

## Construction of the Geological Model around KURT area based on the surface investigations

### 지표 조사를 이용한 KURT 주변 지역의 지질모델구축

Kyung Woo Park<sup>1)</sup>, Yong Kwon Koh, Kyung Su Kim and Jong Won Choi  
Korea Atomic Energy Research Institute, 1045 Deadeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon

박경우<sup>1)</sup>, 고용권, 김경수, 최종원  
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045

(Received September 15, 2009 / Revised October 20, 2009 / Approved November 03, 2009)

#### Abstract

To characterize the geological features in the study area for high-level radioactive waste disposal research, KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) has been performing several geological investigations such as geophysical surveys and borehole drillings since 1997. Especially, the KURT (KAERI Underground Research Tunnel) constructed to understand the deep geological environments in 2006. Recently, the deep boreholes, which have 500 m depth inside the left research module of the KURT and 1,000 m depth outside the KURT, were drilled to confirm and validate the results from a geological model. The objective of this research was to investigate hydrogeological conditions using a 3-D geological model around the KURT. The geological analysis from the surface and borehole investigations determined four important geological elements including subsurface weathered zone, low-angled fractures zone, fracture zones and bedrock for the geological model. In addition, the geometries of these elements were also calculated for the three-dimensional model. The results from 3-D geological model in this study will be beneficial to understand hydrogeological environment in the study area as an important part of high-level radioactive waste disposal technology.

**Key words** : high-level radioactive waste disposal, KAERI Underground Research Tunnel, geological model, geological elements, hydrogeological environment

#### 요약

고준위방사성폐기물처분을 위한 부지특성평가 기술을 구축하고, 이를 활용하여 심부지질환경을 이해하기 위해 1997년부터 지금까지 한국원자력연구원 주변 지역을 고준위폐기물처분을 위한 연구지역으로 선정하여 다양한 지질 관련 연구를 수행해왔다. 특히, 2002년에는 고준위폐기물의 처분 대상 심도의 시추공(지하 500 m)을 굴착하였으며, 2006년에는 지하처분연구시설(KURT, KAERI Underground Research Tunnel)을 준공

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

하여 연구지역에 대한 심부지질환경 규명을 위해 노력하고 있다. 현재, 지하처분연구터널의 좌측 연구용 모듈 내에 500 m 길이의 장심도 시추공 및 지하처분연구시설에서 남쪽으로 약 200 m 이격된 위치에서 1,000 m의 장심도 시추공에서 다양한 부지특성평가 연구를 수행 중에 있다. 본 연구는 고준위폐기물의 심지층 처분을 위한 요소기술인 심부영역의 부지특성평가기술을 구축하기 위해 수행되었으며, 수리지질학적인 관점에서 부지특성평가의 기본 모델이 되는 3차원 지질모델을 구축한 내용이다. 연구지역에서 수행된 지표 지질 조사와 시추공 자료를 이용하여 종합 분석한 결과, 수리지질학적 관점에서 중요한 풍화대, 상부 저경사단열대, 심부 영역에 존재하는 결정론적 단열대를 규명하여 3차원으로 모형화하였으며, 향후 본 연구를 통해 도출된 지질요소의 수리지질특성을 평가하여 고준위방사성폐기물처분 분야에 중요한 기술인 심부 영역의 수리지질환경을 이해하는데 활용될 예정이다.

**중심단어** : 고준위폐기물처분, 지하처분연구시설, 지질모델, 지질요소, 수리지질환경

### 1. 서론

원전에서 발생되는 폐기물은 그 형태에 따라 기체, 액체, 고체의 세 가지로 나눌 수 있는데, 이중 기체 폐기물은 일단 밀폐 탱크에 저장한 후 방사능 기준치 이하로 떨어지면 고성능 필터를 거쳐 대기로 내보내게 된다. 액체 폐기물은 저장조에 모았다가 증발 장치를 이용해 깨끗한 물과 찌꺼기로 분류한 후 물은 재사용하고, 찌꺼기는 안정된 고화체로 만들어 철제 드럼에 넣어 밀봉해 저장하고 있으며, 고체폐기물은 압축하여 철제드럼에 넣어 밀봉한 상태로 발전소 내 저장고에 저장한다. 상기의 처리 과정에 따라 적절하게 처리된 방사성폐기물은 현재 원전부지 내 임시저장고에 안전하게 저장되어 있지만 최종적으로는 특정한 장소에 영구적으로 처분 되어야 한다<sup>1)</sup>. 방사성폐기물의 영구 처분이란 향후 폐기물을 회수하여 사용하지 않도록 특정한 장소에 방사성폐기물을 처분하여 인간과 자연생태계로부터 영구히 격리 시키는 것을 의미한다. 일반적으로 방사성폐기물의 처분은 방사성폐기물이 발생된 국가에서 자국 처분을 원칙으로 하고 있으며, 처분 방식으로 우주처분, 해양처분, 극지 처분 등 다양한 처분 방식이 제시되었지만 그 중에서 지층처분이 처분 안전성을 고려할 때 방사성폐기물의 처분에 가장 적합한 것으로 권장되고 있다<sup>2)</sup>. 국내에서도 최근 그동안 원자력발전소 내에 임시로 저장해 온 중저준위 방사성폐기물의 처분을 위한 지층처분장 부지로 경주시 양북면으로 선정하였으며, 이 지역에서 중저준위 방사성폐기물의 지층처분장 (월성 환경관리센터)을 건설 중에 있다<sup>3)</sup>.

방사성폐기물처분장에서의 방사선적 안전성 확보의 최종 목표는 인간 생활권에 유해하지 않을 정도의 준위로 핵종 누출을 봉쇄하거나 지연시키는 것이며, 이를 위해 공학적 방법과 자연방법으로 구성된 다중 방법을 이용한다. 결정질 암반으로 구성된 자연방법에서는 거의 불투수성인 암반의 매질 (rock matrix)이 아니라 암반에 분포하는 단열 (fracture) 또는 단열대 (fracture zones)가 지하수 유동로의 잠재성을 지니게 되는데, 핵종은 이러한 지하수를 따라 처분장으로부터 이동되어 인간 생활권으로 도달하게 된다. 따라서, 방사선적 안전성 평가 중 지하수에 의한 핵종의 이동이 가장 주요하게 고려되고 있다. 즉, 방사성폐기물의 처분 안전성과 관련하여 처분 영역으로부터 생태계까지의 지하수 유동 경로에 대한 연구가 선행되어야 하며, 조사지역에서 잠재적 지하수의 유동로를 규명하는 지질구조 모델 (지질모델)을 우선적으로 도출해야 한다. 또한, 구축된 지질모델을 기준으로 다양한 현장 조사를 수행하여 수리지질모델, 지화학모델 및 지질역학모델 등의 부지특성모델을 구축할 수 있다. 이러한 일련의 단계적 모델 구축 과정을 부지특성평가라고 정의하며, 부지특성평가는 방사성폐기물의 지층처분을 연구하거나, 처분부지를 선정하는 과정에서 반드시 수행해야 하는 필수적인 요소이다.

부지특성조사는 지상 시설물을 건설하거나, 지하 공동을 건설하여 부지를 직접 이용하는 과정에서 사전에 수행해야 하는 부지특성평가를 위한 현장 조사로 정의할 수 있다. 현재 도로 터널 및 석유저장탱크, 지하유류/가스 비축기지 등의 지하 공간의 활용이 늘어남에 따라 부지특성조사의 중요성은 그 안전성평가 차원에서 확대되고 있다. 특히, 방사성폐기물의 지층처분과 관련하여 지하 환경을 정확하게 이해하고 처분장 건설 안전성 및 처분 안전성의 제고를 위해서 부지특성 조사가 반드시 선행되어야 한다. 선진국의 경우, 지상 혹은 지

1) <http://www.khnp.co.kr>  
 2) <http://www.numo.or.jp>  
 3) <http://www.krmmc.or.kr>

하 시설물의 건설 전 부지특성 조사에 상당한 시간과 비용을 투자하고 있으며, 건설 중에도 추가 조사의 결과를 이용하여 좀 더 정확한 부지의 지질환경에 대한 이해를 하고 있다. 그러나, 국내의 경우 부지특성조사가 지상 혹은 지하 시설물의 건설 과정에서 생략되거나 부분적인 조사만을 수행하는 등 이에 대한 중요성이 과소평가되고 있다.

한국원자력연구원은 부지특성조사 기술을 구축하고, 이를 활용하여 지하 심부 환경을 이해하기 위하여 1997년부터 지금까지 한국원자력연구원 주변 지역을 고준위폐기물처분을 위한 연구지역으로 선정하여 다양한 지질 관련 연구를 수행해왔다. 한국원자력연구원은 특히, 2002년에는 고준위폐기물의 처분 대상 심도의 시추공 (지하 500 m)을 굴착하였으며, 2006년에는 지하처분연구시설 (KURT, KAERI Underground Research Tunnel)을 준공하여 고준위방사성폐기물 처분을 위한 부지특성평가기술의 확보를 위해 노력하고 있다 (Figure 1)[1,2]. 현재 지하처분연구시설의 좌측 연구 모듈에서 500 m 길이의 시추공을 굴착하였으며, 약 200 m 남쪽으로 이격된 위치에서 1,000 m의 신규 장심도 시추공을 굴착하여 처분대상심도 (지하 500 m) 영역의 지질특성, 암석·광물학적 특성,

지하수의 지화학적 특성 및 수리지질특성 등 고준위폐기물의 심지층처분연구에 필요한 부지특성연구를 수행 중에 있다 (Figure 2).

본 논문은 2005년까지 한국원자력연구원의 연구지역에서 수행된 부지특성조사 결과를 분석하여 작성되었으며, 지표 지질조사 및 시추공 지질조사 결과에 근거하여 지하수의 유동 경로가 될 수 있는 결정질 암반에서 투수성 영역을 도출하기 위해 수리지질학적 관점에서 연구지역의 지질모델에 입력될 지질요소를 제시하고자 한다.

## II. 연구지역

### 가. 연구지역의 지형 및 지질

연구지역은 행정구역상 대전광역시 유성구 덕진동에 해당한다. 유성지역은 서울에서 남쪽으로 약 150 km 지점에 위치하며 금강을 경계로 충청북도 및 충청남도와 접경을 이루고 있다. 연구지역을 광역적으로 보면 서쪽으로는 가장 높은 계룡산이 존재하고 계룡산 줄기를 능선으로 공주시와 접하며, 갑천이 서남쪽에서 북동쪽으로 흐른다. 유성지역은 경기변성암 복합체 내에 위치하며 주로 선캠브리아기의 편마암류와 중생대의 심성암과 맥암류로 구성되어 있다 (Figure 3). 선캠브리아기의 변성암류는 흑운모 편마암 및 편암으로 나뉘어지며 이들은 시추 지점의 북서부에 주로 분포한다. 주로 구성하고 있는 심성암류는 크게 시대 미상의 편상화강암과 연구지역 전범위에 걸쳐 광범위하게 분포하는 복운모화강암으로 나뉘어진다. 이 중 복운모 화강암이 편상화강암을 관입하고 있

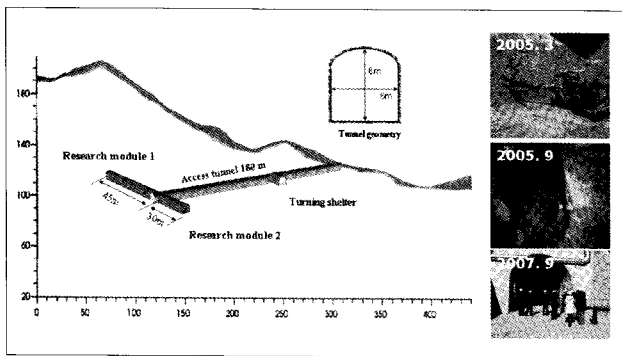


Fig. 1. The layout of the KURT and photos showing its construction process.

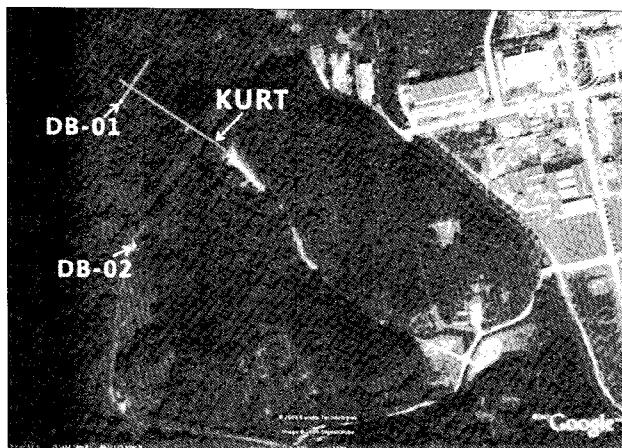


Fig. 2. The location of the KURT and deep boreholes around the KURT.

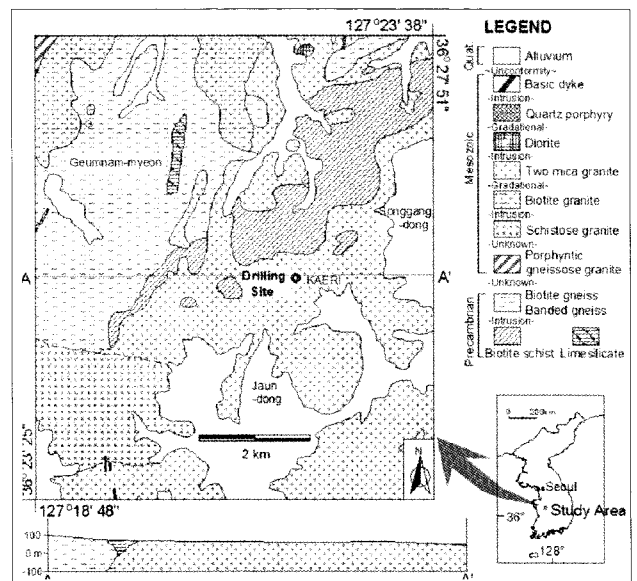


Fig. 3. Geologic map of the study area[7]. Study area is located in the northern part of Daejeon.

는 것으로 알려져 있다. 대전도폭에서는 편상화강암을 주라기의 편마상 화강암으로 기재하였고, 복운모화강암과는 동일마그마에서 유래된 것으로 기재하였다[3]. 이들은 중립질로서 편리의 방향이 주변의 변성퇴적암류의 편리방향과 일치한다. 또한 연구지역 외곽부에는 중생대 심성암류가 시대미상의 변성퇴적암류를 관입하고 있다[4]. 4기 층적층이 수계를 따라 3 m~11 m의 두께를 보이면서 매우 광범위하게 분포하고 있다 (Figure 3)[5].

**나. 연구지역의 규모 정의**

일반적으로 연구지역의 규모를 정의할 때에는 지하수의 유동 양상에 근거하여 모델 영역을 광역, 국지, 부지, 암반블록으로 규모별 분류를 하며, 연구지역에 대한 규모별 분류는 부지 고유의 지하수 유동체계와 관련된다[6]. 본 논문에서 이용된 연구지역에 대한 규모 분류에서 광역 규모의 모델은 연구지역을 포함하여 수십 km<sup>2</sup>의 크기로 보다 작은 영역인 국지규모의 지하수 유동에 대한 경계를 구분하거나 경계조건을 제시하기 위해 설정하는 영역으로 정의되며, 국지 규모는 관심이 되는 지하수 유동 시스템의 배출 영역 (discharge area)과 함양 영역 (recharge area)을 포함하는 영역으로 연구지역을 흐르는 지하수 시스템을 이해하기 위한 목적으로 설정되었다 (Figure 4). 부지 규모의 영역은 국지 규모의 한 부분으로 보다 상세한 수리지질 현상과 지하수 유동 시스템을 이해하기 위해 설정하였으며, 블록 규모의 영역은 부지 규모의 작은 한 부분으로 지하수 유동과 관련하여 연구지역에 존재하는 투수성 단열의 수리특성을 확인하고 대표성을 갖는 수리지질인자를 제시하기 위한 가장 상세한 수리지질 현상을 이해를 목적으로 구분하였다. 고준위폐기물처분연구와 관련된 연구지역에 대한 규모별 수리지질모델의 목적 및 공간적 규모는 Table 1과 같다.

본 연구에서는 선형구조 분석이 수행된 국지 규모 영역과 지구물리탐사 및 연구용 시추공이 굴착된 부지 규모의 영역

을 이용하였다. 국지 규모의 영역을 설정하기 위하여 광역 규모의 지하수 유동 모델링을 통해 연구지역의 무유량 경계 (no flow boundary condition)의 영역을 이용하였으며, 부지 규모는 국지 규모의 한 부분으로 연구지역에 대한 상세 현장 조사가 수행되었던 부분을 포함하여 구성하였다 (Figure 5).

**다. 시추공의 위치**

고준위방사성폐기물 처분을 위한 심부지질환경 특성 연구의 일환으로 한국원자력연구소내 부지에 16개의 시추공을 굴착하였다 (KURT의 압력모니터링용으로 이용된 TB관정군 제외). 시추공의 위치 및 굴착심도에 따라 BH와 YS, KP관정군 및 DB관정으로 분류하였는데, BH 관정군 (BH-2, BH-3, BH-4, BH-5, BH-6)은 천부 지하수의 수리특성 조사를 위해 지하 100 m 이내의 깊이로 굴착되었고, YS 관정군 (YS-1, YS-2, YS-3, YS-4, YS-5, YS-6, YS-7)은 심부 지질 특성 및 심부 지하수의 수리특성 조사를 위해 지하 200 m~500 m의 깊이로 굴착되었다. 또한, KURT가 건설되기 전 부지 조사를 위하여 KURT 입구에 수직 방향으로 KP-02시추공을 굴착하였으며, 평행한 방향으로 KP-01시추공을 굴착하였다. 이외에 지하처분연구시설내부에 수두압 모니터링을 위해 단심도 TB관정군 (20 m~50 m)을 굴착하였으며, 처분 대상 심도

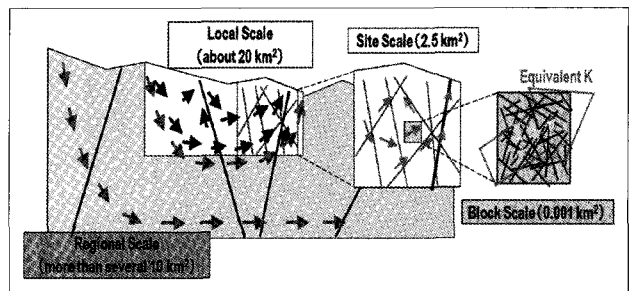


Fig. 4. Schematic diagram showing groundwater flow at each spatial scale around the KURT area.

**Table 1. Classification of spatial scales for geologic model around KURT.**

	Aim	Spatial scale
Regional Scale	To set the modeling area and boundary conditions of Local Scale model	H: Several 100 km <sup>2</sup> V: Top to EL-10 km
Local Scale	To understand hydrogeological conditions and GW flow in the whole of the targeted GW flow system from recharge to discharge area	H: About 20 km <sup>2</sup> V: Top to EL-2 km
Site Scale	To understand hydrogeological conditions and GW flow at the part of the Local Scale area (in/around KURT Site)	H: About 2.5 km <sup>2</sup> V: Top to EL -1 km
Block Scale	To understand hydrogeological conditions and GW flow at the part of the Site Scale area (around KURT) To up-scale hydrogeological conditions to Site Scale model	About 0,001 km <sup>2</sup>

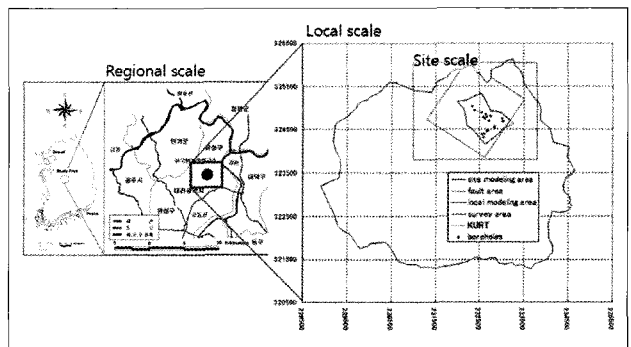


Fig. 5. Areal scale of the study area. Local scale area was selected based on the groundwater dividing line in underground.

이상 (500 m 이상)의 지하에 대한 지질, 수리지질 및 지화학 특성을 파악하기 위해 장심도 시추공인 DB-01 (심도 500 m) 와 DB-02 (심도 1,000 m) 시추공을 2008년과 2009년에 각각 굴착하였다 (Figure 6). 이들 시추공에서 시간별 지하수위 및 지하수 화학특성 자료를 관측하고 있으며, 각 시추공에서 다양한 현장 수리시험이 수행되었다. 특히, YS-1, YS-4, YS-7 시추공에는 Multi packer system (Westbay Co.)을 설치하여 구간별 수두압력 변화 및 지하수 화학특성 변화를 지속적으로 관측하고 있다[7].

본 연구는 지하처분연구시설 주변 지역의 시추공을 대상으로 수행하였으며, 위에서 나열한 시추공 자료 중 시추공 초음파주사검층 자료가 확보된 9개의 시추공을 대상으로 수행한 결과이다 (Table 2).

### III. 연구 방법

연구지역의 상부 토양층 및 풍화대에 대한 깊이는 지표 지구물리탐사 결과 및 시추공 조사 자료를 이용하여 분석하였다. 지표 지구물리탐사는 지하처분연구시설 주변 지역의 상부 풍화대 및 심부의 단층 및 단열대를 예측하기 위한 목적으로 전기 비저항 탐사와 탄성과 탐사를 수행하였으며 (Figure 7(a)), 탐사 결과 자료의 이상대를 구분하여 상부 토양층과 풍화대를 포함하는 깊이를 예측하였다. 시추공 조사는 시추코어 조사, 시추공 상부의 초음파주사검층 결과를 이용하여

시추공별 상부 토양층 및 풍화대를 예측하였다 (Figure 7(b)).

연구지역의 기반암에 대한 단열대 및 단층을 분석하기 위하여 3단계 해석을 수행하였다. 먼저, 지표 조사의 일환으로 지하처분연구시설 주변 지역에 대한 선형구조 분석 및 지표 지구물리탐사 결과를 분석하였다. 선형구조 분석과 지표 지구물리탐사 결과를 활용하여 지하처분연구시설 주변 지역의 개념적 지질구조를 이해하고, 예상 단열대 혹은 단층의 위치와 방향성을 예측하였다. 다음으로 시추공 단열 조사를 수행하였는데, 시추공 단열 조사는 시추공 초음파주사검층 결과를 이용하여 개개 단열을 도출하고, 통계적 방법으로 연구지역 고유의 단열대를 정의하였다. 이 결과를 활용하여 각 시추공별로 존재하는 단열대를 구분하였고, 단열대의 폭 (width) 및 방향성을 분석하였다. 마지막으로 첫 번째 단계에서 수행된 선형구조 분석 및 지표 지구물리탐사 결과와 두 번째 단계에서 수행된 시추공 단열 분석 결과를 종합하여 연구지역의 지질모델을 구성하였다.

### VI. 연구 결과

#### 가. 지표 지질조사

##### ① 선형구조 분석

일반적으로 “선형구조선 (lineaments)”은 지하의 지질구조가 지표로 연장되어 광역적 규모에서 지표에 직선적이거나 약간 구부러진 형태의 선으로 나타나는 것으로 정의한다. 선형구조선에 대한 연구는 1980년대부터 시작되었으며, 지질분야에서는 수치지형도 및 인공위성영상에서 관측된 선형구조선들이 실제 지표에서 나타나는 단층 혹은 단열대의 방향성과는 차이를 보이고 있으나[8], 인접한 표면 및 천부 지형요소와 구분이 분명한 단층, 파쇄대, 차별침식에 의해 형성되는 파쇄대에 대한 정보를 제공하므로 이에 대한 활용 빈도가 급속히 증가되고 있다[9]. 근래에는 선형구조선의 분석은 판구조 해석, 지질조사, 광상탐사, 지질재해 발생 가능성 예측, 활성단층 조사, 대형 인공구조물 설치 부지의 지반조사 등에서

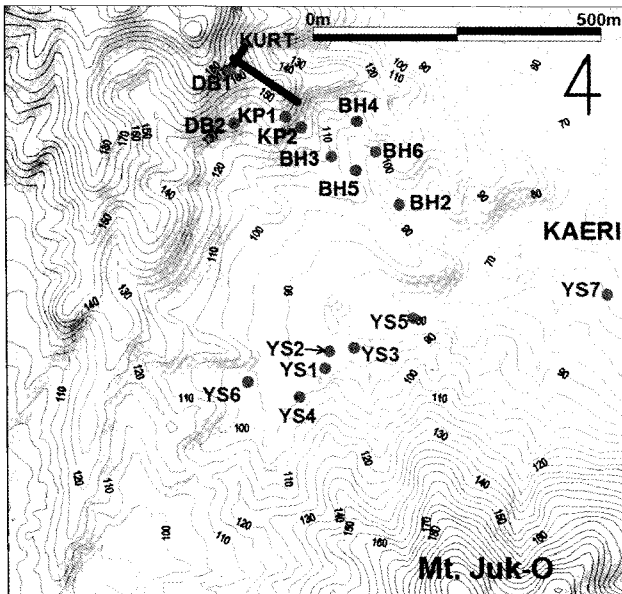
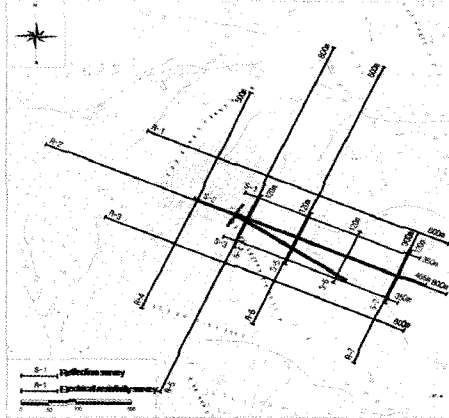


Fig. 6. Locations map of the boreholes. Total 16 boreholes were drilled at the study area and grouped into 4 well fields (YS, BH, KP, DB well fields). In this study, YS1~YS7 borehole and KP1, 2 borehole data were used for construction of geological model.

Table 2. Descriptions of boreholes in the study area.

	X coord.	Y coord.	Length	Elevation (EL, m)	Size	Inclination
YS-6	232538	324396	500	94	NX(3")	85/145
YS-4	232589	324401	350	91	NX(3")	Vertical
YS-1	232658	324462	500	82	NX(3")	Vertical
YS-2	232664	324474	200	81	NX(3")	Vertical
YS-3	232674	324472	300	81	NX(3")	Vertical
YS-5	232827	324529	210	80.5	NX(3")	85/28
YS-7	233018	324681	400	56	NX(3")	85/330
KP-1	232535	324898	250	120	NX(3")	05/304
KP-2	232539	324892	160	120	NX(3")	Vertical

Location of geophysical survey line

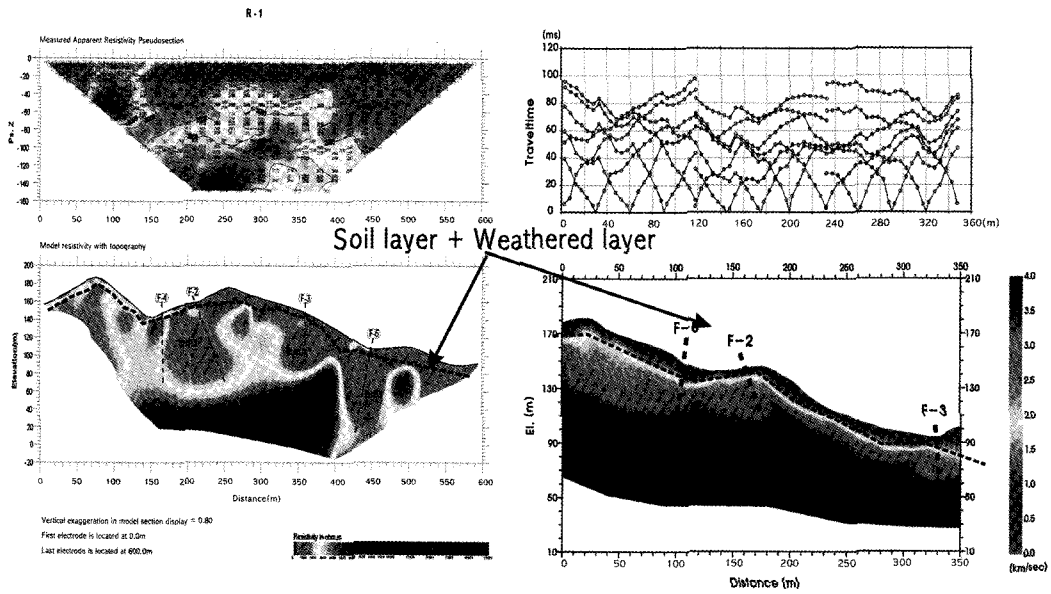


• Electrical resistivity survey

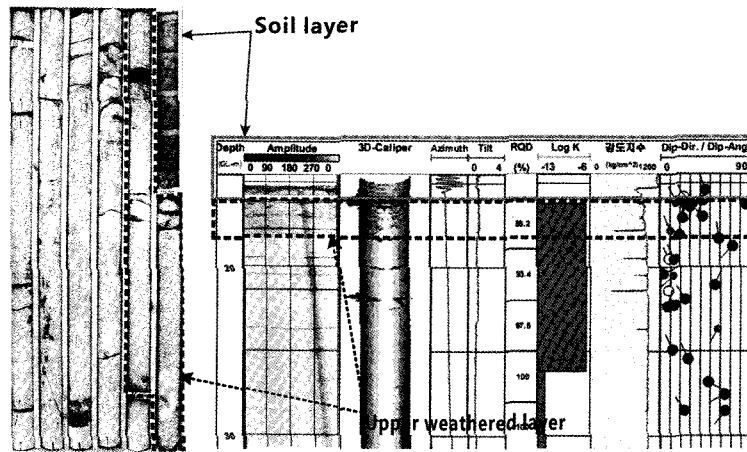
Line	Orientation	Distance bt. sondes		Distance
		P1-P2(m)	C1-P1(m)	
R-1	N66° W	10-140	10-360	600
R-2	N66° W	10-100	10-500	800
R-3	N66° W	10-140	10-360	600
R-4	N24° E	10-70	10-250	500
R-5	N24° E	10-100	10-500	800
R-6	N24° E	10-140	10-360	600
R-7	N24° E	10-60	10-200	300

• Reflection survey

Line	Orientation	Sonde length	Distance
S-1	N66° W	5.0	350
S-2	N66° W	5.0	465
S-3	N66° W	5.0	350
S-4	N24° W	5.0	120
S-5	N24° W	5.0	120
S-6	N24° W	5.0	120
S-7	N24° W	5.0	120



(a) Results of Geophysical surveys. The anomalies of electrical resistivity survey results were used for detecting the soil and weathered layer.



(b) Core logging and borehole televiwer image. Core photos were compared with borehole televiwer images to determine the depth of soil and weathered layer in each borehole.

Fig. 7. Methodology to confirm the weathered zone in the study area.

중요한 고려 요소가 되고 있다. 즉, 선형구조선은 단층, 파쇄대, 층리, 지질경계, 주절리 등과 같은 지하의 지질구조 요소를 파악하기 위한 매우 중요한 지시자로 이용된다.

본 연구에서는 한국원자력연구원내에 건설된 지하처분연구시설을 기준으로 수리지질학적 시스템을 고려하여 국지영역과 부지영역으로 영역 구분을 실시하였으며, 각 영역에서 수치지형도의 고도자료를 이용하여 연구지역 주변의 선형구조선 발달 양상을 파악하고, 연장길이 및 빈도수에 대하여 통계 분석을 수행하였다.

- 국지 영역

연구지역의 국지 규모의 영역에서 수치 지형도 (1:50,000)를 이용하여 선형구조 분석을 수행하였다. 수치 지형도에 제시된 고도로 구성된 현재의 3차원 지형을 이용하여 선형구조를 분석한 결과 총 88개의 선형구조가 도출되었다. 선형구조의 주방향은 남북 방향이 우세하였으며, 북서 방향의 선형구조가 2차 그룹을 형성하였다. 선형구조는 지하의 지질구조가 지표로 연장되어 구분되는 것으로 정의되므로 과거의 지형과 시간에 따른 지형의 변화를 3차원 형태로 구현한다면 선형구조로서 지하의 지질구조를 더 자세히 관측할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 현재 지형도를 기준으로 공간 영역에 대한 격자 (20 m, 40 m, 80 m 공간 간격)를 구성하고 각 격자에 해당되는 현재 지형의 최고점을 격자의 고도로 설정하는 접봉도면 (summit level map)을 이용하여 침식 및 풍화작용을 받기 이전의 과거의 지형을 가상적으로 구현하였으며, 이를 활용하여 선형구조를 분석하다. 접봉도면으로 선형구조를 분석한 결과 총 65개의 선형구조가 도출되었는데 도출된 선형구조의 주방향은 남북 방향이 우세하였으며, 동서 방향의 선형구조가 2차 그룹을 형성하였다 (Figure 8).

국지영역의 선형구조를 분석한 결과 연구지역에서 관측되는 선형구조는 주로 남북 방향의 주향을 나타내었으며, 북서 내지 동서 방향의 선형구조가 분포하는 것으로 분석되며, 선형구조의 길이는 일반적인 선형구조의 흔적길이의 분포 형태인 대수정규분포를 보였다.

- 부지 영역

연구지역의 부지 규모 선형구조 분석은 1:5,000의 수치지형도를 이용하였다. 수치지형도의 X,Y,Z 좌표를 이용하여 현재의 지형을 구성하고 지형에 따른 선형구조 분석을 실시하였다. 또한, 국지 영역의 선형구조 분석에서 수행된 바와 같이 20 m, 40 m, 80 m 공간 간격의 접봉도면을 구성하여 연구지역의 침식 이전의 가상의 지형을 구현하였다. 부지 규모의 선형구조 분석을 종합해 보면 연구지역에서는 남북 방향의 선형구조가 주방향을 이루며, 추출된 선형구조는 일반

적인 선형구조의 분포 형태인 대수정규분포를 이루는 것으로 분석되었다 (Figure 9).

② 지표 지구물리 탐사

지하처분연구시설 주변 지역의 부지 규모에 대한 지질구조를 예측하기 위해 굴착된 시추공 및 주변 지역에서 지표 지구물리탐사를 수행하였다. 지표 지구물리탐사는 전기비저항 탐사와 굴절법탄성과 탐사를 이용하였으며 총 14개의 측선 (총 연장길이 5,845m)에서 지표 지구물리 탐사를 수행하였다. 지표 지구물리 탐사 결과 연구지역의 부지규모에서 총 7개의 지구물리 자료에 대한 이상대가 관측되었으며, 이를 선상으로 연결하였을 때, 남북 방향의 방향성을 갖는 것으로 분석된다 (Figure 10).

나. 시추공 지질조사

① 시추공 단열 조사

연구지역에 굴착된 총 9개의 시추공에서 도출된 시추공 초음파주사검층 자료를 이용하여 단열대 분석을 실시하였다. 먼저, 시추공 초음파주사검층 결과를 이용하여 시추공별로 단열에 대한 분포를 깊이별로 도출하고, 깊이별 단열 정보를 이용하여 통계 분석을 수행하였다. 그 결과를 활용하여 단열대를 정의하고 이를 시추공별로 구분하였다 (Table 3). 시추공 별로 확인된 단열대는 다시 시추코어 분석을 통해 기반암에 존재하는 미세 단열과 단열대에 존재하는 단열을 구분하여 단열대를 재분석 하였다. 시추공별로 구해진 단열대의 폭은 또한, 시추공 초음파주사검층 결과 및 시추코어 분석에서 각 단열대의 주요 단열을 분석하여 단열대의 경사 방향을 도출함으로써 시추공에서 판단되는 단열대의 폭을 최종적으로 구하였다. 이렇게 분석된 단열대의 방향성과 폭은 분류 기준을 설정하여, 각 시추공 별로 존재하는 단열대를 분류 기준에 맞게 정의하였으며, 이를 최종적으로 지질모델에 반영하였다.

시추공 초음파주사검층 결과를 이용해 각 시추공에서 관측되는 단열에 대하여 단열의 빈도 분석 (frequency analysis) 및 공간 분석 (spacing analysis)을 실시하였다. 단열의 공간 분석은 단열과 단열 사이 거리를 계산하는 방법을 이용하였으며, 단열 사이의 공간에 대한 누적밀도함수를 구함으로써 단열대를 구성하는 단열에 대한 통계적인 기준으로 설정하기 위한 주요 인자가 된다. 단열의 빈도는 3차원의 공간적인 단열의 밀도를 1차원의 시추공의 단열 개수를 이용하여 추론할 수 있는 주요 인자가 될 수 있으며, 또한 단열 빈도 분포를 이용하여 단열대가 갖는 단열의 개수를 개략적으로 예측하는 주요 인자가 될 수 있으므로 단열 암반에서

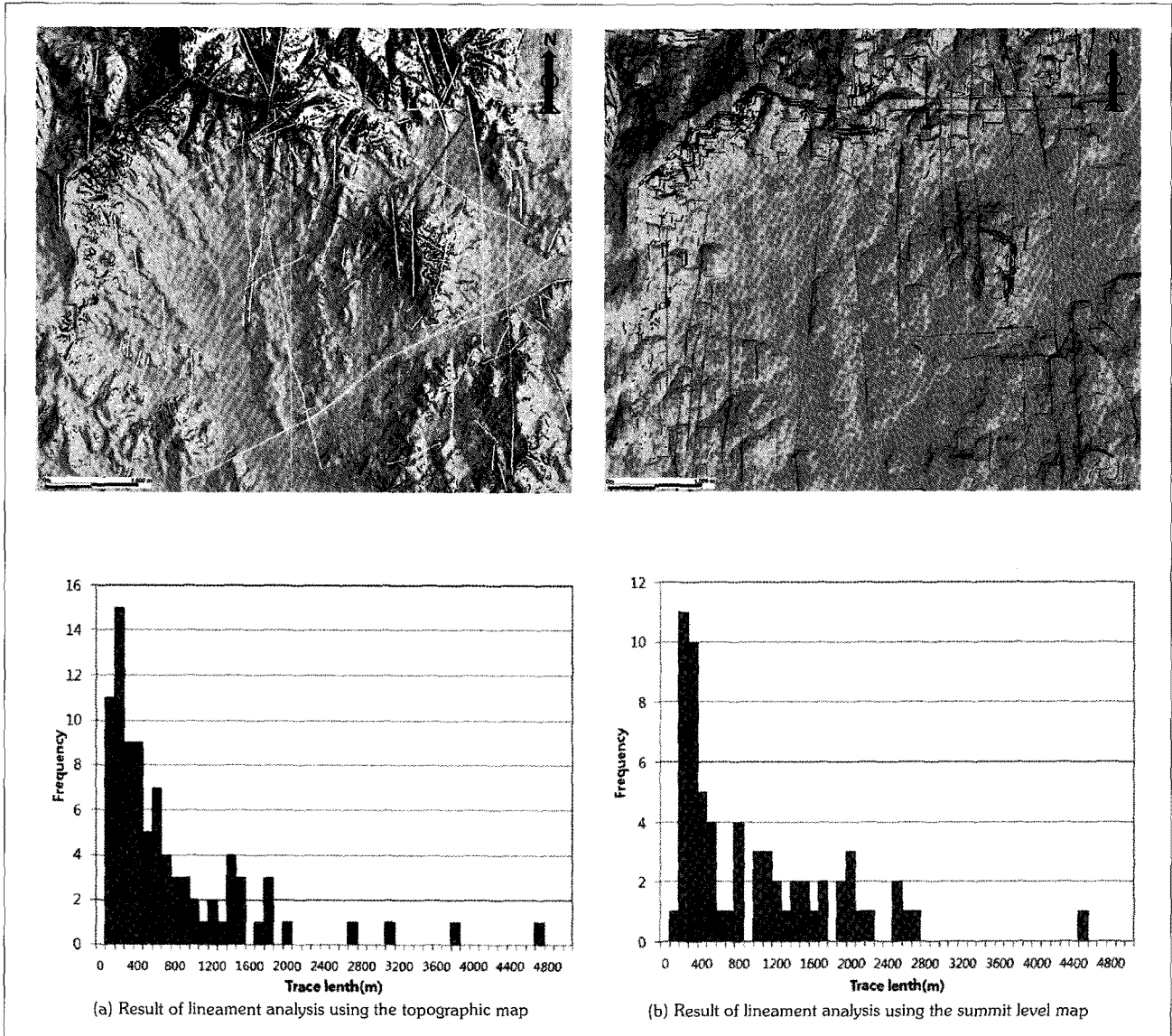


Fig. 8. The results of lineament analysis in the local scale.

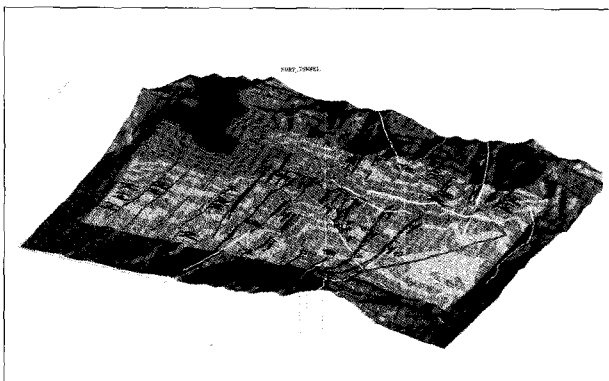


Fig. 9. The result of lineament analysis in the site scale area.

단열망 모델링을 수행할 때 주요한 인자로 분류 된다[10].

단열의 공간 분석 결과, 누적밀도함수를 이용하여 그 기울기로 단열대를 분류하는 데에 이용하였다. 본 연구지역에서 수행한 단열의 공간 분석에서 단열사이의 간격이 0.2 m를 기준으로 누적밀도함수의 기울기가 현저히 변하며, 이를 기준으로 단열사이의 간격이 0.2 m 이하의 구간을 단열대로 분류하였다. 이는 단열의 빈도 분석에서 단위 길이 (1 m) 당 5개 이상의 단열이 존재하는 구간을 의미하며, 단열 빈도 분석 결과를 기준으로 단열대의 구간을 선정하는 데에 기준으로 활용되었다 (Figure 11).

연구지역의 시추공에서 관측된 단열의 통계 분석 결과는



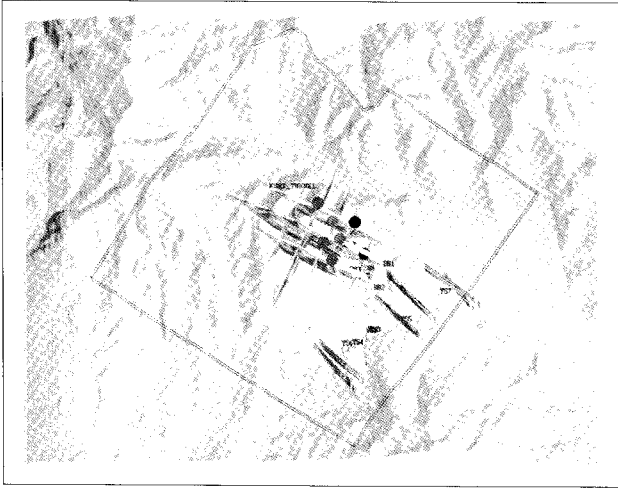


Fig. 10. The result of geophysical investigation for fracture zone analysis. The anomalies from an electrical resistivity survey were indicated the fractures zone around the KURT area.

Figure 12과 같다. 단열의 빈도는 시추공 초음파주사검층 결과 관찰되는 단위 길이 당 단열의 개수에 근거하였는데, Figure 12에 단위 길이 당 단열의 개수 및 단열의 누적 개수를 도시하였다. 단열 통계 분석 결과 연구지역의 시추공인 YS 관정군과 KP-1, KP-2 관정에서 다수의 단열대가 존재하는 것으로 판단되며, 예측된 단열대를 시추공별로 구분하였으며, 투수성 구조로 고려되는 주요 개구성 단열에 대해서 같은 방법으로 도시하였다. 각 시추공별 단열대를 종합한 결과는 Table 3과 같다.

② 단열대 분류

- 단열대 분류 기준

- 크기

지구조적 활동에 의해 생성된 단열은 개개의 단열이 독립적으로 존재하는 단열대를 구성하게 된다. 지구조모형을 구

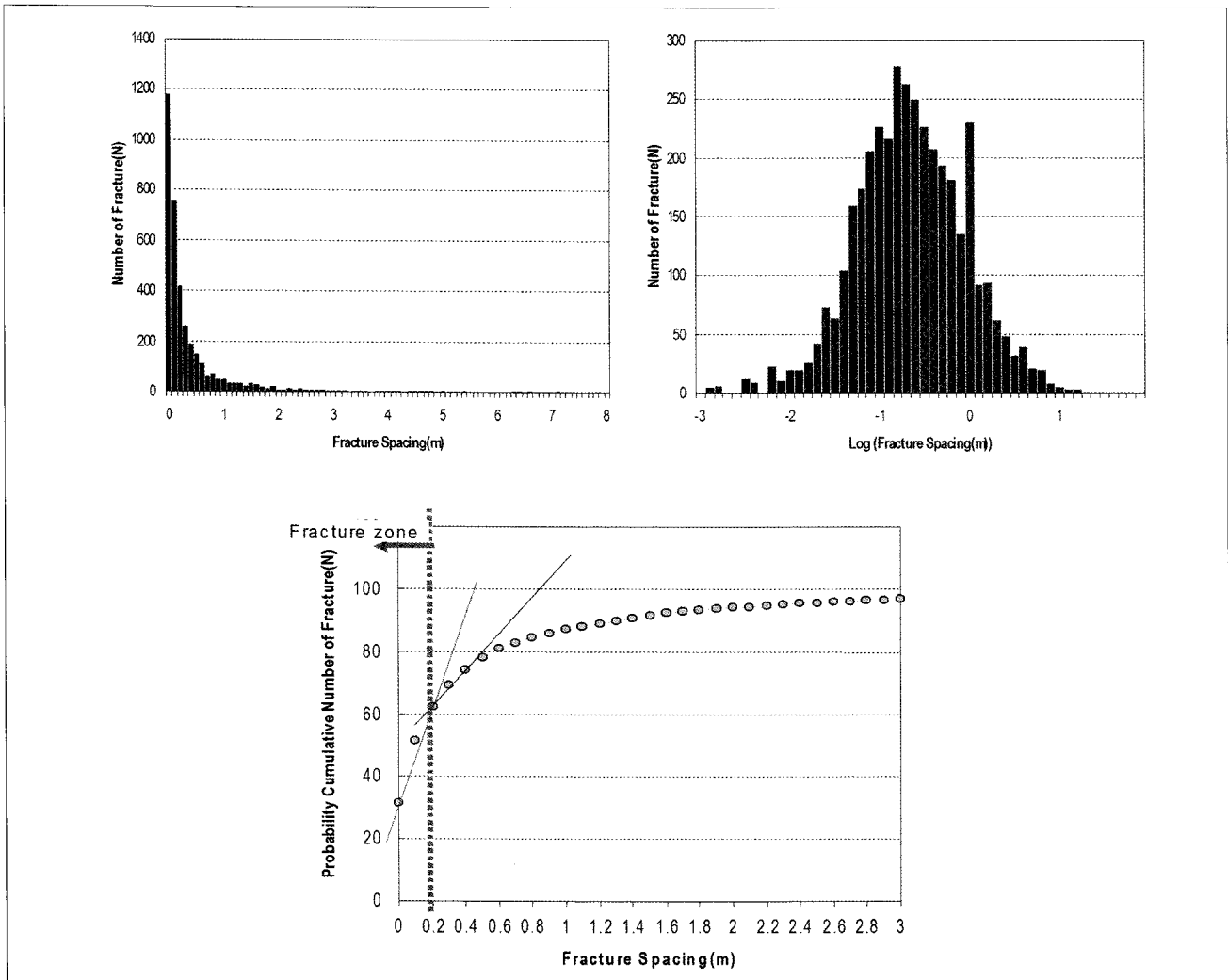


Fig. 11. The result of fracture spacing analysis in whole borehole. The fracures were obtained from borehole televiewer logging.

**Table 3. Fracture zones from statistical fracture analysis. Fractures from borehole televiewer were used for the fracture frequency and spacing analysis as statistical methods.**  
(mabh: meter along borehole)

Borehole	Fracture zone	Depth (mabh)		Apparent Width (m)
		Top	Bottom	
YS-1	FZ-1	87	134	47
	FZ-2	234	267	33
	FZ-3	317	324	7
	FZ-4	379	418	39
	FZ-5	429	454	25
	FZ-6	478	494	16
YS-2	FZ-1	89	152	63
YS-3	FZ-1	65	75	10
	FZ-2	100	152	52
	FZ-3	170	185	15
	FZ-4	225	259	34
YS-4	FZ-1	53	94.5	41.5
	FZ-2	189	225	36
	FZ-3	265	278	13
YS-5	FZ-1	5.3	22.5	17.2
	FZ-2	29.7	34.6	4.9
	FZ-3	57.1	58.6	1.5
	FZ-4	107.2	108	0.8
	FZ-5	188.9	192.7	3.8
YS-6	FZ-1	16	92.2	76.2
	FZ-2	105.6	132.9	27.3
	FZ-3	155	162.6	7.6
	FZ-4	206.4	208	1.6
	FZ-5	258	304.1	46.1
	FZ-6	317.9	318.7	0.8
YS-7	FZ-1	42.6	97.5	54.9
	FZ-2	123.3	127.6	4.3
	FZ-3	154.1	158.6	4.5
	FZ-4	201.8	234.5	32.7
	FZ-5	246.6	256.9	10.3
	FZ-6	323.4	329.3	5.9
	FZ-7	374.1	396.8	22.7
KP-1	FZ-1	29.3	82	52.7
	FZ-2	101	124	23
	FZ-3	174	181.6	7.6
KP-2	FZ-1	10	22	12
	FZ-2	26	37	11
	FZ-3	47	54	7

축합에 있어 단열대는 연구지역 내에 존재하는 단층의 분포 및 그 방향성을 지시하여 적용된 응력 방향을 판단할 수 있는 역할을 한다. 다른 관점에서 보면 수리지질학적 측면에서 지하수 유동로 및 방어벽의 역할을 하며, 지구화학적 관점에서 보면 서로 다른 화학적 성분을 갖는 지하수의 혼합 매개체로서의 역할을 하기도 한다. 단열대는 길이 및 폭을 기준으로 광역 규모의 단열과 국지 규모의 단열로 나눌 수 있는데, 단열대에 대한 분류는 Andersson 등(2002)이 제시한 분류 체계가 일반적이다 (Table 4)[11].

그러나, Andersson 등(2002)이 제시한 분류 체계에 의하면 단열대의 흔적 길이가 1 km 이상인 것을 결정론적 단열로 분류하며, 그 폭은 5 m 이상인 것으로 한정하고 있다. 일반적으로 단열대의 흔적 길이는 일차적으로 선형구조 분석에 의해 결정되고, 단열대의 폭은 시추공 조사 자료 및 트랜치 조사 자료를 종합 분석하여 결정될 수 있으며, 시추공 자료에 국한

된 단열대의 폭은 단열대의 연장선에 따라 그 크기가 급변할 수 있어 실제 단열대의 규모 분류에 이용하는 것은 많은 불확실성이 있다. 그러나 시추공에서 관측되는 단열대는 시추공의 자료가 1차원적인 결과로 제시되는 것이기 때문에 단열대의 길이에 대한 정보를 획득할 수 없으므로 단열대의 폭으로서 규모에 대한 예측이 가능할 수 있다. 따라서 연구지역에서 단열대는 시추공 초음파주사검층 자료를 기준으로 판단하며 그 폭을 기준으로 단열대에 대한 분류를 실시하였다 (Table 5). 단열대의 폭을 기준으로 분류된 단열대에 대하여 지표로 연장시켰을 때, 지구물리탐사 결과와 지형적 요소를 고려하여 단열대의 흔적 길이를 연장시켜 단열대의 길이를 재분석하였다.

• 방향성

일반적으로 결정질 암반에서의 단열은 단층 활동, 화산 및 지진 활동, 응기 및 침식 등의 지질학적 현상에 근거하여 생성된다. 이러한 지질학적 사건은 지하 매질내의 일부 제한된 영역에서 발생하는 것이 아니며, 비교적 광역적으로 발생하게 되는데 이런 기작을 통해 지하 암반 내에 단열이 생성되게 된다. 따라서 결정질 암반에서의 단열은 일정한 방향성을 가지게 되며, 시추공에서 관찰되는 단열의 방향성 및 경사를 통해 단층대 혹은 단열대를 파악하여 지질역학적 기작을 추론할 수 있다. 물론 시추공 굴착 과정 중 생성된 단열 혹은 굴착 후 응력의 변화에 따라 생성된 단열로 인해 시추공 초음파주사검층의 결과를 이용하여 단열을 해석하는 데에 불확실성이 존재한다. 하지만, 공간적으로 단열의 분포 경향을 파악하여 지질모형을 구성하고, 지구 물리적인 기법이 추가되어 지질모형이 수정된다면 연구지역의 지질모형을 구축하는데 좋은 기본 자료가 될 것이다.

**Table 4. Criteria of fracture zone size classification suggested by Andersson et. al (2002)[10].**

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	

**Table 5. Criteria of fracture zone size classification (KURT area).**

Class	Sub-class	Width	Geometric description	Hydraulic Behavior
Regional fracture zone		>100 m	Deterministic	HCD
Local major fracture zone	Class S	50-100 m	Deterministic (with uncertainties)	
	Class A	10-50 m		
	Class B	5-10 m		
Local fracture zone	Class C	0.1-5 m	Statistical (some deterministic)	
Background fracture		<0.1 m	Statistical	

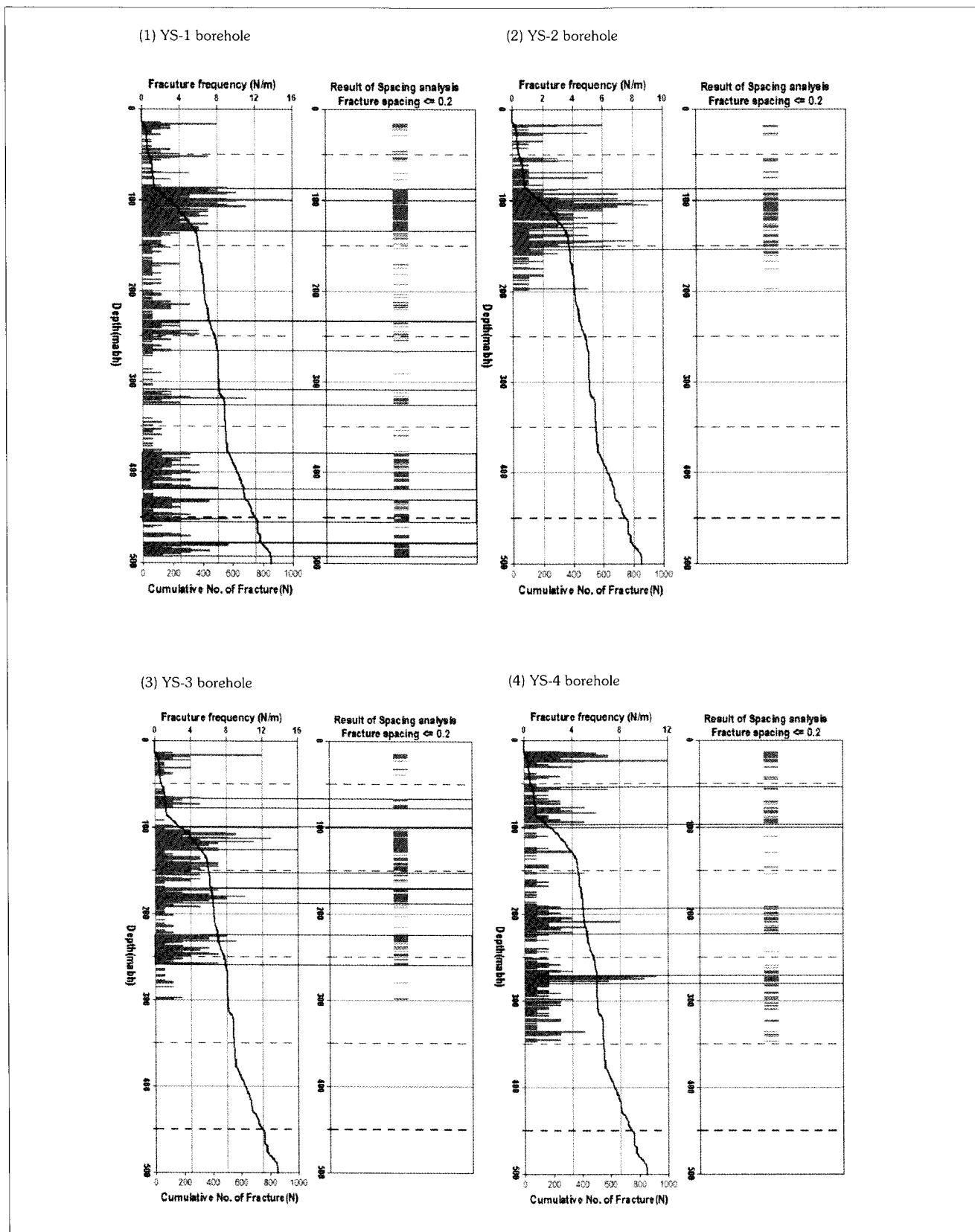


Fig. 12. Fracture zones in each borehole, which were obtained from fracture spacing and frequency analysis.

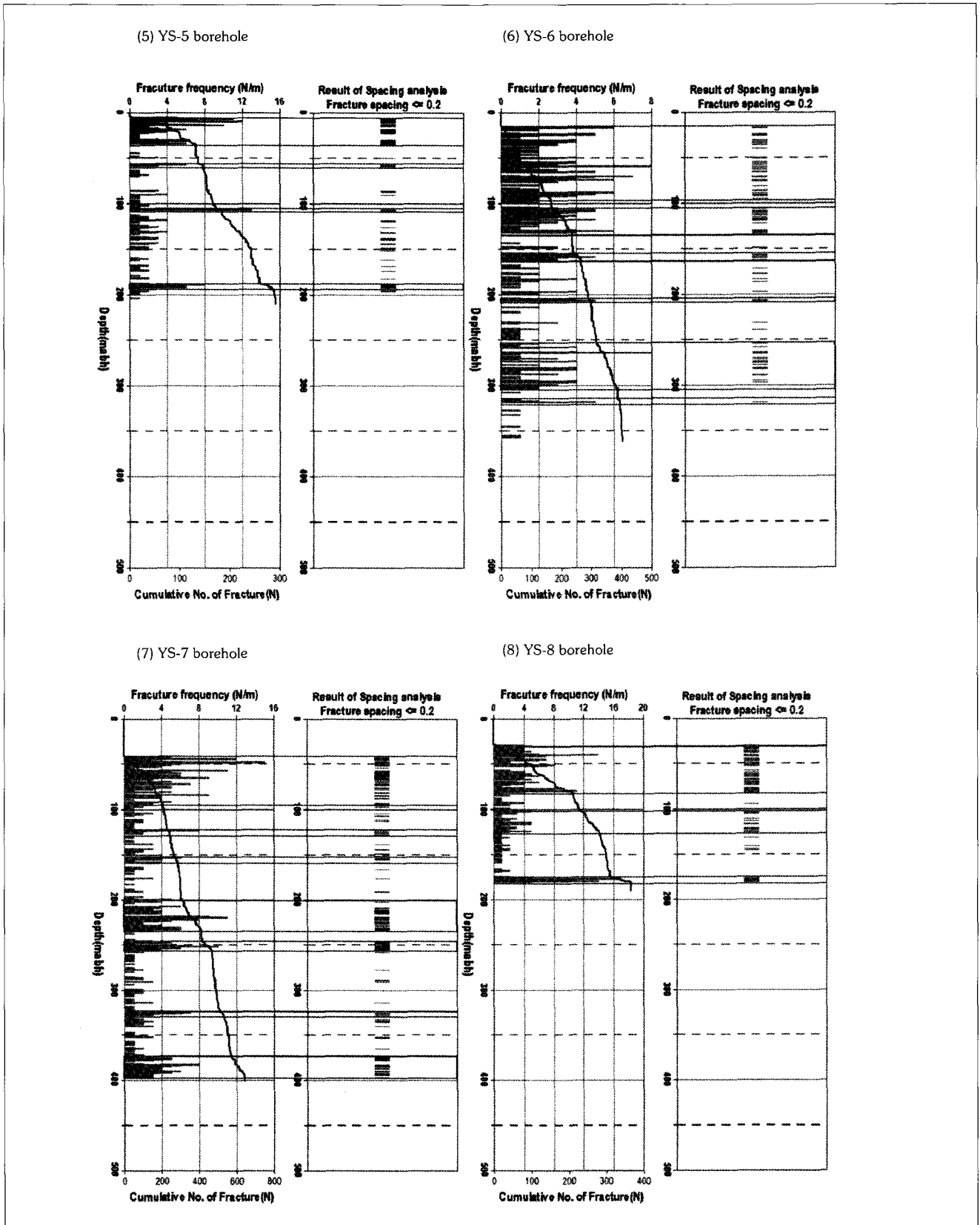


Fig. 12. Fracture zones in each borehole, which were obtained from fracture spacing and frequency analysis.(continued)

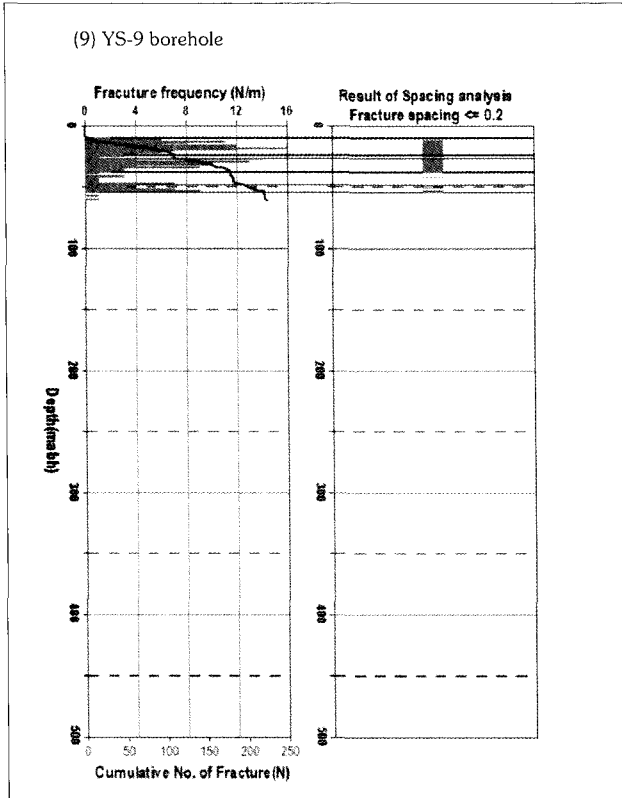


Fig. 12. Fracture zones in each borehole, which were obtained from fracture spacing and frequency analysis.(continued)

연구지역의 시추공에서 조사된 모든 단열의 극점을 스테레오망에 투영한 결과, 각각의 단열을 4개의 그룹 (NS High angle, EW High angle, NW High angle, Low angle fractures)으로 분류할 수 있다 (Figure 13). 위 분류 기준을 이용하여 각 시추공에서 관찰되는 단열을 분류하여, 각 단열 그룹이 시추공에서 깊이별로 분포하는 경향성에 대해 분석해 보았다.

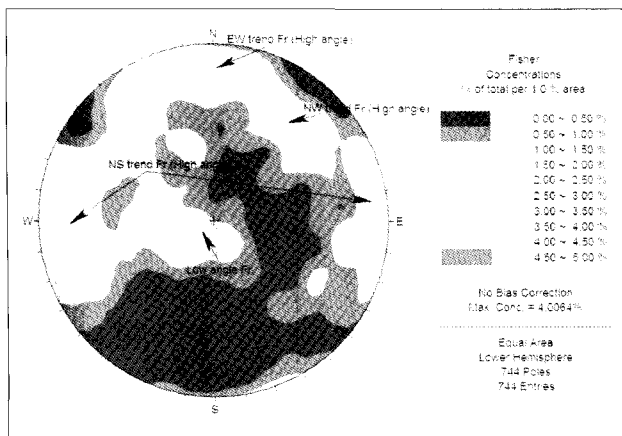


Fig. 13. Orientation of fractures around KURT area. The orientations of fractures were classified into 4 groups (NS, EW, NW, Low angle).

### ③ 연구지역의 단열대

지하차분연구시설 주변 지역에 굴착된 시추공에서 확인되는 단열에 대하여 공간분석과 빈도 분석을 실시하여 단열대를 구분해 내고, 구분된 단열대를 크기별, 방향성 별로 구분하여 각 시추공별로 단열대를 분류하였다. 시추공별로 구분된 단열대의 방향성과 크기를 정리하면 Table 6과 같다. 단열대의 크기를 기준으로 볼 때, 연구지역의 시추공에서 분석되는 단열대는 주로 Local major fracture zone의 class B에 해당되며, 몇몇 단열대는 class C의 범위에 속한다. 특히, KP-01의 시추공에서 관측되는 단열대는 Local major fracture zone의 class A에 속하는 단열대도 확인된다. 물론, Table 6에서 구분된 단열대에 대한 크기는 단열의 빈도 분석 및 공간 분석이라는 통계적 지표에 의해 구분되었다는 점에서 불확실성이 다소 존재하며, 그 크기가 과대 평가 되어 제시된 분류 체계에 정확히 적용시킬 수는 없다. 그러나, 통계 분석 결과 도출된 단열대를 지표 지구물리탐사 결과와 선형 구조 분석 및 시추공 물리검층의 자료를 비교하여 분석한다

Table 6. The classification result of fracture zones in each borehole around KURT area.

Borehole	Fracture zone (mab)		Orientation	Class
	From	to		
YS-01	8	53	Low-angle	S
	87.0	121.8	NS High	A
	133.0	138.5	NS High	C
	239.0	254.7	NW-High	B
	317.6	320.0	NS High	C
	417.3	418.5	NS High	C
	430.3	447.2	NW-High	B
YS-02	481.0	489.2	NW High	C
	88.9	94.4	NS High	C
	97.0	119.6	NS High	B
YS-03	137.5	152.1	NS High	B
	10	38	Low-angle	A
	66	74.1	Low-angle	B
	105.5	152.4	NS High	A
YS-04	179.7	185.6	NW High	C
	234.7	246	NS High	B
	10	28	Low-angle	A
YS-05	269	275.6	NS High	B
	5.3	22.5	Low-angle	A
YS-06	144.4	145.9	NS High	C
	16.5	45.8	Low-angle	A
	51.5	61.0	NW-High	B
	69.5	93.0	NS High	A
	113.0	120.0	NW-High	B
	155.0	161.0	NW-High	B
	258.0	271.0	Low-angle	A
YS-07	49.0	66.0	EW-High	B
	66.0	84.2	Low-angle	A
	122.6	122.9	NW-High	C
	248	255.2	NW-High	C
KP-01	387.4	393.0	EW-High	C
	27.0	83.0	EW, NS High	S
	102.0	106.0	NS-High	C
KP-02	115.0	132.0	NS-High	A
	176.5	195.0	EW-High	A
KP-02	8	50	Low-angle	S

면 단열대에 대한 보다 정확한 규모의 정보가 도출될 수 있을 것으로 판단된다.

시추공 별로 구분되는 단열대에 대한 방향성은 전체 단열의 방향성 분포와 같이 NS, NW, EW, 저경사의 단열이 주로 분포하고 있음을 알 수 있다. 특이한 점은 경사도 30° 이하의 저경사를 갖는 단열대가 주로 지표 근처에서 존재하고 있는데, 이는 연구지역의 지질모델을 구성함에 있어 하나의 다른 요소를 추가해야 하는 것으로 고려된다. 즉, 지하처분연구시설 주변 지역의 단열대에서 지표 근처의 저경사 단열대, 기반암에 존재하는 단열대로 구분하여 제시하는 것이 단열대 분류에 있어 타당할 것으로 판단된다.

V. 결론

연구지역의 토양층 및 풍화대의 깊이를 도출하기 위하여 지표물리탐사, 시추 코어분석 및 시추공 물리검층을 수행하였으며, 그 결과 지표에서 10 m~38 m의 깊이의 범위를 갖고 분포하고 있는 것으로 확인할 수 있었다 (Table 7).

기반암에 존재하는 단열대를 분석하기 위하여 2 단계 해석 과정으로 수행하였다. 먼저, 지표 조사의 일환으로 연구지역의 선형구조 분석 및 지표 지구물리탐사 결과를 분석하였다. 선형구조 분석과 지표 지구물리탐사 결과를 활용하여 연구지역의 개념적 지질구조를 이해하고, 예상되는 단열대의 방향성을 예측하였다. 시추공 단열 조사에서는 시추공 초음파조사검층 결과를 이용하여 단열에 대한 통계적 자료를 분석하고, 시추공에서 확인되는 단열대에 대한 정의를 하였으며 시추공별로 존재하는 단열대를 분류하여 그 크기 및 방향성을 분석하였다. 연구지역의 시추공에서 관찰되는 단열의 방향성 분석 결과, NS NW, EW의 방향성을 갖는 단열이 주로 존재하였으며, 특히 경사각 30° 이하 저경사 단열이 다수 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이 단열 자료에 대한 군집 분석을 시추공별로 깊이별 도시하였으며, 그 결과 저경사각을 갖는 단열이 상부 풍화대의 하부에 주로 분포하고 있음을 확인할 수 있었다.

연구지역의 시추공에서 확인되는 단열의 통계 분석 결과 각 시추공별로 단열대를 도출하였으며, 이를 지표 지구물리탐사 결과와 선형구조 분석 결과를 비교하여 총 7개의 단열대를 도출하였다 (Figure 14). 최종 도출된 7개의 단열대에 대해 시추코어 조사 결과를 이용하여 주단열 (major fracture)을 분석하였으며, 단열대 코어 (core) 및 주단열에 대한 단열 손상대 (damaged zone)에 대한 크기를 분석하였다 (Table 9).

단열대의 분류 기준에 따라 연구지역에서 심부 영역에 존재하는 단열대에 대해 다음과 같이 분류하여 보았다. 분류된

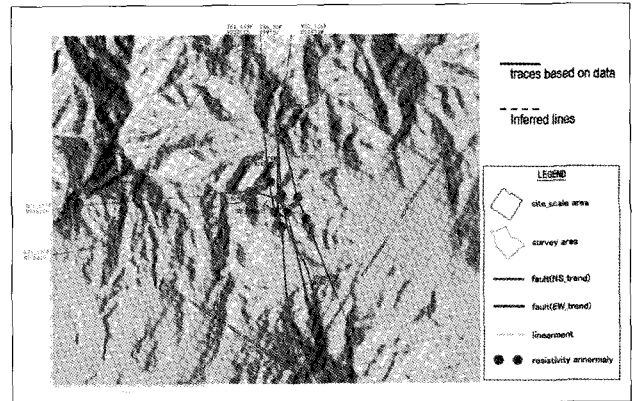


Fig. 14. Plan view of fracture zones around KURT area. Total 7 fracture zones were obtained from surface geological survey.

Table 7. Depth distribution of the weathered zone and low angled fracture zone in each borehole.

(mabh: meter along borehole)

Borehole	Weathered zone (mabh)	Low-angled fracture (mabh)
KP-1	27	
KP-2	10	31
YS-01	16	53
YS-02	15.2	51
YS-03	15	74.1
YS-04	13	28
YS-05	10	22.5
YS-06	15	45.8
YS-07	38	84.2

Table 8. 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.

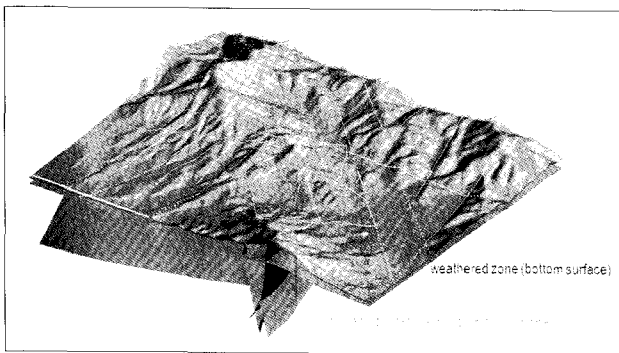
Fracture zone	Data
YS1_104F	YS1MF104(N18W74N) Lineament analysis
YS1_104DZ	YS1FZ1ab(87.2-138.0mabh)
YS1_433F	YS1MF433(N20W55S) Geophysical investigation Lineament analysis
YS1_433DZ	YS1FZ4cd(417.3-447.2mabh)
YS2_106F	YS2MF106(N10W73N) Geophysical investigation Lineament analysis
YS2_106DZ	YS2FZ1abc(88.9-152.1mabh)
YS6_70F	YS6MF70(N9W75N) Geophysical investigation Lineament analysis
YS6_70DZ	YS6FZ2ab(51.5-93.0mabh)
KP1_75F	KP1MF75(N2E86E) Lineament analysis
KP1_75DZ	KP1FZ1a(27.0-83.0mabh)
KP1_120F	KP1MF120(N75E42S) Lineament analysis
KP1_120DZ	KP1FZ2b(115.0-132.0mabh)
KP1_177F	KP1MF177(N87E71S) Geophysical investigation
KP1_177DZ	KP1FZ3(176.5-181.6mabh)

단열대 명칭은 FZ(order)(분류결과)-No.의 순서와 형식으로 정하였다 (Table 9). 연구 지역에 존재하는 단열대는 FZ2A 규모가 총 6개가 존재하며, FZ2S 단열대 1개가 분포하는 것으로 분석된다. 이에 대한 명칭은 향후 추가적인 현장조사 결과에 따라 삭제되거나 변경될 수 있음을 밝혀둔다.

이상과 같이 연구지역의 지질모델은 상부 토양층 및 풍화대, 저경사단열대, 단열대, 기반암으로 구분할 수 있다. 지표 지질조사 및 시추공 조사 결과를 정리하여 연구지역의 상부 토양층 및 풍화대, 저경사단열대, 단열대에 대한 요소별 분포를 도시화하면 Figure 15과 같다.

**Table 9. Major fracture zones around KURT area.**

No	Major fracture zone	width (m)	Order	Class	Index
1	YS1_104F	14	2	Class A	FZ2A-1
2	YS1_433F	17.3	2	Class A	FZ2A-2
3	YS2_106F	18.5	2	Class A	FZ2A-3
4	YS6_70F	11-20	2	Class A	FZ2A-4
5	KP1_75F	65.9	2	Class S	FZ2S-1
6	KP1_120F	12.5	2	Class A	FZ2A-5
7	KP1_177F	14.0	2	Class A	FZ2A-6



**Fig. 15. Geological model around KURT area. The geological analysis determined four geological elements such as subsurface weathered zone, log-angled fractures zone, fracture zones and bedrock for the geological model.**

[5] 정지곤, 서만철, 김경수, 황형중, 유성온천지역의 지질 구조 및 지온분포 연구. 지질공학회지, 7, pp.173-189 (1997).

[6] Sven, F., Roger, T., On the use of continuum approximations for regional modeling of groundwater flow through crystalline rocks, Advances in Water Resources 17, pp. 133-145 (1994)

[7] 박경우, 배대석, 텔레뷰어에서 관찰되는 단열특성과 수리전도도와와의 상관관계 분석, 지질학회지, 41(2), pp.269-285 (2005)

[8] Siegal, B.S., Alan R.G, Remote sensing in geology, John Wiley & Sons Inc., USA (1980)

[9] Masuoka, P.M., Harris J, Lowman P.D., Blodget H.W., Digital Processing of Orbital Radar Data to enhance geological structure, 54(5), pp.621-632 (1987)

[10] Dershowitz W. S., Herda H. H., Interpretation of fracture spacing and intensity, Rock Mech. ISMN 90 5410 0451 (1992)

[11] Andersson, J., Berglund, J., Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19, SKB, Stockholm (2002)

**참고문헌**

[1] 박정화, 권상기, 소규모 지하처분연구시설 부지조사 및 평가, KAERI/TR-2751-2004 (2004)

[2] 한필수 외 방사성폐기물처분연구부, 지하처분연구시설 (KURF) 확보 및 활용계획, KAERI/TR-2969-2005 (2005)

[3] 이상만, 김형식, 나기창, 한국지질도 대전도폭 (1:50,000) 및 도폭설명서. 자원개발연구소 (1980).

[4] 박희인, 이준동, 정지곤, 한국지질도 유성도폭 (1:50,000) 및 도폭설명서. 자원개발연구소 (1977).