

## 유성북부 화강암지역에서 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사를 이용한 단열분포 특성

### Characteristics of the Fracture Distribution on the Granitic Rock by DC and VLF-EM Survey in the Northern Part of Yusong.

조 성 현 (Seong Hyen Cho)  
김 천 수 (Chun Soo Kim)  
송 무 영 (Moo Young Song)

충남대학교 지질학과  
한국원자력연구소  
충남대학교 지질학과

#### 요약/ABSTRACTS

암반에서의 지하수유동은 그 지역에 발달된 단열(fracture)에 의해 지배된다. 그러므로 결정질암에서의 지하수유동에 있어서 연결성이 좋은 단열대의 존재는 매우 중요하다. 본 연구는 유성북부(위도 36°24'18"~36°25'08", 경도 127°21'00"~127°23'23")에 분포하고 있는 중생대 화강암지역에서 지하수의 주 유동로가 되는 단열의 분포특성을 파악하는데 목적이 있다. 비유일성해석 특성을 갖는 지구물리탐사의 단점을 보완하기 위해서 기존에 조사된 logging 자료, 수위자료, BHTV자료, 수리시험자료해석을 바탕으로 전기탐사(DC)와 전자탐사(EM)를 실시하였다. 전기탐사로는 솔렘버저와 쌍극자배열인 전기비저항탐사를 실시하였으며, 전자탐사로 극저주파 전자탐사(VLF-EM)를 병행하였다. 기 조사자료와 지구물리탐사의 결과를 종합하여 분석한 결과, 연구지역의 투수성 단열의 분포 특성은 염기성암맥과 암맥 주변에 발달된 연결성이 좋은 단열체계가 계곡방향인 NNW방향을 가로질러 지하수의 주 유동로를 막는 수리적 방벽 역할이다. 그러므로 본 연구지역에서의 등수위선분포는 지형의 고저와 무관하게 고지대의 수리수두가 저지대의 수리수두보다 낮은 현상이 일어난다.

주요어 : 단열, 염기성암맥, 수리적 방벽

Groundwater flow in rock mass is controlled by the fractures developed in the area. So, the conductive fractures are very important for groundwater flow in crystalline rock. This study aims to find out the characteristics of the fracture distributed in granitic rock in the northern part of the Yusong area(latitude 36°24'18"~36°25'08", longitude 127°21'00"~127°23'23"). The electric and EM surveys were carried out in the site to delineate the fracture zones. Since geophysical survey provides non-unique solution, hydraulic data and drilling log data including BHTV scanning were used as complementary data to achieve the objective of this study. Electric survey(DC) arrays used are

schlumberger and dipole-dipole arrays. VLF is used for EM survey. The main characteristics of the fracture developed in the study area are that fractures associated with basic dyke cut cross the main fracture zone in NNW and play an important role as hydraulic barrier. In turn, groundwater table in the upstream area is the lower than that in the downstream area.

**Key Words** : Fracture, Basic dyke, Hydraulic barrier

## 서 언

암반에서 지하공간의 이용 또는 지하수자원개발에 관련하여 가장 먼저 접하는 현안문제는 지하지질구조 및 매질에 대한 정확한 수리지질학적 특성을 규명하는 것이다(배대석, 1996). 특히, 결정질암에서는 지하수의 주 유동로인 단열대(fracture zone)의 분포 특성을 밝히는 것이 중요하다. 연결성과 연장성이 우수한 단열체계는 지하수의 좋은 유동로가 되며 이러한 단열대의 분포는 지하공간의 안정성 평가나 지하수개발 지점 파악에 중요하기 때문이다.

일반적으로 단층, 과쇄대에는 점토광물 및 지하수가 많이 부존 되어있어 주위보다 전기전도도가 상당히 높은 경향을 갖는다. 특히 지표에 노출되지 않은 과쇄대의 탐지과정에서 이러한 전기적 성질을 이용하는 전기 및 전자탐사법이 효율적이다(정승환 외, 1992). 이러한 탐사법으로 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사(VLF-EM)가 있으며, 전기비저항탐사는 천층 및 심부에 유리하며 극저주파 전자탐사는 천층의 탐사에 유리하다. 또한 이들 두 탐사의 결과는 천층에서 비교적 잘 일치한다(Poddar and Rathor, 1983). 그렇지만 이러한 지구물리탐사는 간접적인 조사방법으로 유일해가 존재하지 않으므로 다른 조사자료와 비교해서 종합적으로 해석되어야 할 때 목적하는 결과를 얻을 수 있다.

본 연구의 목적은 연구지역에서 시추공에 국한되어 누적된 자료(지표조사, 시추조사, BHTV, 수리시험)를 바탕으로 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사를 이용하여 본 연구지역에서 지하수의 주 유동로가 되는 단열의 분포 특성을 밝히는데 있다.

## 지형 및 지질특성

연구지역은 대전광역시 유성구 덕진동 한국원자

력연구소(KAERI: Korea Atomic Energy Research Institute) 서쪽 구룡지(위도 36°24'18"~36°25'08", 경도 127°21'00"~127°23'23")로서 NNW방향의 작은 골짜기이다. 본 지역은 북으로 용바위고개(350m), 남으로 적오산(255m)이 위치해 있으며, 계곡을 중심으로 볼 때 서편 능선이 동편 능선보다 낮은 지형이다. 본 연구지역에서의 시추공은 동편과 서편의 능선부에 2공, 계곡에 4공으로 총 6공의 시추공이 존재한다(Fig. 1).

광역적 지질은 선캄브리아기의 변성암류와 이를 관입한 중생대 화강암류 및 맥암으로 구성되어 있다(박회인 외, 1977). 국지적 지질은 중생대 복운모 화강암으로 풍화가 상당히 진행되어 있었으며, 시추결과 하부에는 편상화강암이 분포한다. 전 시추코어에서 염기성 암맥이 발견되었으며, 폭이 10~20m이상의 것도 협재하고 있다(Fig. 1).

광역적인 지질구조는 지질도(박회인 외, 1977)를 보면 유성일대에서 단층은 지표에서 확인되지 않고 있으나, 하천을 이루는 구조선의 방향과 후기 모암을 관입한 N-S 계열의 맥암군의 특징으로 추정하고 있다. 수리지질도(대전북부 갑천유역: 임정웅, 1982)에서는 좀 더 자세한 조사가 수행되었는데, 탄방동에서 회덕방향으로 N-W방향단층과 하천을 따른 N-S, N-E 방향의 단층, 그리고 N-S계열의 맥암군을 기재하였으나 단층에 대한 충분한 증거를 제시하지 못하였다. 화랑대 연구소(1988; 1993) 보고서에 의하면 단열체계는 N-S계열이 우세하고, 이차적으로는 E-W계열이 우세한 것으로 조사되었다. 좀더 체계적인 조사는 정지곤 외(1997)에 의해 이루어 졌으며 이들은 선구조의 주 방향은 N30°W 이고, 이차방향은 N50°E, 유성일대에 넓게 분포하는 화강암 절리의 1차 방향은 NS~N30°W이고, 2차 방향은 N40°E~EW이며, 맥암류는 1차 방향이 N40°W~N30°E이며, 2차 방향이 N80°E~EW 방향임을 밝혔다. 국부적인 지질구조인 유성북부 덕진

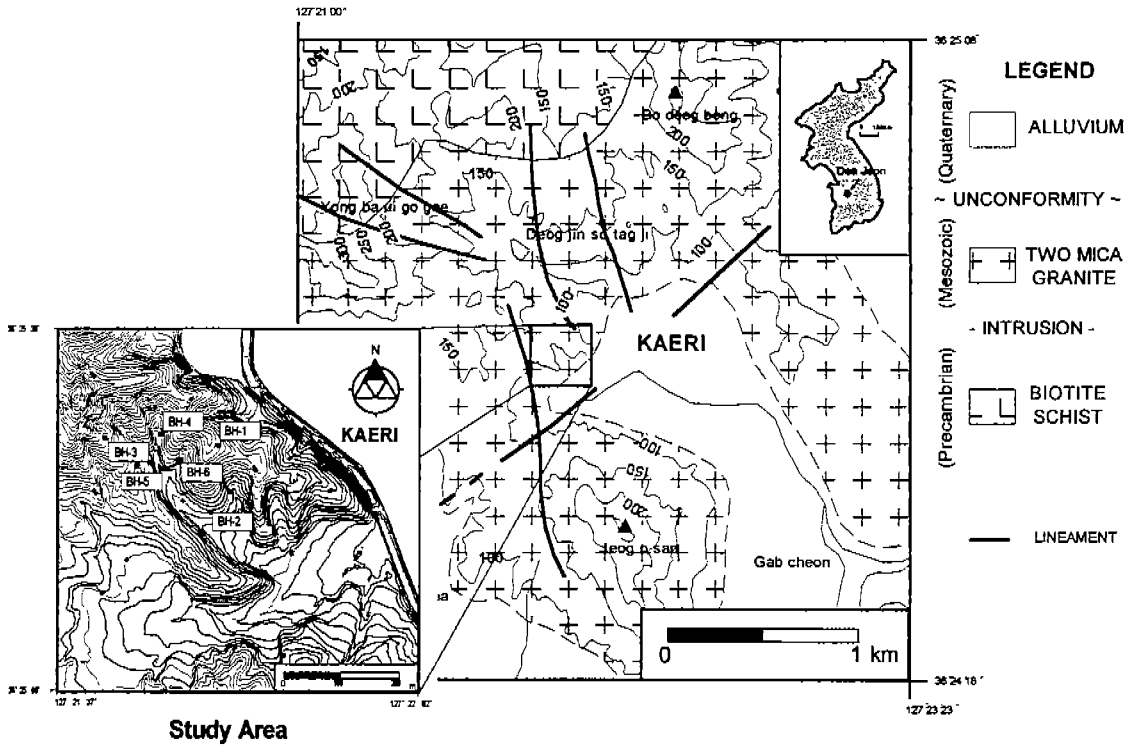


Fig. 1. Location and geology map in the study area.

Table 1. Major orientations of the lineament, joint of granite and dyke around the study area.

	Lineament	Joint of Granite	Dyke
Major Orientation	NS~N30°W	NS~N30°W	N40°W~N30°E

동 일대에 대한 보다 자세한 조사는 한국전력기술 주식회사(1995)에 의해 조사되었다. 조사보고서에 의하면, 선구조는 뚜렷한 형태를 나타내지 않으며 연장이 불과 수 km에 그치고, NS, N30°W, N25°E 등 세 방향이 우세하다고 하였다. 그리고 절리는 NS/70°W, N65°W/90° 그리고 N60°W/30°NE 등의 방향성을 보임을 기재하였다(Fig. 1). 연구지역의 주 구조방향을 정리하면 Table 1과 같다.

### 기 조사자료의 분석 및 문제점

본 연구지역에는 총 6공의 시추공이 있으며, 시

추공의 재원은 Table 2에 요약하였다. 총 시추길이는 500m이며, 각 시추공의 케이싱 구간은 지표하 12.4~28.4m이고, 나공인 구간은 지표하 54.4~75.8m이다(Fig. 2참조). 다음은 연구지역의 6공의 시추공에서 조사나 시험을 통하여 누적된 조사자료를 정리한 것이다. 각 자료들은 이영남 외(1997)에 의해 획득된 기본 자료들을 재분석한 것이다.

Fig. 2는 6공의 시추공에서의 검층자료, RQD, 수리전도도, 수위 그리고 케이싱 깊이를 고도별로 비교 분석한 것이다. 모든 시추 공에서 안산암질 열기성 암맥이 조사되었으며, 1번 공과 2번 공에서는 10~20m의 두께로 상당히 크게 관입 되어 있다. 또한, 암맥의 위치가 1번 공의 하부와 2번 공의 상

Table 2. Description of the boreholes in the study area.

	Borehole Number					
	BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5	BH-6
Elevation	111.33	88.02	95.46	98.03	90.67	93.99
DD(Drilling Depth)	100.00	70.00	90.00	70.00	80.00	90.00
CD(Casing Depth)	28.40	12.40	14.20	15.60	14.80	20.10
DD-CD	71.60	57.60	75.80	54.40	65.20	69.90

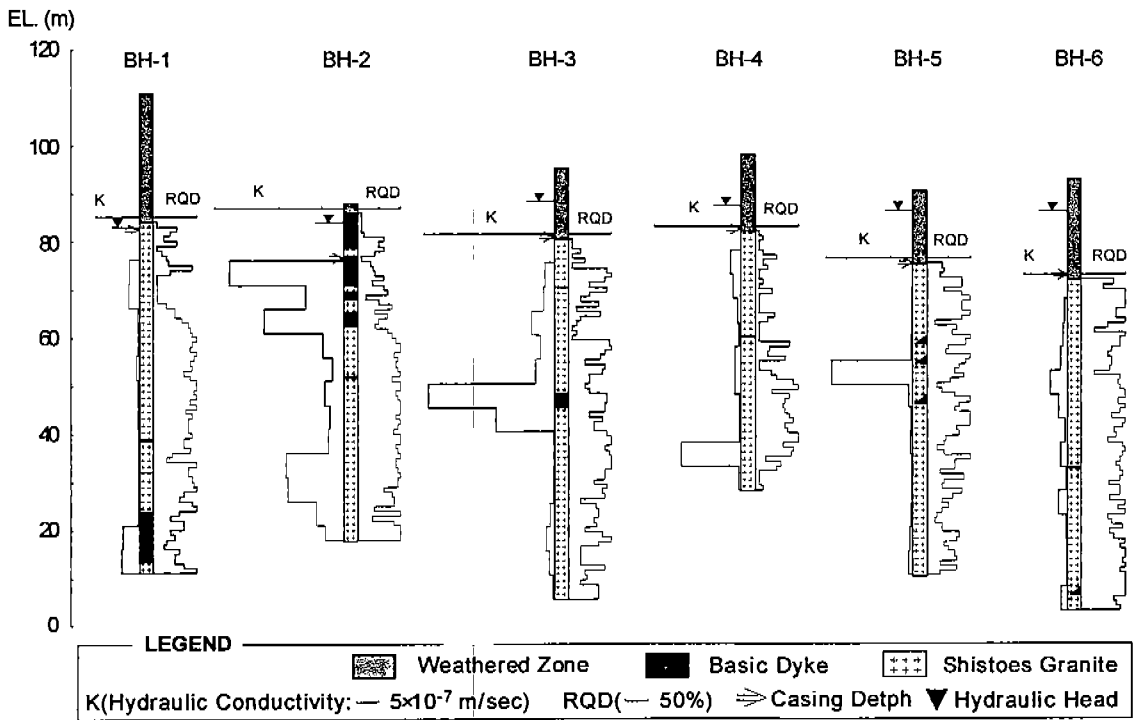


Fig. 2. Drilling log, RQD and Hydraulic conductivity(K) map.

부에 위치하며, 암맥이나 암맥주변에서 수리전도도가 상대적으로 상당히 높음을 보여주고 있다. 다른 공의 코아에서도 암맥이나 암맥주변에서 수리전도도가 상당히 높다. 전 시추공에서 기하평균에 의한 평균 수리전도도는  $8.93 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 이고 가장 큰 수리전도도를 보이는 구간은 3번 공의 고도(EL.) 50.46~45.46m 구간에서  $2.93 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 이다. 가

장 낮은 수리전도도를 가진 구간은 1번 공의 고도 31.33~26.33m에서  $3 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 이다. 수리전도도는 각 시추공에서 수행된 하향식 Lugeon 테스트에 의해 산출되었다. 코아의 관찰결과, 암맥보다는 편상화강암에서의 단열의 발달이 우세하지만 수리전도도는 높지 않았다. RQD값을 보더라도 값이 낮은 곳에서 대체로 수리전도도가 높지만 반듯이 일치하

유성북부 화강암지역에서 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사를 이용한 단열분포 특성

지도 않으며, 염기성 암맥 부근에서 높은 수리전도도 값을 보여주고 있다. 이는 염기성 암맥이나 암맥 주변으로 연결성이 우수한 단열이 발달되어 있음을 시사한다.

Fig. 3은 일 년 동안의 측정된 수위자료를 가지고 그린 등수위선도(Water table map)이다. 본 등수위선도는 시추공중 나공 구간이 가장 긴 것과 짧은 것의 차이가 20m이고(Fig. 2참조), 시추심도를 고려하지 않고 작성되었으므로 정확도가 결여된다.

그러나 시추공의 시추고도가 가장 높고(111.33m) 나공 구간이 비교적 긴(71.6m) 1번 공에서 가장 낮은 수리수두를 나타내고 있다. 또 산능선부에 있는 3번 공은 계곡에 위치한 4번 공보다 3m정도 낮은 곳(Table 2참조)에 위치하지만 가장 높은 수리수두를 가지고 있다. 이것은 단열에 의해 지하수 유동이 지배되며, 1번 공 부근의 지하수가 다른 유동로를 가지기 때문으로 판단된다.

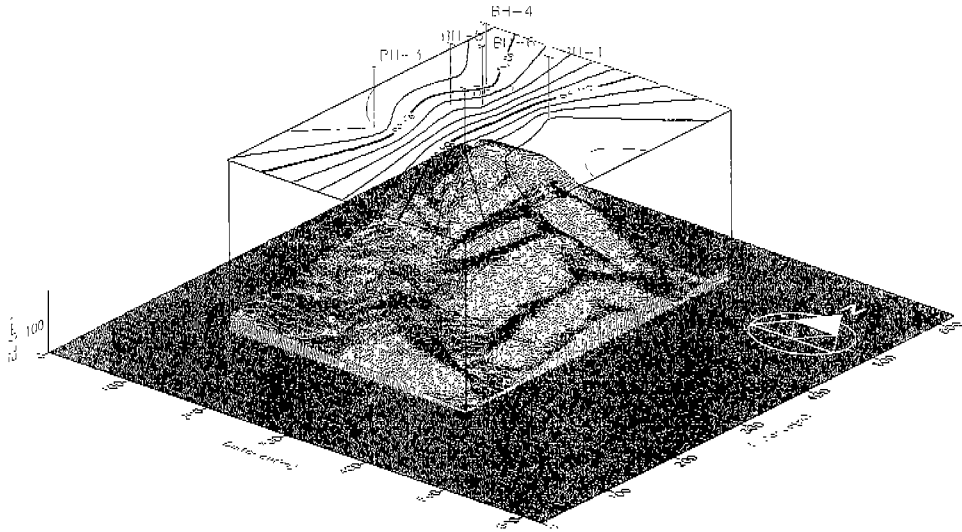


Fig. 3. Water table of the study area. Groundwater equipotential lines are developed regardless of topography in the study area.

Fig. 4는 3개의 시추공에서 BHTV(BorHole TeleViwer)를 통해 얻은 652개의 단열을 stereo 투영과 rose diagram으로 나타내어 단열의 주방향을 분석한 것이다. 자료는 계곡에 있는 5, 6번 공과 계곡을 중심으로 좌측 산능선에 있는 3번 공에서 획득하였다(Fig.1 참조). BHTV 스캔구간은 평균 60 m정도로 고도 16 m에서부터이다(Fig. 2참조). 분석 결과 3공의 시추공에서의 단열의 주향과 경사는 N52°~12°W/11°~16°NE로 NE방향으로 저경사를 가지고 있다.

Table 3은 5번 공을 주입공으로 하고 2, 3, 4, 6번 공을 관측공으로 하여 수리간섭시험을 한 결과를 정리한 표이다. 가장 높은 투수량계수

Table 3. Transmissivity and storativity.

	Transmissivity (unite : m <sup>2</sup> /sec)	Storativity
BH-2	4.09×10 <sup>-4</sup>	1.13×10 <sup>-4</sup>
BH-3	5.90×10 <sup>-3</sup>	1.33×10 <sup>-4</sup>
BH-4	4.30×10 <sup>-3</sup>	3.38×10 <sup>-3</sup>
BH-6	3.75×10 <sup>-3</sup>	8.11×10 <sup>-3</sup>
mean	7.7×10 <sup>-3</sup>	4.51×10 <sup>-3</sup>

(transmissivity)를 보인 구간은 2번 공과 5번 공 사이로 4.09×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/sec이다. 저유계수(storativity)

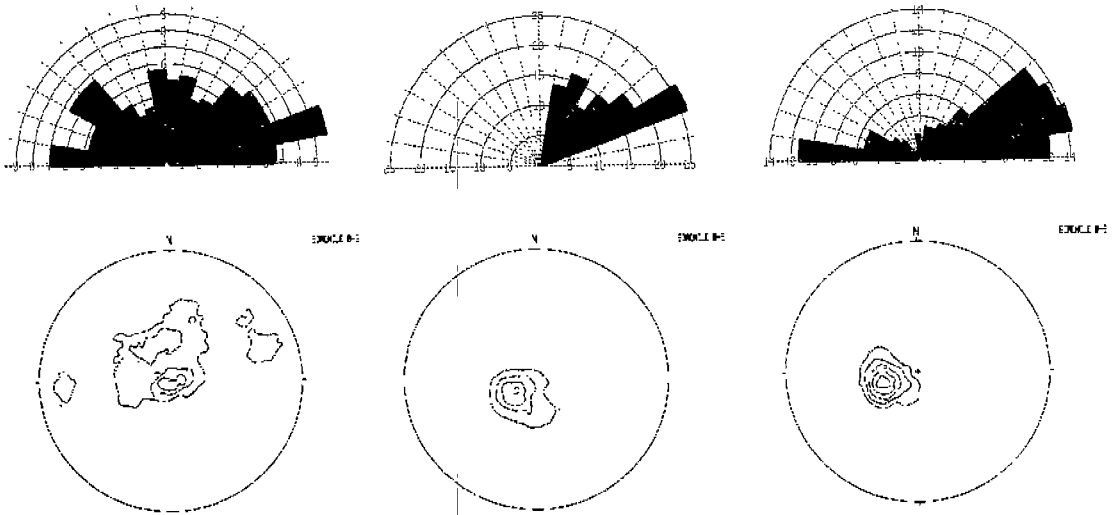


Fig. 4. Rose diagram and stereo projection of the data of BHTV logging in three boreholes(BH-3, 5, 6).

는 2와 3번 공이 높음을 보여주고 있다. 이는 5번 공과의 단열의 연결성이 가장 좋은 공은 2번 공으로 NNW의 계곡방향인 주 대수방향임을 시사한다.

따라서, 지하수의 주 유동로 역할을 하는 단열의 방향은 계곡의 발달방향인 NNW방향으로 판단된다. 특히 투수성이 높은 열기성 암맥의 분포특성이 본 연구지역의 수리적 특성에 가장 큰 변수로 작용할 것으로 예측된다.

### 지구물리 탐사방법 및 결과

지구물리탐사법 중 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사는 매질의 전기전도성을 가지고 이상대를 탐지하는 탐사로 경제적이면서도 신속하여 지하수에 관련하여 많이 사용되는 탐사이다. 본 연구지역에서는 전기비저항탐사로는 술럼버저와 쌍극자배열을 사용하였다. 축선의 배열은 극저주파의 송신소와 연구지역의 지형적인 여건을 고려하여 NNW방향의 산능선부를 따라서 2축선, 계곡을 가로지르는 방향으로 5축선을 격자형태로 배열하였다(Fig. 5). 이러한 격자형태의 배열은 입체적인 분석을 위해서이다. 그리고 쌍극자배열 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사의 상관해석을 위해 두 탐사를 같은 축선에서 탐사하였다. 탐사는 지층과 전기비저항의

수직적인 분포상태를 비교하기 위해 시추공 주위에서 술럼버저배열 탐사를 먼저 실시하였고, 탐사결과를 쌍극자배열 탐사와 극저주파 전자탐사에 반영하였다. 전기비저항탐사는 OYO사의 전기비저항탐사기를 사용하였고 극저주파탐사는 스웨덴의 ABEM WADI를 사용하였다. 극저주파탐사 자료는 동상성분만을 Fraser역과(Fraser, 1969) 하였다.

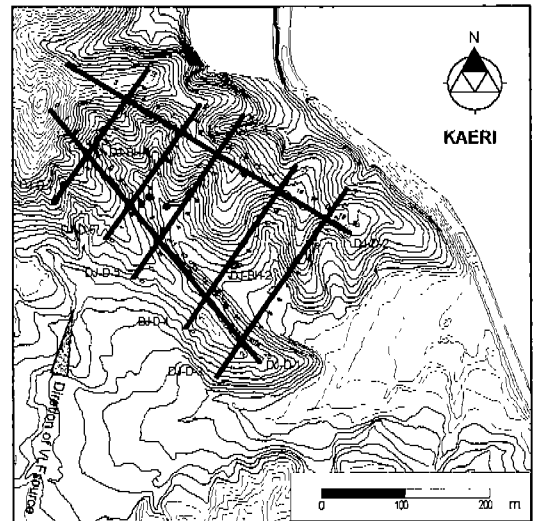


Fig. 5. The survey lines in the study area.

유성북부 화강암지역에서 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사를 이용한 단열분포 특성

지구물리탐사기간은 1998. 1. 8~1. 11에 실시하였다.

내외에서의 전기전도도가 높은 이상대의 구분은 극저주파 탐사나 쌍극자배열 전기비저항탐사로 구분할 수 있을 것이다.

Table 4. Range of typical resistivity values.

Rock type	Resistivity(unit : $\Omega$ m)
Granite(wet)	$4.4 \times 10^5$
Andesite(wet)	$4.5 \times 10^4$
Clay(wet)	20
Sandstone	$10 \sim 2 \times 10^5$
Soil water	100

Table 4는 연구지역에서의 암종별 전기비저항값을 나타낸 것이다(Telford et al., 1976). 화강암은 전기비저항값이  $3 \times 10^3 \sim 10^6$  ohm-m으로 넓은 폭을 갖으나 물을 함유함에 따라 전기비저항값이 낮게 나타난다. 안산암은  $4.5 \times 10^4$  ohm-m 정도로 전기비저항값이 화강암보다 높게 나타난다. 그러므로 지하수면 아래에 존재하는 안산암질 염기성암맥과 화강암은 어느 정도 구분이 가능할 것이다. 천부 50m

### 슬럼버저배열 전기비저항탐사

수직탐사에 유리한 슬럼버저배열 전기비저항탐사는 2, 4번의 시추공 주위에서 실시되었으며, 각 시추공에서의 풍화대와 지하수면 그리고 케이싱 심도를 구분하여 놓은 표가 Table 5이다. 이는 암종 외에 전기전도도에 영향을 미칠수 있는 요소이다. 2, 4번 공의 선택은 화강암과 안산암질 염기성 암맥에서 전기비저항의 분포를 비교하기 위해서이다. 시추깊이를 고려하여 탐사심도는 100m로 정하였다.

Table 5. Description of BH-2, 4.

Condition	BH-2	BH-4
Weathered Zone	0~12.4m	0~16m
Hydraulic Head	4.94m	11.22m
Casing Depth	12.4m	15.6m

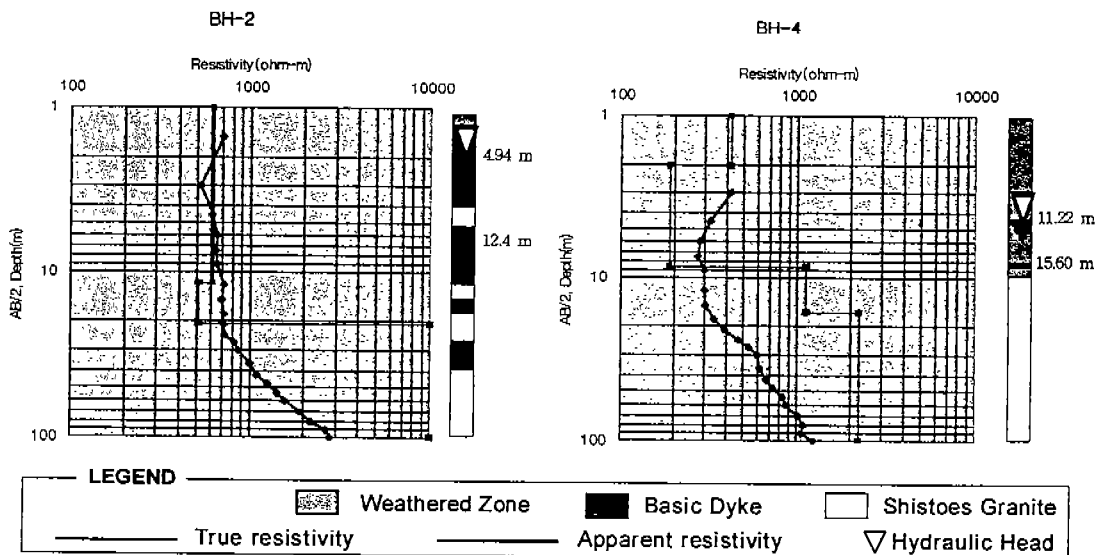


Fig. 6. Apparent resistivity by schlumberger array survey and its inversion result.

Fig. 6은 탐사결과를 겹보기 전기비저항값과 심도에 따른 역산된 전기비저항값이다. 역산된 전기비저항값과 시추 주상도를 비교하면, 두 공 모두 풍화대에서 400~600 ohm-m의 비저항값을 가지고 염기성 암맥 관입여부에 따라 비저항값이 커짐을 알 수 있다. 지하수면 아래에 분포하는 화강암에서는 풍화의 정도에 따라 200 ohm-m 내외에서 2000 ohm-m이상의 값으로 분포한다. 역산 값으로 지하수면의 구분은 뚜렷하지 않다.

### 쌍극자배열 전기비저항 탐사

쌍극자배열 전기비저항탐사는 비교적 광역적으로 지하의 2차원적인 전기전도도에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 전극간격(a)은 20m, 전극전개수(n)는 8까지 주었으며, 탐사심도를 100m로 하였다.

Fig. 7은 각 측선에서 쌍극자배열 전기비저항탐사의 역산결과를 나타낸 것이다(Fig. 5참조). DJ-D-1, 2번 측선의 지형적 기록은 2번 측선이 1번 측선에 비하여 심하다. 1번 측선의 저비저항체의 기록은 2번 측선의 저비저항체의 기록보다 심하지는 않으나 중간 7, 8과 10, 11에서 심도 20~40m까지 발달되어 있는 것이 보인다. 방향성은 7, 8은 NNW로 10, 11은 남남동으로 기울었다. 2번 측선은 상당히 큰 저비저항체가 보이며 6~11과 12~16사

이에 심도 80~100m까지 발달되어 있으며 중앙부의 고비저항체를 중심으로 NNW와 SSE방향의 경사를 가지고 있다. 2번 측선의 특이한 점은 지형적으로 오목한 부분에 깊은 심도까지 저비저항체가 발달되어 있다는 것이다. DJ-D-3~7번까지의 측선은 계곡을 가로지르는 방향으로 계곡 하부에 있는 측선이 3, 상부가 7이다. DJ-D-4번 측선을 제외하고는 중앙부에 저비저항체가 발달되어 있다. 주의할 것은 4번 측선 주위에는 1, 2번 시추공이 존재하고 있으며, 이 1, 2번 시추공은 염기성 암맥이 상당히 크게 분포하고 있다는 점이다(Fig. 2참조). DJ-D-5번 측선의 경우 중앙 7~9지점 사이에 고비저항체가 심부까지 연결되어 있으며 심도 50m 이후부터 저비저항체가 발달되어 있다. 이는 북동방향으로 발달한 계곡을 따라서 측정한 원인도 있겠으나 상부에 고비저항체의 영향도 무시할 수 없다고 생각된다. DJ-D-3번 측선은 좌측과 우측면에 저비저항체가 발달하고 있으며 우측의 저비저항체는 탐사위치가 2번 측선과 만나는 산능선의 오목한 부분임을 상기시킨다.

DJ-D-1~7번까지의 측선의 심도에 따른 수평적인 전기비저항분포도를 Fig. 8에 제시하였다. 그림은 각 측선에서 탐사한 전기비저항을 수평으로 고도 40, 50, 60, 70m로 잘라서 저비저항체의 분포방향을 rose diagram으로 분석한 것이다(Fig. 5의 cross line 참조). 비교적 천부에 속하는 고도 60, 70m에서의 저비저항의 분포는 계곡이 발달한 NW

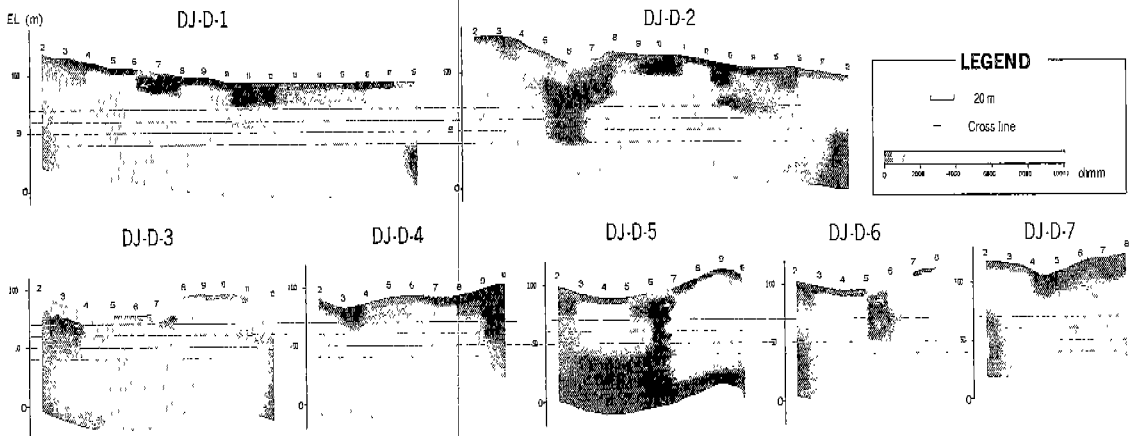


Fig. 7. Inversion result of dipole-dipole system survey on DJ-D-1, 2, 3, 4, 5, 6.



와 연구지역 일대의 구조선의 방향인 NS 방향으로 발달되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 심도가 깊어질수록 NE 방향으로 저비저항의 분포를 보이고 있다. 이 방향은 BHTV 검층에서 밝혀진 단열의 경사방향과 같은 방향이다. 특히 4번 축선이 지

나는 곳은 북동쪽에 저비저항체가 더 분포하는 것으로 보아 안산암질 염기성 암맥의 경사방향이 2번 공 상부에서 1번 공 하부로 이어짐을 알 수 있다. 이는 계곡을 가로지르는 방향이다.

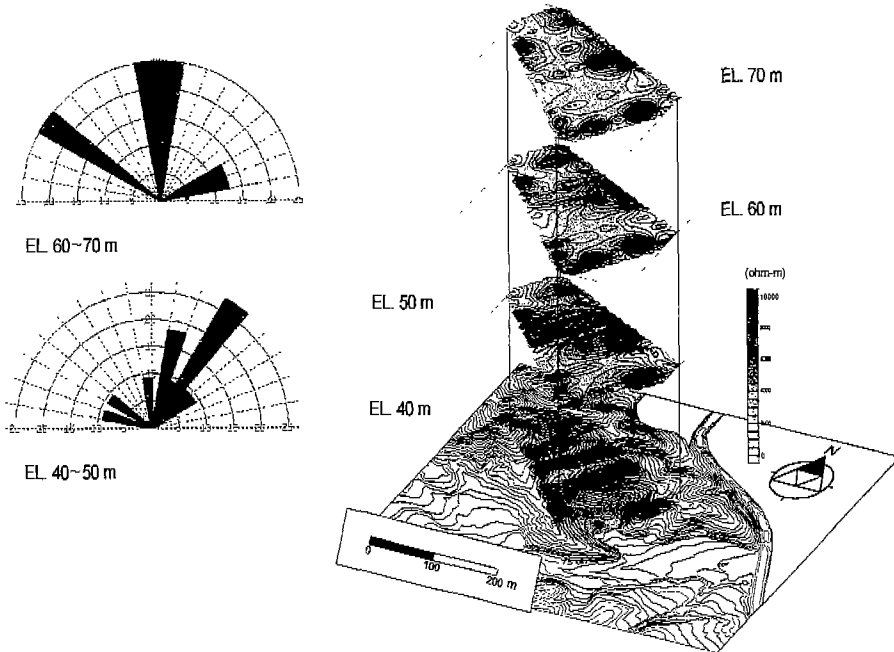


Fig. 8. Horizontal resistivity and its rose diagram.

### 극저주파(VLF) 탐사

극저주파 탐사는 세계 여러 곳에 있는 VLF송신소에서 방출하는 1차장이 전기전도성이 높은 매질을 통과할 때 직상부에 타원분극이 형성되며, 이 타원분극의 동상성분(tilt angle, in phase)과 이상성분(ellipticity, out of phase)을 측정하여 해석하는 탐사이다. 동상성분은 타원의 장축이 수평성분과 이루는 각이며, 이상성분은 타원의 장축과 단축의 비이다(Saydam, 1981). 일반적으로 이상성분과 동상성분을 구분하여 해석할 때에는 이상성분의 이상대는 동상성분의 것보다 해석하기가 훨씬 더 어렵다. 따라서 모든 해석은 우선적으로 여과된 동상성분에 근거를 둔다. 왜냐하면 여과된 동상성분은 항

상 전도체 직상부에서 positive(+) peak를 보여주는 반면 이상성분은 negative(-)와 positive(+) peak를 함께 보여 줄 수 있기 때문이다.

선행된 슬럼버저매열 전기비저항탐사의 최저비저항이 약 200 ohm-m이고 선택된 VLF송신소가 호주 NWC(22.3 KHz)이므로 연구지역에서 극저주파의 표피심도(skin depth)는 약 48m이다(Wright, 1988). 따라서, 탐사할 수 있는 심도는 50m 내외일 것이다.

Fig. 9는 7개의 축선에서 동상성분만을 가지고 Fraser filter를 한 것이다. Positive(+) peak의 최고점이 단열대로 추정되는 이상대이다. 좌측그림은 축선1, 2번에서 우측은 축선 3~7번에서 극저주파탐사를 한 결과이다. 각 축선별로 살펴보면 다음과 같다. DJ-D-1번 축선은 3, 6, 8, 13.5, 14.5, 17 지점

에서 peak를 보이고 있다. peak의 크기가 다른 측선에 비하여 낮은 것으로 보아 이상대가 심부에 존재하리라 판단된다. DJ-D-2번 측선은 1번 측선에 비하여 peak의 양상이 크고 positive(+)와 negative(-)의 차가 크므로 저경사를 가진 단열이 천부에 발달되었으리라 판단된다. 2번 측선의 peak 점은 4.5, 9, 13.5, 15, 18 지점이다. DJ-D-3번 측선은

7 지점에서 최고 peak를 보이고 있으며, 완만한 경사를 보이고 있다. DJ-D-4번 측선은 4, 11 지점에서 peak를 보이고 있으며, 6 지점에서 우측으로 저경사를 가지고 있다. DJ-D-5번 측선은 2, 5, 8, 10 지점에서 peak를 보이고 있다. DJ-D-6번 측선은 7 지점에서 가장 큰 peak를 보이며, DJ-D-7번 측선은 5.5, 7 지점에서 이상대가 보인다.

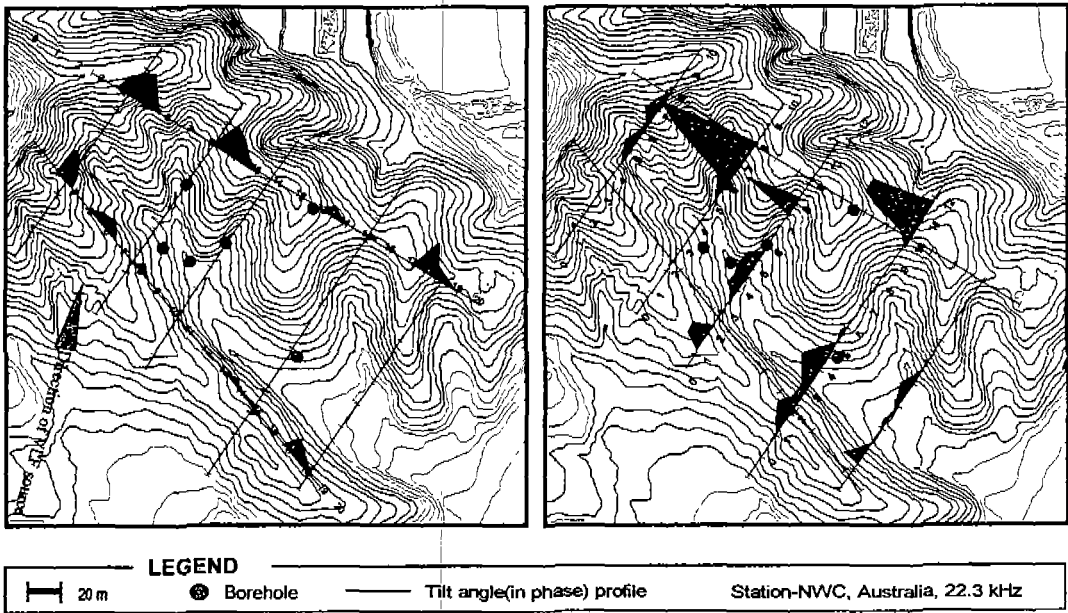


Fig. 9. Freser filtered tilt angle(in phase) profile of the study area.

### 전기비저항탐사와 극저주파 탐사의 비교

Fig 10은 고도 70m에서 수평적인 전기비저항분포도(Fig. 8)와 극저주파 탐사의 여과된 동상성분(Fig. 9)의 이상대를 비교한 그림이다. 둘을 비교해보면 저비저항대와 극저주파 탐사의 이상대가 일치하고 있음을 알 수 있다. 저비저항대는 계곡방향인 NNW방향 그리고 계곡을 가로지르는 NS방향과 NE 방향으로 형성된다. 또, 계곡하단에는 북동방향의 저비저항대가 분포하고 있다. 이는 염기성 암맥의 영향으로 판단되는 곳이다. 또한, 이 지역은 DJ-D-4번 측선으로 1, 2번 공이 연결된 곳이다.

전기비저항탐사와 극저주파탐사와 일치하지 않

는 곳은 우측 산능선부의 두 지역에서이다. 2번 측선의 4~5와 8~10지점이다. 이는 전기 비저항 분포가 천부에 약간의 고비저항체가 존재하다가 심부로 갈수록 저비저항체가 존재하는데, 극저주파탐사는 천부의 고비저항 옆의 저비저항체를 잡았으나, 심부까지 연장되는 큰 저비저항체는 잡지 못하였기 때문에 해석된다. 또한, 극저주파 탐사측선의 배열이 1차장과 나란하지 않은 것도 한 원인일 것이다. 수평적인 전기비저항 분포는 고도 70m에서 계곡의 방향인 NNW방향과 주 구조선방향인 NS 방향이 우세하다(Fig. 6참조). 극저주파의 탐사결과도 계곡방향에 대해서와 골짜기 부분에 대해서는 이상대가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 골짜기를 중심으로 우측 산능선이 좌측 산능선보다 이상대의

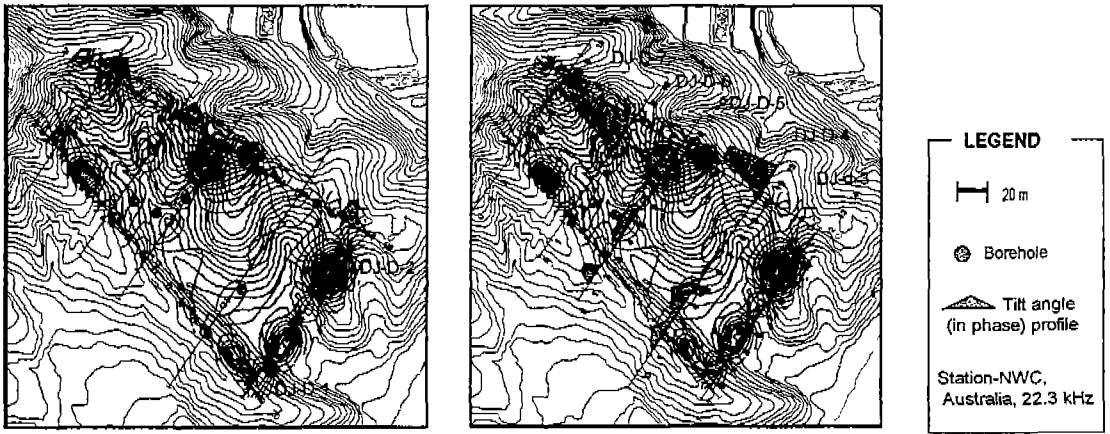


Fig. 10. Comparison of the VLF-EM survey results with horizontal resistivity at EL. 70m

peak가 크게 나타나며, 이것은 지형적인 영향이 좌우하는 것으로 판단된다(Barker and Myers, 1979; 1980).

### 결과 및 토의

기 조사자료와 지구물리탐사 결과를 종합하면, 주단열의 발달방향은 NNW, NS, 그리고 NE 방향으로 크게 나눌 수 있다. NNW방향은 수리시험결과 수리전도도가 가장 큰 방향(Table 3참고)으로 지하수의 주 유동방향으로 판단된다. 수위조사결과를 보더라도 1, 3번 공을 제외하고 등수위선도를 작성하면 지하수의 유동방향은 NNW방향이다. 그리고 전기비저항탐사의 결과에서도 알 수 있듯이 DJ-D-4번 측선을 제외하고 DJ-D-3~7번 측선의 중앙부에서 저비저항체가 발달되어 있고 이것을 연결하면 계곡방향인 NNW방향임을 알 수 있다.

NS방향의 단열선은 쌍극자배열 전기비저항탐사의 결과 DJ-D-1번 측선의 7~11지점 사이, DJ-D-2번 측선의 6~11지점 사이의 저비저항체를 연결해 보았을 때 DJ-D-5번 측선을 가로지르게 된다. 5번 측선의 중앙부와 하부에 평행하게 발달된 저비저항의 분포는 NS방향의 단열분포를 시사하고 있다. 3, 4, 5번 공의 시추자료를 보면, 심도 38~50m 지점에서 수리전도도가 높은 염기성 암맥이 분포하는 바 NS방향의 연관성이 있다고 판단되며 이러한 NS 방향은 선구조의 방향과 일치한다.

계곡을 가로지르는 또 다른 방향인 NE방향은 염기성 암맥의 주 연장방향과 일치하는 방향이다. 쌍극자배열 전기비저항탐사의 DJ-D-4번 측선을 보면, 측선 중앙 부근에서 저비저항체를 찾아 볼 수 없다. 이는 10m이상인 염기성 암맥의 영향으로 판단되는데 측선 중앙부의 2번 공의 상부와 측선 우측의 1번 공의 심도 80m 지점에서 고비저항체가 그 이유이다. RQD 값과 Lugentest 결과를 볼 때, 절리빈도에 무관하게 염기성 암맥과 암맥주변에서 수리전도도가 높으므로 암맥의 연장방향 주변에 위치한 시추공에서 수위변화는 화강암에서의 것과는 다른 특성을 보이는 것이다. 그리고 암맥은 지형적으로 계곡에 가로지는 방향이므로 계곡방향으로 유동하는 지하수를 어느 정도 차단하는 효과를 가질 것으로 판단된다.

언급한 3개 단열대의 방향성은 수평적인 전기비저항의 분포로 판단할때, 천부와 심부로 구별된다. 천부는 계곡방향(NNW)과 구조선방향(NS)이 우세하고 심부는 천부의 방향과는 구별되는 뚜렷한 NE방향이다. 이 방향은 3개의 시추공에서 BHTV점층결과를 통한 경사각과는 비교할 수 없으나 방향성은 같다(Fig. 8).

본 연구에서, 물성의 차이를 이용한 지구물리탐사는 단열중 지하수의 유동로 역할을 하는 일부 투수성 단열의 파악에 대해서는 유용하였으나 투수성 단열을 정확히 묘사하는데는 한계가 있었다. 그렇다고 단열 하나 하나에 parker를 물리고 수리시험

을 할 수는 없는 일이다. 그러므로 시추공내에서 개구성 단열 여부를 파악할 수 있는 경제적이면서도 정밀도가 높은 특별한 탐사방법의 개발이 요구된다. 또, RQD 값은 암반의 질을 나타내는 동시에 절리의 빈도수를 나타낼 수 있는 지표이다(김성균 외, 1995). 그러나 BHTV 검증결과와 일치하지 않는 문제점이 대두되었다. 두 조사의 결과가 어느 정도 차이가 있을지는 또 다른 연구 대상이 될 것이다.

### 결 론

다음은 연구지역에서 지하수의 유동로 역할을 하는 단열대의 분포 특성이다.

1. 단열의 주 방향은 계곡의 방향인 NNW, 구조선의 방향인 NS, 그리고 염기성 암맥의 주 방향인 NE 방향이다.
2. 수리간섭시험결과, BH-2과 5번 공 사이의 투수량계수(transmissivity)가  $4.09 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 로 가장 높으며, 계곡방향인 NNW 방향이 지하수의 주 유동로이다.
3. 3개의 시추공에서 BHTV 검증으로 총 652개의 단열을 분석한 결과 주 방향이 NE방향으로 약 14°정도의 저경사를 가지고 있다.
4. 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사(VLF-EM)의 비교 결과는 일치하였으며 수평적인 전기비저항 분포 분석결과 저 비저항체는 천부에서 NS, 심부에서는 NE 방향으로 분포하고 있다.
5. 지하수위분포, 시추공내의 염기성 암맥의 발달특성, 수리시험의 결과, 그리고 지구물리탐사의 결과를 종합하여 볼 때 본 연구지역은 NE방향으로 관입한 염기성 암맥에 의해서 지하수의 유동을 지형적인 지배로부터 이탈시키는 것으로 판단된다. 이러한 염기성 암맥은 암맥이나 암맥주위를 따라 발달한 연결성이 우수한 투수성 단열로 지하수 유동로 역할을 하는 동시에 지형적으로는 지하수의 주 유동로인 계곡방향(NNW방향)에 대해서 수리적인 방벽(hydraulic barrier)역할을 하는 것으로 추정된다.
6. 1번 시추공이 지대가 높으면서도 수리수두가 낮은 이유는 연결성이 좋은 하부의 염기성 암맥과

암맥주변에 발달한 단열을 따라서 지하수가 배출되는 지역이기 때문이다.

### 참 고 문 헌

Barker, H. A., and Myers, J. O., 1979, VLF-EM model studies and some simple quantitative applications to field results, *Geoexploration*, Vol. 17, 55-63.

Barker, H. A., and Myers, J. O., 1980, A topographic correction for VLF-EM profiles based on model studies, *Geoexploration*, Vol. 18, 135-144.

Fraser, D. C., 1969, Contouring of VLF-EM data: *Geophysics*, Vol. 36, 958-967.

Poddar, M., and Rathor, B. S., 1983, VLF survey of the weathered layer in southern India, *Geophysical Prospecting*, Vol. 31, 524-537.

Saydam, A. S., 1981, Very low-frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements, *Geophysics*, Vol. 46, 1594-1605.

Wright, J. L., 1988, *VLF interpretation manual*, 85.

김성균, 김영화, 박창업, 서만철, 송무영, 장보안, 정상용, 조봉근, 1994, *지질공학 원론*, 교학연구사, 282.

민경덕, 서정희, 권병두, 1994, *응용지구물리*, 우성, 229-433.

박희인, 이준동, 정지곤, 1977, *한국지질도(유성도 폭)*, 한국자원연구소.

배대석, 1996, *편마암지역 지하공동 주변 단열암반의 지하수유동특성 연구*, 충남대학교 박사학위논문, P. 198.

이영남, 신기철, 정연문, 서영호, 윤상필, 이명성, 김대영, 주광수, 우익, 송명준, 박진우, 1997, *지하 처분 모의시험시설의 부지특성규명 연구*, 현대건설주식회사 기술연구소, KAERI/CM-07/5/96, P. 532.

임정용, 이동영, 김영화, 박동국, 임창은, 1982, *한국 수리지질도(대전북부 감천유역)*, 한국자원연구소.

정승환, 김정호, 조인기, 전정수, 1992, 종합적 물리 탐사에 의한 파쇄대 및 심부지하수 탐사, 자원 공학, Vol. 2, No. 2, 115-130.

정지곤, 서만철, 김경수, 김형중, 1997, 유성온천지역의 지질구조 및 지온분포연구, 지질공학, Vol. 7, No. 3, 173-189.

한국전력기술주식회사, 1995, 정밀지질조사 보고서, 341.

화랑대연구소, 1993, 유성온천 확대예정지구 조사결과 보고서, 대전광역시 유성구청, P. 48.

화랑대연구소, 1988, 유성온천지구 외곽지역의 온천 부존가능 연구, 대전시, P. 205.

---

김천수

한국원자력연구소 심부지질환경특성연구분야

대전광역시 유성구 덕진동 150

TEL : (042) 868-2063

FAX : (042) 868-2063

e-mail : ncskim1@nanum.kaeri.re.kr

송무영, 조성현

충남대학교 자연과학대학 지질학과

대전광역시 유성구 궁동 220

TEL : (042) 821-6423

FAX : (042) 822-9690

e-mail : mysong@hanbat.chungnam.ac.kr