려하여 실제계측치보다 낮게 평가하였다. 지하수유동모델에서는 이를 고려하여 투수성구조의 수리전도도를 1.0 × 10<sup>-7</sup> m/s로 설정하였으며, 투수량계수는 HCD의 수리 폭인 10~15 m를 곱한 값을 사용하였다. 본 지역의 HCD의 투수성은 HRD보다 2~2.5배의 높은 투수성을 보이고 있으나, 이는 일반적으로 예측되는 국내 화강암지역의 HCD와 HRD의 투수성 차이인 2~3 order 보다는 매우 적은 차이를 나타내고 있다. 이러한 특성은 본 지역의 HRD의 투수성이 높게 평가된 것으로, 이에 대한 정밀한 특성은 건설 중에 밝혀져야 할 것이다.

공극률과 저유계수는 SKB에서 제시한 관계식(3, 4)을 이용하여 저유계수(S), 유동로의 간극(et)과 유동공극률(nw)을 분석하였다. 현장에서 계측된 저유계수는 누수대수층의 특성이 있어 SKB 관계식으로 구한 값과 직접적으로 비교하기가 어렵다. 관계식으로 구한 값은 Z22의 피압대수층의 경우, 한 order 내의 차이를 보이고 있으며 보다 안정적인 값을 나타낸다. 따라서 현장계측 값이 없는 지역의 저유계수는 계산식으로 구한 수치를 사용하여도 문제가 없는 것으로 판단되나, 본 지역의 저유계수는 지질특성을 고려하여 계산식으로 구한 수치보다 한 order 높게 평가하

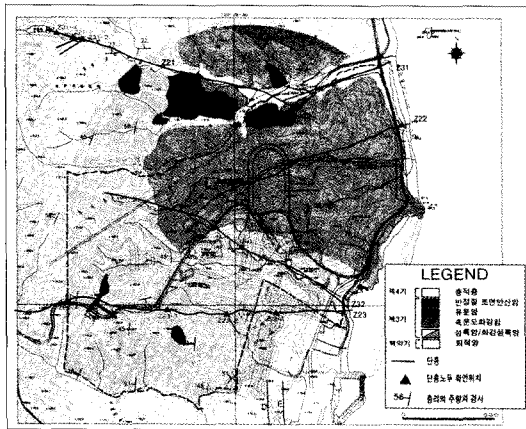


Fig. 3. Map of deterministic fracture zones.

Table 1. Hydraulic properties of hydraulic conductor domain.

| HCD | K(m/s)                                       | Hydraulic Thickness(m) | T (m <sup>2</sup> /s)                        | S                         |  | ne<br>0.5T <sup>0.5</sup>                    | Test method* |
|-----|--|------------------------|--|---------------------------|--|--|--------------|
|     |  |                        |  | Measured                  | 7E-4(T0.5)                                 |  |              |
| Z21 | 3.9x10 <sup>-7</sup>                         | 17.1                   | 6.67x10 <sup>-6</sup>                        | -                         | 1.8x10 <sup>-6</sup>                       | 1.29x10 <sup>-3</sup>                        | CHT          |
|     | 4.8x10 <sup>-7</sup>                         | 12.7                   | 6.10x10 <sup>-6</sup>                        | -                         | 1.7x10 <sup>-6</sup>                       | 1.23x10 <sup>-3</sup>                        | CHT          |
| Z22 | 8.6x10 <sup>-8</sup>                         | 19                     | 1.63x10 <sup>-6</sup>                        | -                         | 8.9x10 <sup>-7</sup>                       | 6.38x10 <sup>-4</sup>                        | CHT          |
|     | 6.0x10 <sup>-7</sup>                         | 2                      | 1.20x10 <sup>-6</sup>                        | -                         | 7.7x10 <sup>-7</sup>                       | 5.48x10 <sup>-4</sup>                        | CHT          |
|     | 1.23x10 <sup>-5</sup> ~1.86x10 <sup>-7</sup> | 6~37                   | 7.38x10 <sup>-5</sup> ~2.59x10 <sup>-6</sup> | 0.51~5.3x10 <sup>-7</sup> | 6.0x10 <sup>-6</sup> ~1.1x10 <sup>-6</sup> | -  | ST           |
|     | 1.2x10 <sup>-6</sup> ~4.85x10 <sup>-7</sup>  | 88.0~108.5             | 1.5x10 <sup>-4</sup> ~8.9x10 <sup>-5</sup>   | -                         | 1.2x10 <sup>-5</sup> ~6.6x10 <sup>-6</sup> | 8.66x10 <sup>-3</sup> ~4.72x10 <sup>-3</sup> | PT           |
| Z23 | 3.8x10 <sup>-9</sup>                         | 15                     | 5.70x10 <sup>-8</sup>                        | -                         | 1.7x10 <sup>-7</sup>                       | 1.19x10 <sup>-4</sup>                        | GHT          |
| Z31 | 5.9x10 <sup>-8</sup>                         | 16                     | 9.44x10 <sup>-7</sup>                        | -                         | 6.8x10 <sup>-7</sup>                       | 4.86x10 <sup>-4</sup>                        | CHT          |
|     | 3.9x10 <sup>-7</sup>                         | 19                     | 7.41x10 <sup>-6</sup>                        | -                         | 1.9x10 <sup>-6</sup>                       | 1.36x10 <sup>-3</sup>                        |              |
|     | 1.5x10 <sup>-7</sup>                         | 16                     | 2.40x10 <sup>-6</sup>                        | 7.2x10 <sup>-2</sup>      | 1.1x10 <sup>-6</sup>                       | 7.75x10 <sup>-4</sup>                        |              |
| Z32 | 1.4x10 <sup>-6</sup> ~5.0x10 <sup>-7</sup>   | 4.5~5.5                | 2.25x10 <sup>-6</sup> ~7.70x10 <sup>-6</sup> | 1~1.6x10 <sup>-4</sup>    | 1.3x10 <sup>-5</sup> ~1.1x10 <sup>-6</sup> | 9.42x10 <sup>-3</sup> ~7.50x10 <sup>-4</sup> | GHT          |
|     | 3.0x10 <sup>-6</sup> ~9.74x10 <sup>-7</sup>  | 87.5~192               | 3.75x10 <sup>-4</sup> ~1.6x10 <sup>-4</sup>  | -                         | 1.4x10 <sup>-5</sup> ~8.9x10 <sup>-6</sup> | 9.68x10 <sup>-3</sup> ~6.32x10 <sup>-3</sup> | PT           |

\* CHT: Constant head test, ST: Slug test, PT: Pumping test

였다. 따라서 지하수유동 모델의 입력자료로는 HCD의 저유계수는  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  범위로 설정하였다. 관계식에 의한 HCD의 유효공극률은 투수량계수에 의하여 산출하였다. 수리시험방법과 시험대상물질의 특성을 고려하면 HCD의 유효공극률 범위는  $3.5 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-3}$ 로 분석된다.

**나. 수리암반영역**

**① HRD 분류**

수리암반영역은 단열대 간에 분포하는 상대적으로 투수성이 낮은 암반매질을 말하며, 통계학적으로 해석할 수 있는 소규모 단열대 (Stochastic Fracture Zones: SFZ)와 암반에 발달된 단열체계 (Background Fractures: BF)를 포함하게 된다. HRD의 수리지질특성은 시추공에서 도출되는 BHTV 자료와 정압주입/수위강하 수리시험에서 해석된 자료를 통계학적으로 분석하였다.

처분부지 내에 분포하는 투수성구조영역은 5개조의 큰 규모 단열대(DFZ)로 제시하였으며, 처분부지 암반블럭을 구성하는 수리학적 경계는 북부와 남부의 경계단층대 (Z21과 Z23)로 설정하였다. 이 지역은 백악기의 퇴적암과 제 3기의 안산암, 유문암, 화강암, 섬록암 등이 분포하나 수리지질학적으로는 퇴적암과 화강암류로 분류하였다. 처분시설이 입지하는 화강암류 지역을 수리지질학적으로 세분하기 위하여 시추공의 단열자료에서 전체 단열방향성 자료만을 대상으로 지역별 분포특성을 검토하였다. 전체 단열방향성 (Fig. 4)에서 Z22의 북부지역에서는 EW 방향이 우세하고, Z22의 남부지역은 NE 방향이 우세하나 국지적으로 EW와 NS방향성이 남쪽 경계부에서 발달하고 있다. 이러한 남부지역의 특성은 Z32, Z23, 그리고 부지 경계남쪽에 위치하는 남북방향 단층대의 영향으로 간주된다.

한편, 지하수유동체계와 관련된 지하수위 분포 (Fig. 2)에 의하면 북쪽의 Z22와 교차하는 동서방향의 저지대보다 남부의 Z32가 위치하는 북서방향 저지대에 낮은 지하수위가 형성되는 특성을 보인다. 이러한 단열체계 발달특성과 지하수위분포특성을 고려하여 화강암류를 Z22 단열대를 기준으로 북부 화강

암류 구역 (HRD-1)과 남부 화강암류 구역 (HRD-2)으로, 그리고 퇴적암영역은 HRD-3로 구분하였다 (Fig. 5).

**② 단열체계 분포특성**

암반영역에 분포하는 SFZ와 암반단열(BF)의 확률적 분포특성은 지하수유동 모델링 업무 중 분리단열망 (Discrete Fracture Network: DFN) 모델링의 입력자료로 이용된다. 이들의 기하학적 인자에 대한 확률 분포특성은 지표 단열조사에서 얻은 386개의 단열자료와 시추공 단열검층에서 얻은 31,460개의 자료를 통계적으로 해석하여 도출하였다. 단열의 방향성 분포는 Fig. 6과 같다. 지표 단열의 방향성은 4개 조로 구분 가능하며 NE, WNW과 NS 방향이 우세방향인 것으로 나타난다. SFZ와 BF의 방향성은 지표 단열군과 주향과 경사 방향으로 분산 정도가 클 뿐 전체적

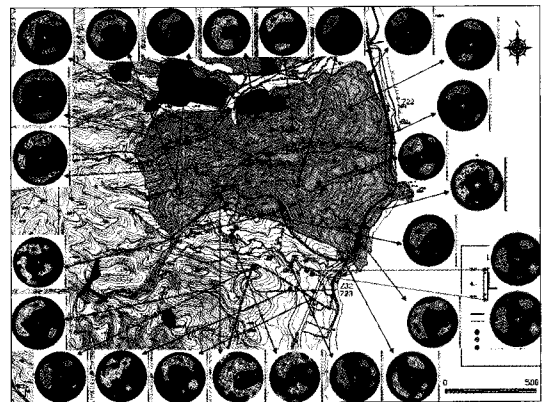


Fig. 4. Stereographic pole density diagram of background fractures.

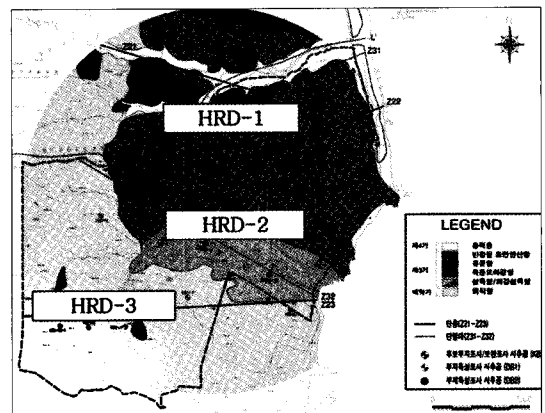


Fig. 5. Hydraulic rock domain defined by fracture orientation and lithology.

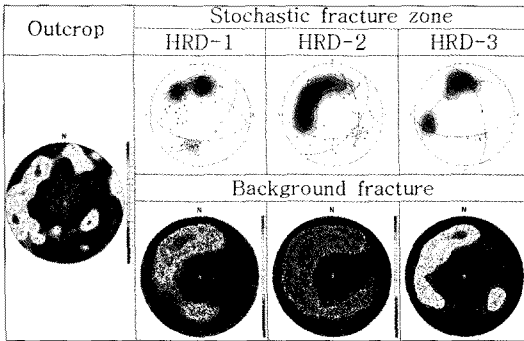


Fig. 6. Orientation distribution of SFZ and BF.

인 분포특성은 큰 차이가 없다.

단열의 크기는 지표 단열자료를 FracMan ISIS 모듈[5]을 이용하여 분석하였다. 이들의 확률밀도함수는 대수정규분포에 수렴되며, Set 1의 반경 길이는 2 m 이하이고 Set 2와 3이 다소 크게 분석되었다 (Table 2). 단열의 간격 및 빈도는 지표 단열의 경우, 0.83~1.33 m 범위에 있으며, HRD-1과 HRD-2 영역에 분포하는 SFZ는 수직적으로 약 10 m에 1개 조씩 분포하는 것으로 분석된다. 암반단열영역에서는 HRD-2 영역의 단열빈도가 2.43/m~3.45/m로서 HRD-1과 HRD-3 영역보다 크다. HRD-1과 HRD-3 영역은 1.74/m~2.87/m의 범위를 갖는다. SFZ의 진폭(true width)은 단층 손상대까지를 포함하여 HRD-1 영역에서 약 1.59 m, HRD-2에서는 약 0.69 m, HRD-3 영역에서는 약 1.36 m이다.

③ 수리특성

SFZ의 투수량계수는 정압주입시험에서 도출된 수리자료와 조사공의 단열대 자료를 근거하였으며, 단열대를 포함한 수리시험 구간에서는 단열대를 대표하는 높은 값을 사용하였다. SFZ는 구조적 특성에 근거하여 Fracture cluster (FC), Cohesive crushed zone (CCZ), Incohesive crushed zone (ICZ), Coupled (FC + CCZ + ICZ)로 세분하여 분석하였으며 (Fig. 7), 이를 수리암반영역(HRD)의 평균값과 비

Table 2. Statistics of simulated fracture size.

| Fracture size, spacing and frequency                            | Set 1 | Set 1 | Set 1 | Set 1 |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Arithmetic Mean(m)  | 3.50  | 3.50  | 3.50  | 3.50  |
| Geometric Mean(m)   | 2.36  | 2.36  | 2.36  | 2.36  |
| Simulated fracture radius(mean) under lognormal distribution(m) | 1.70  | 1.70  | 1.70  | 1.70  |

교하였다. 각 수리지질특성에 따른 투수량계수의 대표값은 기하 평균치로 간주하였고, 이들은  $5 \sim 8 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s로 같은 order의 범위에 속한다. 다만 FC 단열대는 투수량계수의 넓은 변화범위를 나타내고 ICZ는 가장 적은 폭의 변화를 보인다.

HRD의 투수성을 비교하기 위하여 수리시험에서 해석된 각 시험구간별 수리전도도값을 현장에서 실제로 측정되는 조사구간의 투수량계수로 환산하였다. 각 조사공의 투수량계수를 중심으로 암반영역과 심도에 따른 수리특성을 비교하였고, 이를 바탕으로 각 조사공의 수리전도도를 통계학적으로 분석하여 유효 수리전도도를 산출하였다. HRD의 투수성 분석에 이용된 수리자료는 조사공에서 인지되는 DFZ 구간은 제외하였고, SFZ의 수리특성은 암반의 수리특성으로 포함하였다. 수리암반영역별 투수량계수는

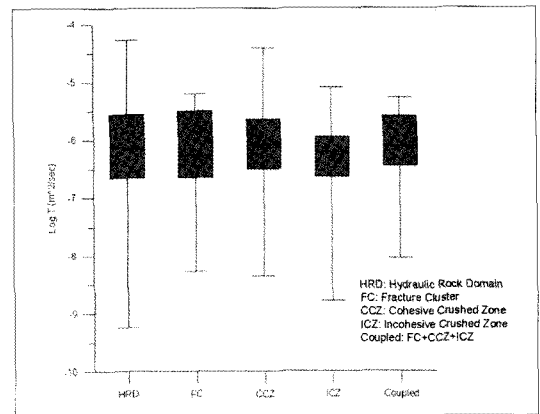


Fig. 7. Transmissivity of stochastic fracture zone distributed in HRD.

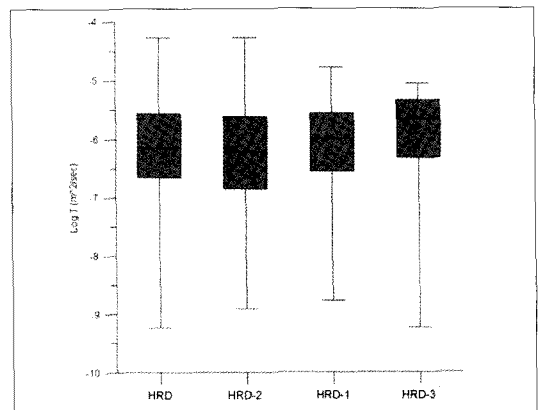


Fig. 8. Transmissivity of hydraulic rock domain.

Fig. 8과 같다. 북부블럭(HRD-1)이 남부(HRD-2)보다 2배정도 높게 나타나며 퇴적암 지역은 북부화강암지역보다 2배 높은 값을 보인다. 심도에 따른 투수성의 감소 특성은 GL. -250 m까지 뚜렷하게 인지되지 않고 있으나, 약 GL. -120 m에서 다소 높은 투수량계수가 감소되는 현상을 보인다 (Fig. 9). 따라서 상기 심도를 기준으로 수리암반영역을 상부구간과 하부구간으로 구분하여 유효수리전도도를 산출하였다. 본 부지에서는 수리전도도의 통계학적 분석으로 수리암반(HRD)의 유효수리전도도를 산출하여 영역별, 수직적으로 수리특성을 비교하였다 (Table 3). 전체 HRD의 유효수리전도도는 상부구간이  $7.7 \times 10^{-8}$  m/s, 하부구간이  $6.0 \times 10^{-8}$  m/s로 투수성이 다소 높은 것으로 평가된다. 처분시설이 위치하는 남부 화강암블럭(HRD-2)은 평균보다 다소 낮은 수치를 보이며, 사일로 심도는  $4.5 \times 10^{-8}$  m/s의 유효수리전도도를 갖는다. 북부 화강암블럭(HRD-1)은 하부구간의 유효수리전도도가 다소 낮은 특성을 갖는다.

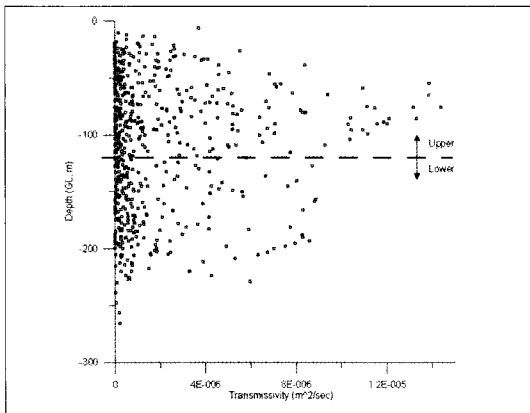
HRD의 저유계수는 관계식을 적용하여  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 의 범위로 설정하였으며, 유효공극률은  $3 \sim 6 \times 10^{-4}$

의 범위로 처분시설이 위치하는 남부 화강암반블럭이 가장 낮으며 퇴적암반지역이 다소 높은 수치를 보인다. 기존의 문헌에서 조사되는 화강암의 총 공극률은 0.1%, 유효공극률은  $5 \times 10^{-4}$ 이며, 파쇄결정질암의 유효공극률은  $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2}$ 의 범위로 보고되고 있어 상기 산출된 공극률은 문헌자료의 범위에 속한다 [6].

**다. 수리토양영역**

**① HSD 분포특성**

HSD는 유사한 수리적 특성을 갖는 토양층을 대변하며 또한 지표상부의 암반파쇄대를 포함하게 된다. 따라서 처분부지의 상부지하수대를 형성하는 것이 일반적인 특성이다. 처분시설의 모암인 제 3기 화강암류를 덮고 있는 지표층은 주로 화강암의 풍화대를 포함하고 일부지역은 4기층과 일부 저지대의 인공적인 매립토로 구성되어 있다. 제 4기층은 하상퇴적층, 산록층과 해안을 따라 고기 해안단구층이 확인되며, 기반암의 풍화에 의한 풍화토로 구성된다. 이들의 수리특성은 암반보다 투수성이 높으며, 주로 불포화대 영역으로 해석하였다. 조사지역에서 확인되는 해안단구층은 대략 EL. 8~18 m와 EL. 30~45 m 표고의 단구층이 대부분 침식되어 상부 표면에 얇은 사력층을 잔존시키는 정도로 분포한다. 해안단구퇴적층의 일반적인 특성은 사질 및 사력질(수 mm~수 cm 내외) 퇴적층이 대부분이나 잔자갈 크기의 역질 퇴적층도 일부 발견되며, 국부적으로 연장성이 비교적 불량한 이토(mud)층을 포함하기도 한다. 층적층은 부지 내 작은 하천을 따라서 미약하게 분포하며, 나아가 일대에서 해안에 이르는 구간에 국부적으로 하천에 의한 층적층이 발달하고 있다. 해변을 따라서는 현생의 사질, 사력질, 역질의 퇴적물들이 분포하고 있다.



**Fig. 9. Variation of transmissivity along the drilling depth.**

**Table 3. Hydraulic properties of hydraulic rock domain.**

|                               | HRD Average           |                       | HRD-1                 |                       | HRD-2                 |                       | HRD-3                 |                       |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                               | Upper                 | Lower                 | Upper                 | Lower                 | Upper                 | Lower                 | Upper                 | Lower                 |
| $K_g$ : Geometric mean (m/s)  | $7.68 \times 10^{-8}$ | $6.02 \times 10^{-8}$ | $8.13 \times 10^{-8}$ | $7.21 \times 10^{-8}$ | $4.40 \times 10^{-8}$ | $4.54 \times 10^{-8}$ | $1.81 \times 10^{-7}$ | $1.48 \times 10^{-7}$ |
| T: Geometric mean ( $m^2/s$ ) | $5.72 \times 10^{-7}$ |                       | $6.58 \times 10^{-7}$ |                       | $3.76 \times 10^{-7}$ |                       | $1.36 \times 10^{-6}$ |                       |
| S: $7E-4(T^{0.5})$            | $5.3 \times 10^{-7}$  |                       | $5.6 \times 10^{-7}$  |                       | $4.3 \times 10^{-7}$  |                       | $8.1 \times 10^{-7}$  |                       |
| $n_e : 0.5T^{0.5}$            | $3.78 \times 10^{-4}$ |                       | $4.06 \times 10^{-4}$ |                       | $3.07 \times 10^{-4}$ |                       | $5.79 \times 10^{-4}$ |                       |



시추 조사공에서 관찰되는 지표 부근의 지질특성은 시추공 위치에 따라 다양한 특성을 나타낸다. 토양층의 두께는 일반적으로 3~5 m의 두께를 갖으며, 낮은 곳은 8 m, 깊은 곳은 10 m의 두께를 갖는다. 상부과쇄대는 일반적으로 5~20 m의 두께로 발달하며, 깊은 곳은 24~28 m의 두께를 갖는다. 상부 암반과쇄대는 개념상으로 투수성구조(HCD)에 속하나, 발달되는 과정은 지표지질형성과정에서 영향을 받고 또한 상부지하수대를 이루고 있기 때문에 수리적으로 HSD에 포함시켰다. 지하수위는 상기 지표층의 특성과 뚜렷한 관계를 나타내지 않으며 시추공과 관통하는 과쇄대와 밀접한 관계로 해석된다.

HSD는 탄성파속도를 이용하여 4개 층으로 구분할 수 있는데, 그 두께는 5~20 m로서 국지적인 특성에 따른 변화를 나타내고 있다. HSD의 토양층과 상부과

쇄대의 두께 분포는 Fig. 10과 같다. 토양층과 상부과쇄대의 발달이 양호한 지역은 북부의 EW 계곡부와 남부의 NW 저지대 사이에 분포하고 있다.

② 수리특성

HSD의 수리특성조사는 암반시추 시 상부구간을 분리하여 수위강하계측방법으로 투수시험을 실시하였다. 투수시험에서 산출된 수리전도도는 풍화토, 풍화암과 연암층으로 구분하여 분석되었으나, HSD의 분류는 매립토와 풍화토를 포함하는 토양층과 상부과쇄대로 구분하였다. 연암은 상부과쇄대로 고려하였으며 계측된 자료의 평균치를 대표값으로 설정하였다. 토양층의 수리전도도는  $4.4\sim 4.5 \times 10^{-6}$  m/s, 상부과쇄대의 수리전도도는  $2.6 \times 10^{-6}$  m/s로 평가되었다.

지표 하 1~2 m에 위치하는 토양층의 총 공극률

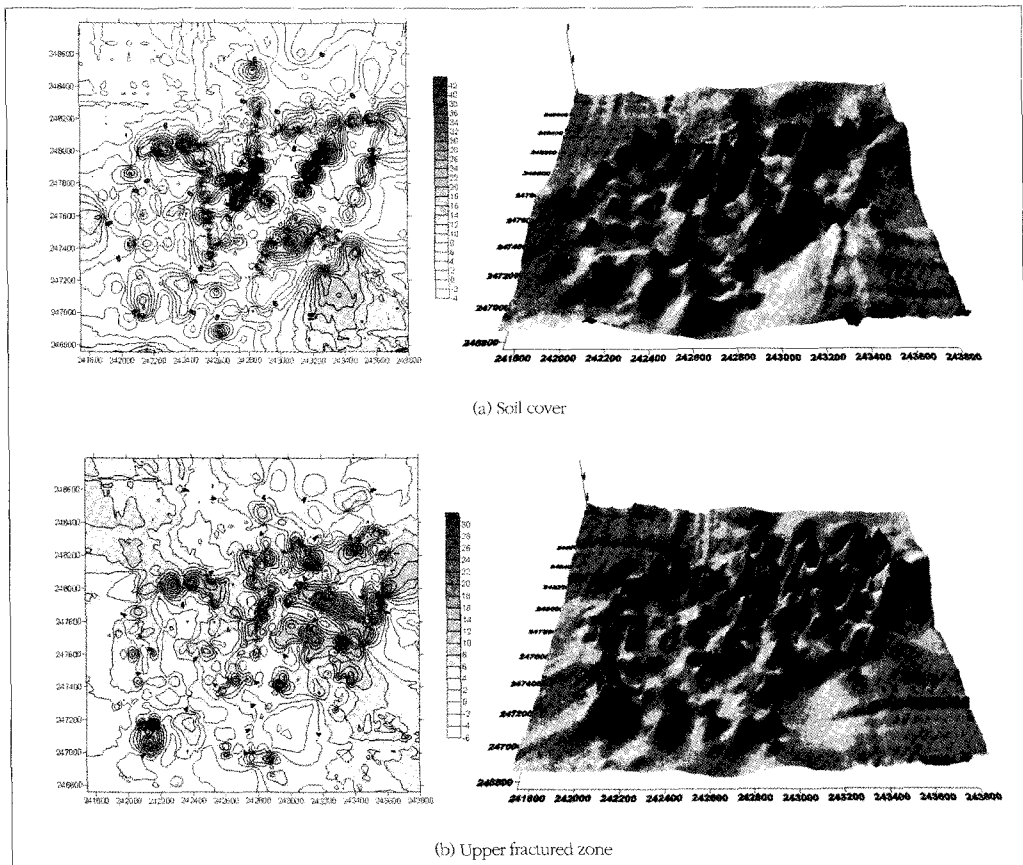


Fig. 10. Distribution map of soil cover and upper fractured zone of HSD.

(bulk porosity)은 0.2~0.4의 분포를 보이며, 시료 위치에 따라 차이를 나타내고 있으나 평균값인 0.34로 대표될 수 있어 처분시설 모양의 평균공극률보다 2 order는 높은 값을 갖는다.

#### IV. 건설 중 불확실성 저감 방안

본 논문의 결과는 지표조사단계에서 얻어진 자료에 근거한 것이므로 수리지질특성과 관련된 제반 조사방법에 가정과 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 현재 진행 중인 지하시설 건설과정에 취득되는 직접적인 수리지질특성 관련 자료를 종합적으로 재 해석함으로써 부지특성조사 단계에서의 가정과 불확실성을 저감시킬 수 있고, 최종적인 수리-구조모델의 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

교육과학기술부는 중·저준위방사성폐기물처분시설의 건설 및 운영 허가에 있어서 부지특성조사 단계에서의 불확실성 저감을 위한 건설 중 후속조치사항을 제시하였다. 이 중 수리지질관련 요구사항은 다음으로 요약된다.

- 사일로 지역 지질구조 확인
- 수리-구조모델 및 수리지질특성의 검증/보완

이를 위하여 건설 과정에서 우선적으로 지하에서 DFZ의 확인이 이루어져야 하며, 이들에 대한 기하특성과 수리특성이 도출되어야 한다. 이러한 지질구조 자료를 기반으로 수리-구조모델에 관한 제반 특성이 검증되고 필요한 경우 수리영역별로 수리특성이 보완되어야 한다. 현재 계획하고 있는 지하 수리지질조사방안은 지하수 유입특성을 포함하는 정밀한 터널 매핑과 터널 내 조사공을 이용하여 수리암반영역 및 단열대에 대한 투수성과 단열특성을 도출하고자 한다.

또한 추가조사를 통하여 얻어진 사일로 인근의 수리전도도값은 HRD-2 수리암반영역의 평균값보다 다소 크게 평가되어, 이의 원인이 시추 조사공에서의 수리시험에 의한 것인지 실제 암반의 투수성을 반영한 것인지에 대한 정밀한 확인이 요구된다. 그리고 지하수유동 모델 영역으로 설정한 무유동 경계는 해석된 HCD의 연장성이 예상보다 클 경우 광역규모

지하수체계의 영향을 고려하여야한다[7]. 이를 위해서는 국도 31번 우회도로 터널구간에서 Z22, Z23, Z32 단열대의 연장성 확인되어야 한다.

#### V. 결 론

중·저준위방사성폐기물 처분부지에 대한 건설 및 운영 인허가 취득을 위한 종합적인 부지특성조사가 사업자인 한국수력원자력(주)의 책임 하에 이루어졌으며, 수리지질조사는 부지의 수리지질학적 특성 해석과 방사선적 안전성 평가를 위한 기초자료 생산을 목적으로 수행되었다. 처분부지의 수리지질특성은 주로 지표에서 이루어진 지질조사, 시추조사, 각종 수리시험 및 지구물리탐사 자료를 종합적으로 분석하여 수리지질체계의 특성을 평가하고, 이를 토대로 수리토양영역, 수리암반영역 및 투수성구조영역으로 구성되는 수리-구조모델을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 수리-구조모델과 수리인자는 지하수유동 모델 해석 업무에 직접 이용되었다.

본 논문의 결과는 지표조사단계에서 얻어진 자료에 근거한 것이므로 수리지질특성과 관련된 제반 조사방법에 가정과 불확실성이 내재되어 있다. 따라서 현재 진행 중인 지하시설 건설과정에 취득되는 직접적인 수리지질특성 관련 자료를 종합적으로 재 해석함으로써 부지특성조사 단계에서의 가정과 불확실성을 저감시킬 수 있고, 최종적인 수리-구조모델의 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주)에서 시행한 중·저준위방사성폐기물 처분부지 부지특성조사의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

[1] Hubbert, M.K., "The theory of groundwater motion", J. Geol., 48, p.785-944(1940).  
 [2] Rhén I, Follin S, and Hermanson J,

Hydrological Site Descriptive Model—a strategy for its development during site investigations, SKB R-03-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.(2003).

- [3] SKB, Preliminary site description. Forsmark area—version 1.2, SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.(2005).
- [4] Lee Hartley, Ian Cox, Fiona Hunter, Peter Jackson, Steve Joyce, Ben Swift, Björn Gylling, and Niko Marsic, Regional hydrogeological simulations for Forsmark—numerical modelling using CONNECTFLOW: Preliminary site description Forsmark area—version 1.2, SKB R-05-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.(2005).
- [5] Golder Assoc. Inc., FracMan—Interactive discrete feature data analysis geometric modeling and exploration simulation (Version 2.306), (1994).
- [6] Domenico P.A and Schwartz F.W, Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley and Sons, 824 pp., (1990).
- [7] IAEA Waste Management Assessment and Technical Review Programme (WATRP), IAEA Peer review of the Korean LILW disposal site, (2007).