

Synthetic Study on the Geological and Hydrogeological Model around KURT

KURT 주변 지역의 지질모델-수리지질모델 통합 연구

Kyung Woo Park¹⁾, Kyung Su Kim, Yong Kwon Koh and Jong Won Choi
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Deadeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

박경우¹⁾, 김경수, 고용권, 최종원
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received August 25, 2010 / Revised October 12, 2010 / Approved October 15, 2010)

Abstract

To characterize the site specific properties of a study area for high-level radioactive waste disposal research in KAERI, the several geological investigations such as surface geological surveys and borehole drillings were carried out since 1997. Especially, KURT (KAERI Underground Research Tunnel) was constructed to understand the further study of geological environments in 2006. As a result, the first geological model of a study area was constructed by using the results of geological investigation. The objective of this research is to construct a hydrogeological model around KURT area on the basis of the geological model. Hydrogeological data which were obtained from in-situ hydraulic tests in the 9 boreholes were estimated to accomplish the objective. And, the hydrogeological properties of the 4 geological elements in the geological model, which were the subsurface weathering zone, the log angle fracture zone, the fracture zones and the bedrock were suggested. The hydrogeological model suggested in this study will be used as input parameters to carry out the groundwater flow modeling as a next step of the site characterization around KURT area.

Key words : High-level radioactive waste disposal, KAERI Underground Research Tunnel, Geological model, Hydrogeological model, Site characterization

요 약

한국원자력연구원의 연구지역에서 고준위방사성폐기물처분을 위한 부지특성평가 기술 구축을 위해 지질특성조사가 1997년부터 지표기반 조사, 시추공 조사를 포함하여 수행되었다. 2006년에는 지하처분연구터널(KURT, KAERI Underground Research Tunnel)을 준공하여 연구지역에 대한 심부지질환경 규명을 위해 노력하고 있다. 본 연구는 한국원자력연구원내 건설된 지하처분연구시설 주변 지역을 연구대상 지역으로 하여 지질모델에 대한 수리지질모델의 통합 구축을 목적으로 한다. 본 연구를 위해 연구지역에서 굴착된 9개의 시추공에 대한 현장 수리시험 자료를 이용하였으며, 지질모델에서 도출한 풍화대, 상부 저경사단열대, 심부 영역에 존재하는 결정론적 단열대에 대한 수리지질특성을 분석하였다. 본 연구 결과

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

제시된 수리지질모델은 향후 지하수 유동모델링에 이용될 것이다.

중심단어 : 고준위방사성폐기물처분, 지하처분연구터널, 지질모델, 수리지질모델, 지하수유동모델링, 부지특성조사

I. 서론

방사성폐기물의 지층 처분과 관련한 부지특성조사에 대한 연구는 지질학적, 수리지질학적, 지구화학적 및 지질역학적 특성 연구로 구분할 수 있다. 지질학적 특성에 대한 연구는 처분 영역의 모암에 대한 광물·암석학적 특성, 단층 및 단열대의 지질 구조적 특성 등 제반 지질환경 특성을 포함한다. 수리지질학적 특성 연구는 처분 지역의 지표 수문 특성, 천부 영역과 처분 심도의 지하수 유동 및 용질의 이동과 관련된 수리지질학적 특성을 포함한다. 한편, 지구화학적 연구는 처분 영역 매질에 대한 지구화학적 특성 및 처분 영역의 지하수의 지화학적 특성에 대한 연구를 수행하여, 방사성폐기물에서 누출될 수 있는 핵종의 용존 특성과 이동 특성을 규명하고 처분 영역의 수리지질학적 특성에 대한 검증 역할을 한다. 지질역학적 특성에 대한 연구는 처분 지역의 지열 특성과 암반 특성 연구를 포함하며 심지층에서의 건설될 처분장이 지열적으로 안정된 암반-지하수 시스템을 갖고 있는지를 규명하고, 처분장 건설 및 운영에 암반 응력이 허용할 범위를 갖고 있는지에 대하여 분석하는 연구로 정의할 수 있다[1].

일반적으로 방사성폐기물처분에 적합한 환경은 처분장이 건설될 대상 영역이 지질구조적으로 안정한 지괴에 위치해야 하고, 지표의 기후 변화가 처분 영역에 영향을 미치지 않는 탄력성을 갖고 있어야 한다. 또한, 수리지질학적 측면으로는 처분 심도에서 지하수의 유동이 아주 적거나 없어야 하며, 처분장에서 생태계에 이르기까지 지하수의 유동로 역할을 할 잠재적 투수성 지질구조(단열대, 단층)가 없어 지하수의 유동이 처분 심도 상부의 암반층과 격리된 환경을 가져야 한다. 한편, 방사성폐기물의 처분에 적합한 지하수의 지화학적 특성을 보면 처분 영역에 부존하는 지하수의 연령은 오래되고, 방사성 핵종이 잘 침전될 수 있는 환원 상태를 가져야 한다. 핵종의 이동과 관련해서 핵종이 지하수에 의한 이류 보다는 확산에 의해 이동되어야 하며, 처분장에서 발생하는 가스를 잘 분산할 수 있는 매질 및 지하수 조건이 선호된다. 처분장의 건설과 관련하여 처분 영역의 암반 응력이 대규모 지하 처분장을 건설하기에 적합해야 하고 열적으로 안정한 암반-지하수 시스템을 갖고 있는 환경을 선호한다[2].

즉, 방사성폐기물 처분을 위한 부지특성조사는 진술한 바와 같은 적합한 환경 갖는 부지를 찾기 위해 수행되는데, 위에서 나열한 모든 조건에서 적합한 환경을 갖는 최적의 부지를 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 부분적으로 적합한 환경을 갖는 지역에 대해 방사성폐기물 처분에 대한 안전성 평가를 수행하여 후보 부지를 찾아 나가는 과정이 필요하다. 또한, 처분 안전성 평가를 수행하기 위해서는 각 부지특성조사 결과가 종합적으로 분석되어 부지특성모델을 구축하는 과정을 밟아야 한다[3].

한국원자력연구원에서는 고준위방사성폐기물 처분 영역에 대한 부지특성조사 기술을 구축하기 위해 1997년부터 현재까지 한국원자력연구원 주변 지역을 연구 지역으로 선정하여 지질조사, 수리지질조사, 지화학조사 및 지질역학 조사 등 다양한 부지특성조사를 수행해 왔으며, 지질특성조사의 일환으로 지표지질조사, 시추공지질조사, 터널지질조사를 수행하여 연구지역에 대한 지질모델을 구축한 바 있다[4]. 이와 함께 연구 지역의 다수의 심부 시추공에서 현장 수리 시험을 통한 수리지질 특성 연구를 수행하였다[5]. 본 논문에서는 기존에 구축된 지질모델의 각 요소에 대한 수리지질특성을 수리지질모델의 요소로서 종합 평가하였고, 현장 수리 시험 결과를 이용하여 수리지질모델로 구축하였다.

II. 연구 지역

가. 연구 지역의 지질모델

지표 지질조사 및 시추공 조사 결과에 근거하여 구축된 연구 지역의 지질모델은 상부 토양층 및 풍화대, 저경사단열대, 단열대, 기반암으로 구분할 수 있다(Fig. 1). 지표물리탐사와 시추 코어 분석 결과, 상부 토양층과 풍화대는 지표에서 10~38 m의 깊이를 갖고 분포하는 것으로 확인된다. 그리고 시추공 단열 검증에서 관측되는 개개 단열의 방향성을 분석한 결과, KURT (KAERI Underground Research Tunnel) 주변 지역에서 저경사 단열대가 지표에서 22.5~84.2 m의 깊이 분포를 보이고 있으며, 풍화대와 하부 기반암 사이에 위치한다(Table 1).

연구지역의 시추공에서 확인되는 개개 단열의 통계 분석 결과에 기초하여, 제반 지표지질조사결과를 종합 분석하여

Table 1. Depth distribution of the weathering zone and low angle fracture zone in each borehole[4]

Borehole	(mabh: meter along borehole)	
	Weathering zone (mabh)	Low angle fracture zone(mabh)
KP-1	27	31
KP-2	10	31
YS-1	16	53
YS-2	15,2	51
YS-3	15	74,1
YS-4	13	28
YS-5	10	22,5
YS-6	15	45,8
YS-7	38	84,2

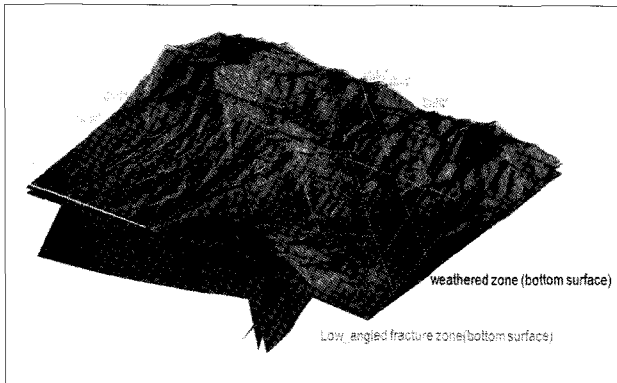


Fig. 1. Geological model around KURT area. The geological analysis determined four geological elements such as subsurface weathering zone, log angle fractures zone, fracture zones and bedrock for the geological model[4].

최종 7개의 단열대를 도출하였다. 각 단열대는 주단열(major fracture)과 단열 손상대로 이루어져 있으며, 주 단열을 분석하여 단열대의 방향성을 제시하고, 시추공 별로 존재하는 주 단열의 단열 손상대(damaged zone)의 크기를 분석하여 단열대의 규모를 판단하였다. 또한, 단열대의 분류 기준에 따라 연구지역에서 심부 영역에 존재하는 단열대의 분류 결과를 제시하였다(Table 2).

나. 수리지질특성 분석을 위한 시추공

고준위방사성폐기물 처분을 위한 부지특성조사의 일환으로 한국원자력연구원내 연구 지역에서 16개의 시추공을 굴착하였다(Fig. 2). 연구지역에 굴착된 시추공은 위치 및 심도에 따라 BH (BoreHole)와 YS (Yuseong), KP (KURT Portal) 관정군 및 DB (Deep Borehole)관정으로 분류하였는데, BH 관정군(BH-2~6)은 2000년 이전에 천부 영역의 수리지질 조사를 위해 지하 100 m 이내의 깊이로 굴착되었고, YS 관정군(YS-1~7)은 심부 영역의 지질 특성 및 수리지질 조사를 위해 지하 200~500 m의 깊이로 굴착되었다. KURT 건설 전 부지특성조사의 일환으로 KURT의 입구 지역에서 KURT와

Table 2. Descriptions of fracture zones and damage zone in borehole; These results are obtained from synthetic analysis using the lineament analysis, results of surface geophysical survey and fracture zone analysis in borehole[4]

Fracture zone	Data
YS1_104F YS1_104DZ	YS1MF104(N18W74N) Lineament analysis YS1FZ1ab(87, 2-138, 0mabh)
YS1_433F YS1_433DZ	YS1MF433(N20W55S) Geophysical investigation Lineament analysis YS1FZ4cd(417, 3-447, 2mabh)
YS2_106F YS2_106DZ	YS2MF106(N10W73N) Geophysical investigation Lineament analysis YS2FZ1abc(88, 9-152, 1mabh)
YS6_70F YS6_70DZ	YS6MF70(N9W75N) Geophysical investigation Lineament analysis YS6FZ2ab(51, 5-93, 0mabh)
KP1_75F KP1_75DZ	KP1MF75(N2E86E) Lineament analysis KP1FZ1a(27, 0-83, 0mabh)
KP1_120F KP1_120DZ	KP1MF120(N75E42S) Lineament analysis KP1FZ2b(115, 0-132, 0mabh)
KP1_177F KP1_177DZ	KP1MF177(N87E71S) Geophysical investigation KP1FZ3(176, 5-181, 6mabh)

나란한 방향의 KP-1 시추공이 굴착되었고, 수직 방향으로 KP-2 시추공이 굴착되었다. KURT의 심부지역에 대한 지질, 수리지질 및 지화학 특성을 파악하기 위해 KURT 내부에 장심도 시추공인 DB-1(심도 500 m)와 KURT에서 남쪽으로 150 m 이격된 지점에 DB-2(심도 1,000 m)시추공을 2008년과 2009년에 각각 굴착하였다. 본 논문에서 분석된 수리지질 자료는 2009년 구축된 지질모델에서 이용된 시추공을 대상

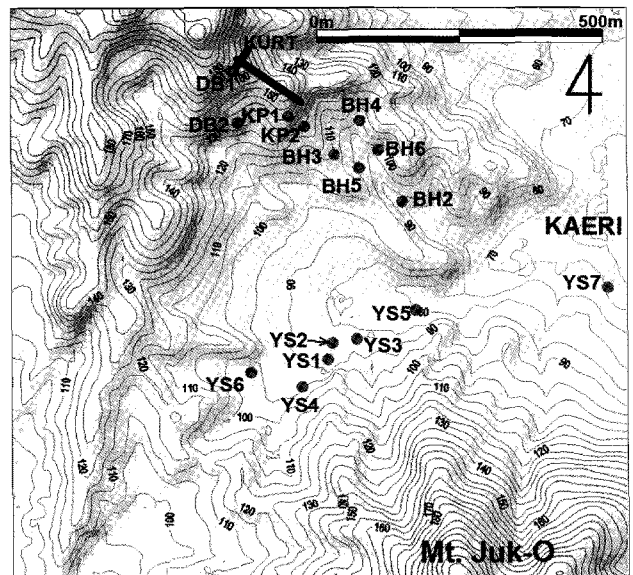


Fig. 2. Locations map of the boreholes. Total 16 boreholes were drilled at the study area and grouped into 4 well fields (YS, BH, KP, DB well fields). In this study, YS1~YS7 borehole and KP1, 2 borehole data were used for construction of geological model[4].

으로 한다[4].

III. 연구 방법

가. 현장 수리시험

KURT 주변 지역에 대한 수리지질 특성 조사를 위해 총 9 개의 시추공에서 이중 패커를 이용하여 일정 구간별 정압주입시험을 실시하였다. 현장 수리시험은 주입단계에서 20분 내외로 정압주입 후 일정 유량이 매질로 유입될 때 까지 시험을 실시하였는데, 주입수로 연구지역의 지표수를 이용하였으며, 주입 압력의 안정화를 위하여 약 20~40 m의 정압이 걸리도록 상부 표고에 물탱크를 임시로 설치하거나, 물탱크 설치가 어려운 곳은 주입 펌프를 사용하여 일정 압력으로 물을 주입하였다. 주입 호스 선상에 설치되는 압력계는 0.1 kg/cm²까지 판독 가능한 유압 압력계를 사용하였고, 주입량의 정밀한 계측에 가장 중요한 유량계는 Gilmont Instruments 사의 rotameter를 계측 범위별로 중첩하도록 자체 제작하였다(Fig. 3).

나. 수리지질모델

수리지질모델은 지하에 존재하는 지하수가 대상 매질의 지질모델 요소에서 어떠한 유동 양상을 나타내는지에 대해 수리지질학적 요소를 고려하여 구성된 모델로 정의할 수 있다. 따라서, 수리지질모델은 해당 영역의 지질모델을 근거로 구축되어야 하며, 각 요소에 대한 수리지질학적 특성을 바탕으로 지질학적 요소를 수리지질학적 요소로 적절히 대입시키거나 혹은 지질-수리지질 특성을 종합 분석하여 보완할 수도 있다. 즉, 투수성이 양호할 것으로 고려되는 지질학적 요소가 기반암과 같은 수리적 특성을 보일 경우 이를 기반암의 수리

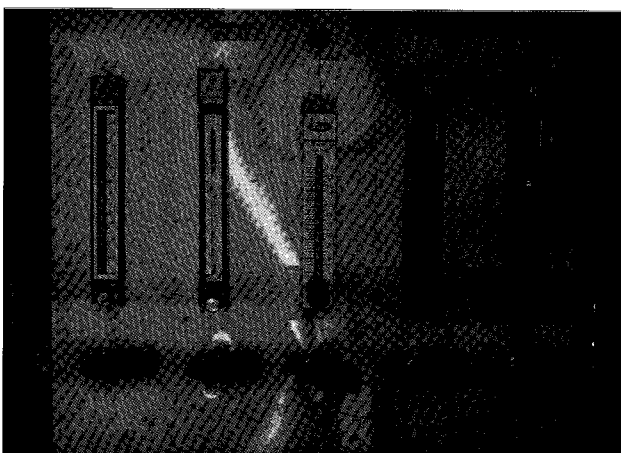


Fig. 3. Photograph of the flowmeter implemented during hydraulic test.

지질요소로 반영하거나, 반대로 기반암에서 투수성이 양호한 단일 혹은 몇 개의 단열이 주변 지하수 유동에 주요 역할을 할 경우 이를 투수성이 양호한 수리지질요소에 포함하여 보완할 수 있다. 따라서 지하수 유동 측면에서 지질학적 요소와 수리지질학적 요소는 반드시 일치되지 않으며 수리적 특성에 따라 조정될 수 있다.

KURT 주변 지역의 지질모델에서 제시한 바와 같이, 연구 지역에서 지표 지질조사 및 시추공 지질조사를 통해 상부 토양층 및 풍화대, 저경사단열대, 단열대, 기반암의 4개의 지질모델에 대한 요소를 분류하였다. 수리지질모델 구축을 위해 먼저 지질모델에 근거하여 각 요소를 구성하였다. 이에 대한 수리지질학적 특성이 일반적으로 고려되는 성질을 갖는다고 가정하여 각 지질모델의 요소에 대한 수리지질모델의 개념을 설정하였다. 일반적으로 수리지질모델의 요소는 수리토양대(Hydraulic Soil Domain, HSD), 수리투수대(Hydraulic Conductor Domain, HCD), 수리암반대(Hydraulic Rock Domain, HRD)로 구성된다[6]. 이와 함께 KURT 주변 지역의 지질모델에서 저경사단열대가 추가 되었으므로 저경사단열대(low angle fracture domain)의 요소를 수리지질모델에 추가하여 기본 개념 모델을 구성하였다.

IV. 연구 결과

가. 현장수리시험

연구 지역에서 수행한 일정 구간별 정압주입시험의 결과는 정상류 해석방법으로 계산되었다. 일반적으로 수리시험을 수행할 때, 단열 암반에서 지하수 유동의 경향은 단열의 공간적인 분포 형태에 따라 선형유동, 방사상 유동, 구상유동의 세 가지 형태를 나타내며, 이는 시간에 따라 두가지 이상의 유동 양상을 보이며 변화기도 한다. 따라서, 현장 수리시험에서 단열의 공간적 분포 형태를 파악하고, 시간에 따라 시험 구간에 주입된 유량 변화 자료를 이용하는 부정류상태의 차원분석법을 이용하여 수리전도도 값을 해석하는 방법이 실제 단열의 지하수 유동특성을 반영할 수 있다[7]. 그러나, 차원 분석법을 이용하여 수리전도도 값을 구할 때 수리시험의 기간 및 초기 유입되는 유량 자료의 부족 등의 한계가 있으며, 차원 해석에서 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 해석에 유의해야 한다[8]. 본 논문에서는 균질 등방성 매질에 수직인 시험공에서의 흐름이 방사상 층류(radial laminar flow)로 가정하였으며, 현장 수리시험 결과 투수량계수 산출을 위해 사용된 해석법은 1967년에 제안된 Moye의 해석해에 따랐다[9].

$$KL = \frac{q}{h_w} \left(\frac{1 + \ln(L/2r_w)}{2\pi} \right) \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서 K = 수리전도도 (m/sec)
- q = 시험구간에 주입되는 지하수의 유량 (시험 종료 시점) (m^3/sec)
- L = 시험구간의 길이 (m)
- h_w = 시험구간에 적용된 압력 (m)
- $2r_w$ = 시추공 직경 (m)

현장 시험 결과 산출된 투수량계수를 시추공별로 깊이에 따라 도시하여 Fig. 4에 제시하였다. KURT 주변의 연구 지역에서 구간별 투수량계수는 $10^{-5} \sim 10^{-11} m^2/sec$ 로 넓은 범위를 갖고 있으며, 특히 풍화대 이하의 기반암 영역은 $10^{-7.5} \sim 10^{-11} m^2/sec$ 로 화강암 지역에서의 전형적인 값을 보였다. 그러나 부분적으로 투수성 구조가 존재하는 영역은 $10^{-5} \sim 10^{-6} m^2/sec$ 의 값을 갖는 것으로 판단된다.

히스토그램을 이용해 연구 지역의 투수량계수 분포를 살펴본 결과, 정규분포나 지수분포 보다는 대수정규분포를 따르는 것으로 보여진다(Fig. 5). 그러나 투수량계수의 대수값을 이용해 Anderson-Darling의 정규성 검정을 수행한 결과 정규 분포를 따르지 않는 것으로 분석되었다[9]. 따라서 연구 지역의 평균 투수량계수는 $5.94 \times 10^{-9} m^2/sec$ 이며, $1.49 \times 10^{-10} \sim 2.36 \times 10^{-7} m^2/sec$ 의 편차를 갖지만, 정규분포를 따르지 않아 평균 및 표준편차로 제시되는 기본적인 통계값으로 투수량계수의 대푯값을 산출할 수 없다. 이는 본 분석에 이용된 전체 투수량계수가 연구 지역의 심지층에 대한 수리지질특성을 조사하기 위해 9개의 시추공에서 10 m의 일정한 간격으로 수리시험을 수행하여 도출된 결과이기 때문에, 천부의 풍화대 영역과 저경사단열대 영역, 심부의 기반암과 단열대 및 단층에 대한 수리지질특성이 구분 없이 전체 구간에 대한 수리특성으로 분석되었기 때문이다. 즉, 어떤 연구 지역의 지질특성이 단층 및 단열대가 다수 존재하여 투수성이 양호한 수리지질특성을 갖는 지역이라고 한다면 평균 투수량계수는 큰 값을 나타내겠지만, 도출된 평균 투수량계수가 그 지역의 배경 단열로만 구성된 기반암의 투수성을 대표할 수 없는 것과 같은 맥락으로 해석할 수 있다.

요약하면 본 연구 지역은 나공 상태의 관측공에서 수행한 현장 수리시험 결과를 그대로 적용한다든지, 일정 구간별 현장 수리시험 결과의 평균값을 적용하여 해석할 수 없는 수리지질특성을 가진다. 이러한 수리지질학적 특성은 비단

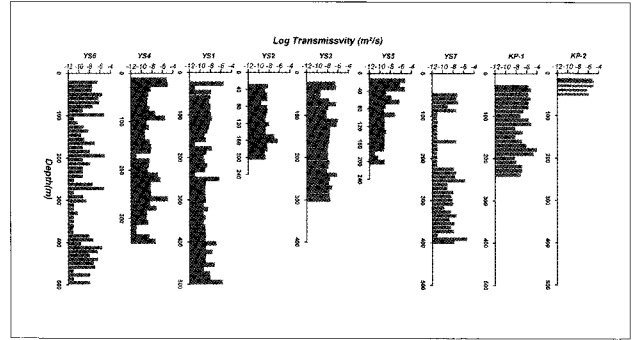


Fig. 4. Logarithmic transmissivities distribution obtained from the constant head injection test with fixed depth in the 9 boreholes.

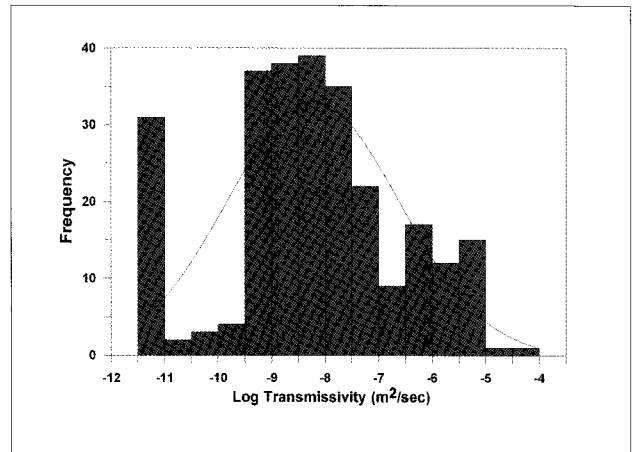


Fig. 5. Histogram of logarithmic transmissivities obtained from the constant head injection test with fixed depth in the 9 boreholes.

본 연구 지역의 뿐 만 아니라 단열대가 존재하는 대부분의 단열 암반의 수리지질특성으로 해석할 수 있다. 따라서, SKB (Swedish nuclear fuel and waste management Co.)는 천부에 풍화대 영역, 심부에 단열대가 존재하는 결정질 암반에서는 풍화대 영역, 단열대 영역, 기반암 영역으로 그 수리지질영역을 구분하여 해석하고 있다[6]. 이러한 특성은 연구 지역의 시추공에서 수행한 구간별 현장 수리시험 결과에서 뒷받침 된다. Fig. 4를 살펴보면 각 시추공에서 비교적 투수성이 양호한 구간 ($>10^{-7} m^2/sec$)이 심도에 관련 없는 불규칙한 분포를 보이고 있다. 특히, YS-6, YS-1, YS-7 시추공에서 지하 400 m 이하의 깊이에서 심부 영역임에도 불구하고 비교적 큰 수리전도도 값을 보이는 현상은 심부 영역에서도 투수성 구조에 의해 지하수의 유동이 결정적으로 지배받을 수 있음을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 지하 매질을 하나의 요소로 고려하여 수리지질특성을 해석하기 보다는 연구 지역에서 구축된 지질모델에 근거하여 풍화대 영역, 저경사단열대영역, 단열대 영역, 기반암 영역으로 구분하여 수리지질모델을 구성하였다.

나. 수리지질모델의 요소에 대한 수리지질특성

KURT 주변 지역의 지질모델 요소에 대응된 수리지질모델의 수리지질 특성을 판단하기 위해 연구용 시추공에서 정압주입시험을 통해 구간별로 산출된 투수량계수를 이용하였으며, 지질모델을 구축하는 과정에서 시추공별로 관측되는 단열대의 크기를 활용하여 각 단열대에 대한 수리전도도를 도출하였다.

시추공별 상부토양층 및 풍화대의 깊이에 해당되는 수리전도도의 분포는 일부 시추공에서 산출된 수리전도도(1.5×10^{-7} m/sec)를 이용하였다. 상부토양층 및 풍화대를 제외한 각 시추공에서 도출된 수리지질모델의 요소별 수리전도도 분포는 Fig. 6과 같다.

지질모델을 반영한 수리지질모델의 요소에 대한 수리전도도는 저경사단열대의 경우, $10^{-7.00}$ m/sec의 평균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-7.76} \sim 10^{-6.24}$ m/sec)을 보이며, 비교적 작은 표준편차를 갖고 있다. 기반암에 존재하는 단열대는 $10^{-7.16}$ m/sec의 평균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-8.24} \sim 10^{-6.08}$ m/sec)을 보이고 있다. 심부 영역에 존재하는 기반암의 경우, 평균 $10^{-10.01}$ m/sec(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-11.23} \sim 10^{-8.79}$ m/sec)로 저경사단열대와 단열대에 비해 낮은 값으로 산출된다. 각 수리지질모델 요소의 수리전도도의 통계적 분포 특성을 확인하기 위해 지질모델의 요소별 도출된 수리전도도의 대수값을 이용하여 정규성검정을 실시하였다. 정규성검정 방법으로 현장시험을 통해 산출된 수리전도도 자료가 적은 저경사단열대 및 단열대에 대해 Ryan-Joiner의 상관성 검정 방법을 [10], 수리전도도가 50개 이상인 기반암에 대해 Anderson-Darling 검정 방법을 이용하였다[11]. 정규성 검정 결과, 저경사단열대와 심부 단열대의 수리전도도의 대수값은 정규성을 갖는 것으로 분석되지만, 기반암의 수리전도도 대수값은 정규성을 갖지 않는 것으로 분석된다. 이는 10^{-10} m/sec 이하의 저투수성의 기반암에서 수행한 현장수리시험이 정확한 자료를 제시하지 못하고 있거나, 정압주입시험결과 물이 전혀 주입되지 않는 구간에서 10^{-12} m/sec로 수리전도도를 가정하였기 때문으로 분석된다.

특이한 점은 기반암의 단열대가 갖는 수리전도도는 $10^{-6} \sim 10^{-6.5}$ m/sec, $10^{-8} \sim 10^{-8.5}$ m/sec의 범위에서 최고점을 갖는 양봉분포(bimodal distribution)를 보이고 있다는 것이다(Fig. 6(b)). 이는 시추공에서 단열자료, 지구물리자료 등을 활용하여 지질모델을 구축하는 과정에서 물리적으로 관측되는 결과를 활용하여 단열대를 구분해 내는 방법이 간과할 수 있는 결정질 암반의 단열대가 갖는 수리지질학적 특성으로 분석할 수 있다. 즉, 비록 수 km²의 제한된 연구지역에서 존재하는 단

열대라도 다른 수리전도도 분포를 보일 수 있으므로 단열대의 크기, 방향성 등 분류 기준에 따라 수리지질학적 특성을 다시 구분하는 과정이 필요하다고 판단된다.

다. 단열대의 수리지질특성

본 논문에서는 기존의 지질 모델의 이용된 분류 체계(단열대의 크기 및 방향성)(Fig. 7, Table 3)를 기준으로 수리전도도를 분리하여 그 분포를 확인하여 보았다. 단, 단열대의 크기에 대한 수리전도도 분류는 현장 수리시험 결과 개수의 제한으로 인해(S class 4개, B class 4개), Andersson et. al (2002)이 제시한 기준으로 분류하였다[12].

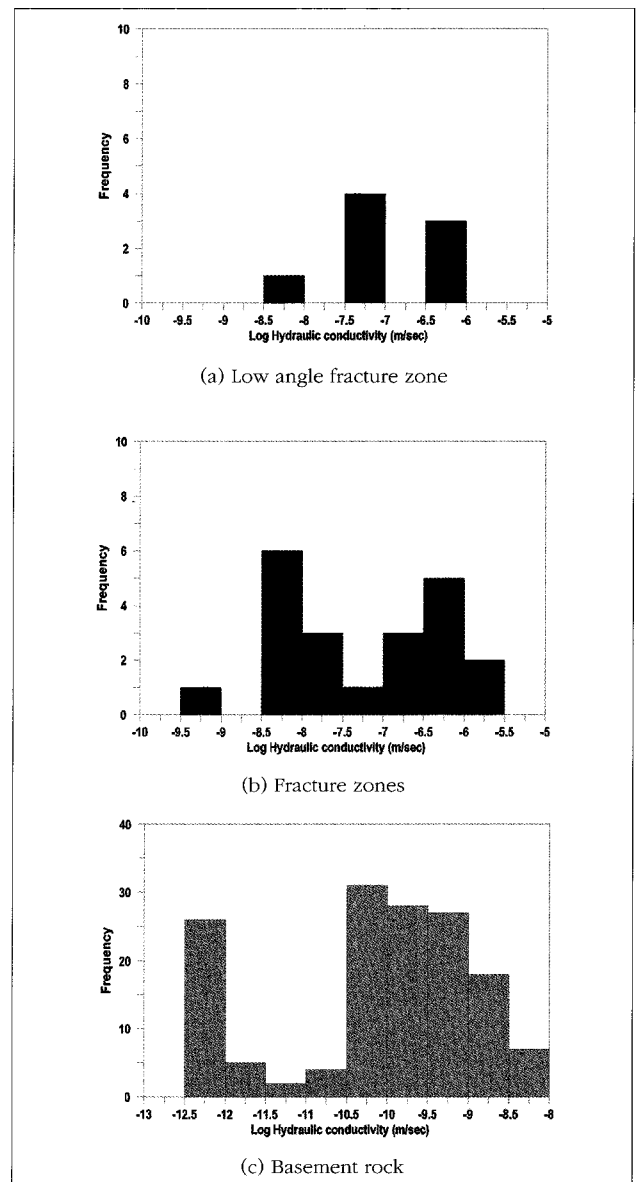


Fig. 6. Histogram of logarithmic hydraulic conductivities obtained from in-situ hydraulic test. The hydraulic conductivities were assigned to geological elements of the geological model.

심부 영역에 존재하는 단열대에 대한 수리전도도를 단열대의 분류 기준을 이용하여 구분한 결과는 다음과 같다. 단열대의 방향성에 따른 수리전도도는 남북 방향의 단열대의 경우, $10^{-7.30}$ m/sec의 평균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-8.31} \sim 10^{-6.29}$ m/sec)을 보이며 분포하고 있으며, 북서방향의 단열대는 $10^{-7.49}$ m/sec의 평균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-8.51} \sim 10^{-6.47}$ m/sec)을 보이고 있다. 그리고, 동서 방향의 단열대는 $10^{-5.79}$ m/sec의 평균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-6.46} \sim 10^{-4.12}$ m/sec)의 범위에 분포하고 있다(Fig. 8). 각 방향의 단열대가 갖는 수리전도도의 통계적 분포 특성을 확인하기 위해 도출된 수리전도도의 대수값을 이용하여 정규성 검정을 실시하였다. 정규성 검정 방법으로 Ryan-Joiner의 검정 방법을 이용하였다[10]. 정규성 검정 결과, 단열대의 방향성으로 구분한 수리전도도 분포가 정규성을 갖는 것으로 분석된다. 하지만, 북서 방향과 동서 방향의 단열대의 경우, 도출된 결과의 개수가 10개 미만으로 적기 때문에, 그 통계적 의미는 연구지역에서 추가적인 수리시험 결과가 도출되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 동서 방향을 갖는 단열대가 다른 단열대에 비해 투수성이 양호할 것으로 분석된다.

단열대의 크기에 따른 수리전도도를 같은 방법으로 분석하였다. 분석결과 국지규모 주요 단열대(local major fracture zone)로 분류되는 단열의 경우, $10^{-7.12}$ m/sec의 평

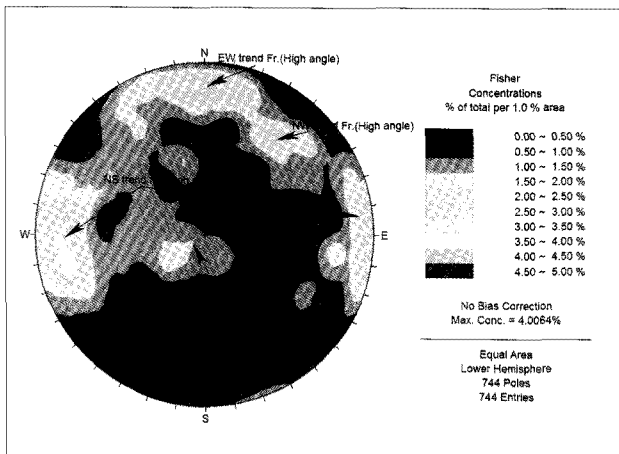


Fig. 7. Orientation of fractures around KURT area. The orientations of fractures were classified into 4 groups (NS, EW, NW, Low angle)[4].

Table 3. Criteria of fracture zone size classification suggested by Andersson et. al (2002)[12]

Class	Length	Width	Geometric description	Hydraulic Behavior
Regional fracture zone	>10 km	>100 m	Deterministic	HCD
Local major fracture zone	1-10 km	5-100 m	Deterministic (with uncertainties)	
Local fracture zone	10 m-1 km	0.1-5 m	Statistical (some deterministic)	
Background fracture	<10 m	<0.1 m	Statistical	

균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-8.11} \sim 10^{-6.13}$ m/sec)을 보이며 분포하고 있으며, 국지규모 단열대(local fracture zone)으로 분류되는 단열대는 $10^{-7.03}$ m/sec의 평균값(표준편차를 이용한 분포 : $10^{-8.06} \sim 10^{-6.00}$ m/sec)을 보여 보다 큰 규모인 국지규모 주요 단열대의 투수성보다 양호한 것으로 분석된다(Fig. 9). 각 크기의 단열대가 갖는 수리전도도의 통계적 분포 특성을 확인하기 위해 도출된 수리전도도의 대수값을 이용하여 정규성 검정을 실시하였다. 정규성 검정 방법으로 마찬가지로 Ryan-Joiner의 검정 방법을 이용하였다[10]. 정규성 검정 결과 단열대의 크기로 구분한 수리전도도 분포는 정규성을 갖는 것으로 분석된다.

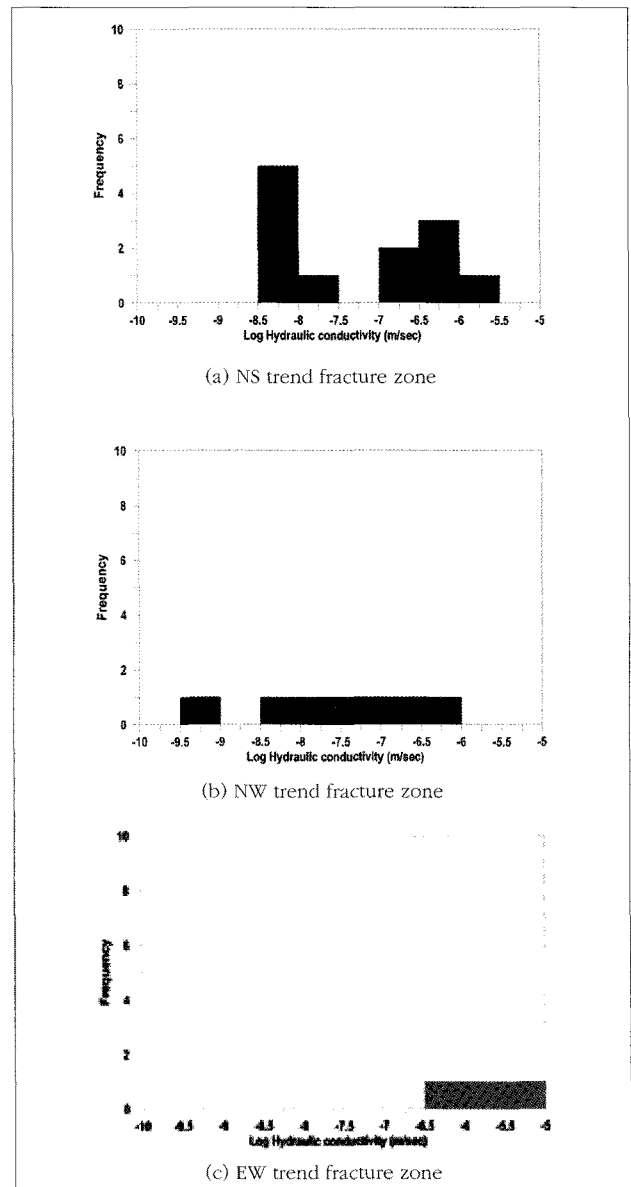


Fig. 8. Histogram of logarithmic hydraulic conductivities obtained from in-situ hydraulic test. The hydraulic conductivities of HCD were classified into the directional trends of fracture zones.

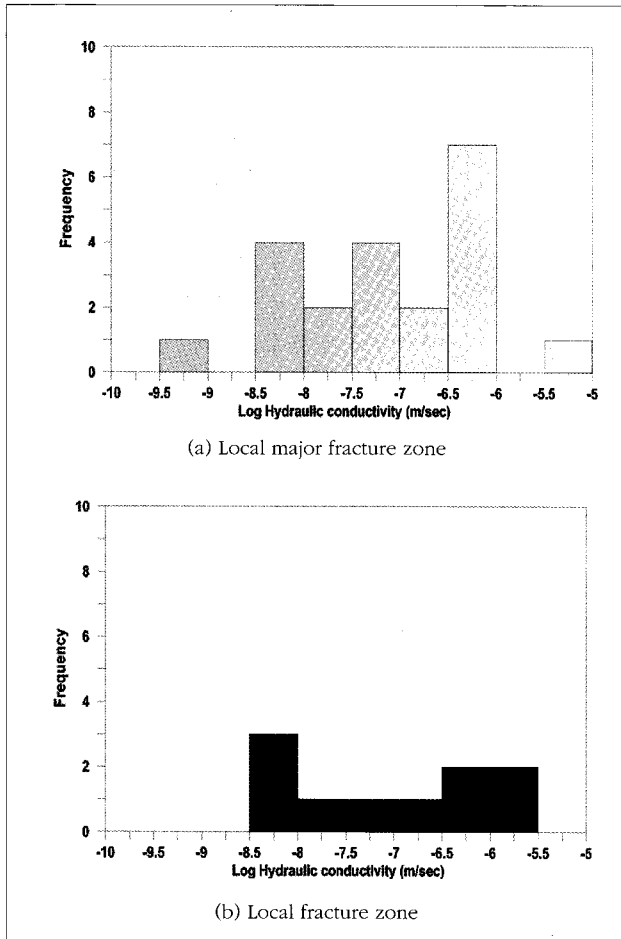


Fig. 9. Histogram of logarithmic hydraulic conductivities obtained from in-situ hydraulic test. The hydraulic conductivities of HCD were classified into the width of fracture zones.

V. 결론

본 연구에서는 KURT 주변 지역의 총 9개의 연구용 시추공에서 현장 수리시험을 이용하여 지하 매질의 수리지질특성을 분석하였다. 현장 수리시험으로 구간별 정압주입시험을 이용하였으며, 시험 결과 도출된 투수량계수로서 매질에 대한 수리전도도를 도출하였다. 구간별 투수량계수는 투수성 구조가 존재하는 구간을 제외하고 $10^{-7.5} \sim 10^{-11}$ m²/sec의 범위 화강암 지역에서의 전형적인 값을 보였다.

지표 지질조사 및 시추공 지질조사를 통해 구분된 상부 토양층 및 풍화대, 저경사단열대, 단열대, 기반암의 4개의 지질모델에 대하여 시추공에서 구간별 도출된 투수량계수를 이용하여 매질의 수리전도도를 산출한 결과, 상부토양층 및 풍화대의 수리전도도는 1.5×10^{-7} m/sec의 값을 보였으며, 저경사단열대는 $10^{-7.00}$ m/sec의 평균값으로 산출되었다.

기반암에 존재하는 단열대는 $10^{-7.16}$ m/sec의 값을 보였으며, 심부 영역에 존재하는 기반암은 $10^{-10.01}$ m/sec을 보여 저경사단열대와 단열대에 비해 현저히 낮은 투수성을 갖는 것으로 분석된다. 각 수리지질모델 요소의 수리전도도의 통계적 분포 특성을 확인하기 위해 정규성 검정을 실시한 결과, 저경사단열대와 심부 단열대의 수리전도도의 대수값은 정규성을 갖는 것으로 분석되지만, 기반암의 수리전도도 대수값은 정규성을 갖지 않는 것으로 분석된다. 이는 10^{-10} m/sec 이하의 저투수성의 기반암에서 수행한 현장수리시험이 정확한 자료를 제시하지 못하고 있거나, 정압주입시험결과 물이 전혀 주입되지 않는 구간에서 10^{-12} m/sec로 수리전도도를 가정하였기 때문으로 분석된다.

심부 영역에 존재하는 단열대가 갖는 수리전도도는 $10^{-6} \sim 10^{-6.5}$ m/sec, $10^{-8} \sim 10^{-8.5}$ m/sec의 범위에서 최고점을 갖는 양봉분포(bimodal distribution)를 보이고 있기 때문에 지질모델에서 단열대를 분류한 기준인 단열대의 크기, 방향성에 따라 수리전도도의 대수값을 구분하여 수리전도도를 분석하였으며, 그 통계적인 특성값을 제시하였다.

특히, 수리지질학적 관점에서 볼 때 저경사 단열이 우세하게 분포하고 있는 영역 저경사 단열대는 수평 방향의 수리전도도가 수직방향의 수리전도도에 비해 큰 값을 보이는 것으로 예측된다. 따라서 현장 수리시험에서 도출되는 수리전도도가 지하수의 2차원적 방사상유동을 가정하여 해석되고 있으므로 저경사 단열이 우세하게 분포하는 영역에 대한 현장 수리시험 결과는 수직 방향의 특성이라기보다는 수평 방향의 수리지질학적 특성으로 해석하는 것이 바람직할 것이다. 이러한 특성은 단열대의 경우에도 마찬가지로 적용할 수 있다. 단열대가 형성된 방향성에 따라 현장 수리시험에서 도출되는 수리전도도는 2차원의 방사상 유동 양상을 보일 것으로 예측되며, 따라서 저경사단열대뿐 만 아니라 단열대에 대해서도 수리지질모델을 구성할 때 수리지질학적 이방성을 고려해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 교육과학기술부 원자력연구개발사업의 지원을 받았음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Hitoshi Koide, Geologic problems of radioactive waste disposal in Japan, Episodes, Vol. 14(3), pp.

299-302 (1991)

- [2] Johan Anderson, JA Streamflow AB, Site descriptive modeling - strategy for integrated evaluation, SKB report R-03-05, SKB (2003)
- [3] 김천수, 배대석, 박현수, 원전수거물 처분장 후보부지 특성 평가 방안, 방사성폐기물학회 추계학술발표회 논문집, 1(2), pp.276-282 (2003)
- [4] 박경우, 고용권, 김경수, 최종원, 지표 조사를 이용한 KURT 주변 지역의 지질모델구축, 방사성폐기물학회지, 7(4), pp.191-205 (2009)
- [5] 박경우, 배대석, 텔레뷰어에서 관찰되는 단열특성과 수리전도도와의 상관관계 분석, 지질학회지, 41(2), pp.269-285 (2005)
- [6] Rh?n I., Follin S., Hermanson J., Hydrological Site Descriptive Model-a strategy for its development during Site Investigations, SKB R-03-08, SKB (2003)
- [7] Barker, J. A., A generalized radial flow model for pumping test in fracture rock, Water Resources Research, Vol. 24, pp. 1796-1804 (1988)
- [8] Kuusela-Lahtinen, A., Niemi, A. and Luukkonen, A., Flow dimension as an indicator of hydraulic behavior in site characterization of fractured rock, Ground water, 41(3), pp. 333-341 (2003)
- [9] Moye, D. G., 1967, Diamond drilling for foundation exploration, Civil Eng. Trans., Institution of Eng., Australia, CE9(1), pp. 95-100 (1967)
- [10] Ryan, Jr. T. A. and Joiner B. L., Normal Probability Plots and Tests for Normality, Technical Report, Statistics Department, The Pennsylvania State University, 13p (1976)
- [11] Anderson, T. W., Darling, D. A., Asymptotic theory of certain "goodness-of-fit" criteria based on stochastic processes, Annals of Mathematical Statistics 23, 193-212 (1952)
- [12] Andersson, J., Berglund, J., Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, SKB, Stockholm (2002)