The Journal of Engineering Geology, Vol. 2, No.2, Oct., 1992., pp.113-130

綜合的 物理探査에 의한 破碎帶 및 深部 地下水 探査

Fracture mapping and deep-seated ground water exploration in the crystalline rocks by integrated geophysical techniques

정승환(Chung, Seung Hwan)	한국자원연구소
김정호(Kim, Jung Ho)	한국자원연구소
조인기(Cho, In Ky)	한국자원연구소
전정수(Jeon, Jeong Soo)	한국자원연구소

요약/Abstract

地下 深部에 발달된 破碎帶 및 斷層등은 地下水의 流通通路가 되어 深部 地下水 開發과 직접적인 관련이 있다. 그러므로 地表에서 地下 破碎帶 및 斷層을 探知함은 深部 地下水 開發 對策 樹立에 대단히 중요하다. 本 硏究에서는 이와 같은 問題에 대한 物理探査法의 확립을 위해 慶州 보문 觀光團地內에서 다수의 物理探査法을 동원하여 종합적인 探査를 실시 그 資料를 解析하였다. 慶州地域은 磁力探査, VLF 電磁탐사, 雙極子 配列 電氣探査, CSAMT 探査등이 實施되었다.

磁力探査의 目的은 貫入岩으로 推定되는 火成岩의 分布狀況의 파악에, VLF 電磁探査는 地表淺部의 破碎帶의 探知에 있다. 雙極子 配列 電氣探査는 비교적 淺部의 比抵抗 分布및 斷層, 破碎帶의 探知에, CSAMT 探査는 비교적 深部까지의 比抵抗 分布및 斷層, 破碎帶의 探知에 있다.

慶州地域 探査資料의 종합적인 解析 結果 磁力探査에 의해 堆積岩 하부에 발달하는 花崗岩의 分布狀況을 把握할 수 있었으며, VLF 探査로써 地表淺部의 多數의 破碎帶를 확인하였다. 磁力探査와 電氣探査, 그리고 電磁探査의 종합적인 解析에 의해 거의 南北 방향으로 달리는 큰 構造線 및 比抵抗 分布 狀態를 把握할 수 있었으며 이에 의하여 試錐가 推薦되었다.

Groundwater in crystalline basement is controlled primarily by tectonic fractures. It is evident that the delineation of the heavily faulted area and/or fractures deeply developped should be considerable value in deep-seated low enthalphy geothermal

water. Electrical and electromagnetic methods have effectively been employed to map hydraulic faults and shear zones for groundwater exploration. In this study VLF, dipole-dipole resistivity, controlled source audio-frequency magneto-telluric(CSAMT) and magnetic methods were applied in the Bomun resort area, adjacent to Kyongju city, southeastern part of Korea. The integrated geophysical tools employed in this experiment can be manifested themselves as :

1. Magnetic high for granite intrusions which is more favorable for geothermal gradient increase in depth.

2. VLF cross-over trends for mapping linear shallow conductive fractures and shear zones.

3. Dipole-dipole resistivity distributions for the deep-seated(less than 500m in depth) fractures and shear zones. The dipole-dipole resistivity field data were inverted to the true resistivity distribution with two-dimensional automatic inversion program based on the finite-difference method.

4. CSAMT provides an efficient way of delineating fractures and fault zones if the depth is greater than about 500m.

序 言

우리나라 地下水 및 溫泉은 대부분 堆積岩의 層序形 帶水層 보다는 破碎帶 및 龜裂帶를 따라 賦存하는 경우가 많으므로 深部에 발달된 破碎帶 탐지가 地下水 및 溫泉探査에 대단히 중요한 指針이 된다. 一般的으로 斷層 破碎帶에는 粘土鑛物 및 地下水가 많이 含有되어 있어 주위보다 電氣 傳導度가 상당히 높은 傾向을 갖는다. 특히 地表에 露出되어 있지 않은 破碎帶의 探査시에는 이러한 電氣的 性質을 이용하는 物理探査法인 電氣 및 電磁 探査法이 效率的이다.

本 調査에서는 淺部에 발달된 破碎帶 探知를 위해서는 VLF電磁探査法을 적용하였고, 淺部 및 深部에 발달된 破碎帶를 재확인하기 위하여 電氣 比抵抗 雙極子 探査를 실시하였다. 특히 本 調査에서는 低溫性 溫泉水脈의 探知를 위해서는 深部에서의 地質構造 把握이 중요하므로 深部 物理探査法인 CSAMT(Controlled Source Audiofrequency Magnetotelluric) 探査法을 溫泉調査에 적용하였다. CSAMT 探査法은 근자에 深部 地熱探査 및 深部 石炭, 金屬鑛床 探査에 日本, 美國 등에서 널리 사용되고 있다 (Goldstein and Strangway,1975; Sandberg and Hohmann,1982; 정승환,김정호,1988). 이 方法의 可探深度는 대략 1km 정도이다.

한편, 本 調査에서는 釜谷溫泉에서 실용성이 확인된 磁力探査도 적용하였다. 磁力探査는 本 調査地域에서와 같이 堆積岩層內를 貫入하는 花崗岩의 分布를 아는데 有用하다. 貫入한 花崗岩의 周邊에는 貫入과 관련된 破碎帶가 비교적 잘 발달되어 溫泉水의 通路가 될 것으로 생각되며

또한 미약하나마 花崗岩이 熱源으로 作用할 것으로 보여 磁力探査를 실시하였다.

本 調査에서는 획득된 資料를 최신 解析技法을 사용하여 相互 比較하므로서 보다 精密하고 확실한 溫泉水脈과 관련된 破碎帶 및 斷層과 같은 地質 構造線의 導出에 注力하였다.

物理 探査 概要

本 章에서는 本 調査에 사용된 物理探査法인 雙極子 電氣 比抵抗 探査, CSAMT 探査, VLF 電磁探査 및 磁力探査의 原理와 조사된 探査資料의 解析方法에 관해서 略述한다.

雙極子 配列 電氣 比抵抗探査

雙極子 比抵抗 探査는 Fig 1-A과 같이 電流, 電位電極 間隔 a를 探査目的, 精密度 등을 고려하여 결정하고 a, 2a, 3a, ..., na 間隔으로 단계적으로 이동하면서 電位差(ΔV)를 測定하여 겉보기 比抵抗値(ρ_a)

$$\rho_a = n(n+1)(n+2)\,\pi\, a\,\frac{\Delta V}{I}$$

를 계산한다.

野外探査 結果는 Fig 1-B와 같이 電位電極 중심과 電流電極의 중심을 연결하는 선을 밑변으로하는 직각이등변 삼각형의 꼭지점에 겉보기 比抵抗값을 기입하여 水平 및 垂直的 變化를 탐지할 수 있다. 이와 같은 雙極子配列 探査 結果 획득된 겉보기 比抵抗 圖面을 假斷面圖(pseudo-section)라고 한다. 이 假斷面圖에 나타난 겉보기 比抵抗값은 岩石의 電氣 比抵抗

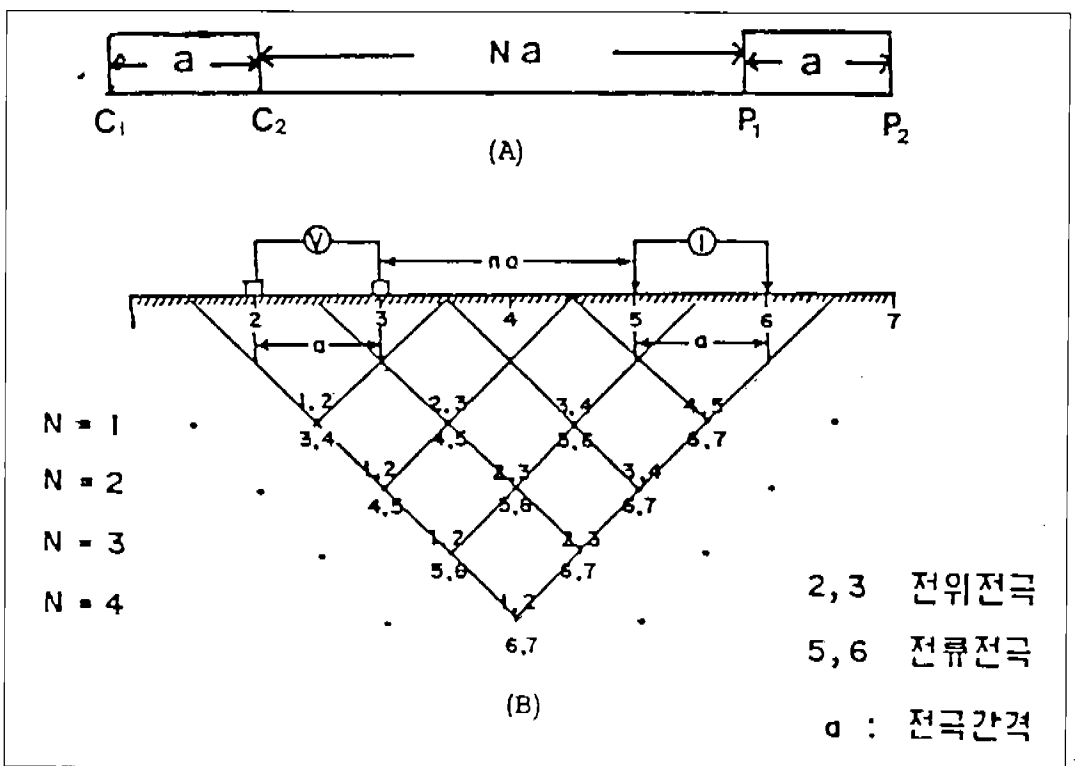


Fig. 1 (A) Electrode configuration for the dipole-dipole electrical resistivity survey.
(B) Plotting scheme of apparent resistivity pseudosection.

値를 나타내는 것이 아니고 아울러 표시된 垂直點이 얻어진 比抵抗값을 야기시키는 진짜 深度를 표시하는 것은 아니다. 그러므로 이를 解析하기 위해서는 컴퓨터에 의한 解析 프로그램이 필요하다.

雙極子 配列方法은 다른 配列方法 - Wenner 配列이나 Schlumberger 配列 등 - 과 달리 신속하게 2次元的 垂直 - 水平探査를 행할 수 있어 비교적 廣域的으로 지하 2次元 構造, 특히 電氣傳導度 構造(Geoelectric structure)를 파악할 수 있는 장점이 있다. 한편 雙極子 電極間隔 a 를 원하는 可探深度 또는 地質學的 條件에 따라 變更 調査할 수 있으며 電極間隔 展開數(number of separation) n을 조정하므로서 垂直變化 양상을 신속하게 탐지할 수 있다.근본적으로 Wenner 配列이나 Schlumberger 配列을 채용한 垂直探査는 1 개점 하부의 深度에 따른 比抵抗의 變化 양상을 파악하고자함에 목적이 있으므로 1 차원적 探査의 범주에 속한다. 지하 1 개점 하부의 자세한 情報 획득에는 垂直探査가 효율적이며 정량적이라 할 수 있다. 그러나 岩盤地下水의 경우와 같이 국부적으로 발달하는 破碎帶 탐지의 問題는 그 대상이 2 차원 構造이므로 2 차원적인 探査를 필요로 한다. 雙極子 配列 探査는 1 점이 아닌 1 측선상에서 水平 - 垂直探査를 동시에 수행하므로 2 차원적 探査로 간주된다. 물론 雙極子 配列 探査의 측선상에 각 측점마다 垂直探査를 수행한다면 1 개점이 아닌 측선상의 하부에 2 차원적인 比抵抗 分布를 把握할 수 있으나, 探査기간 및 비용면에 있어서 雙極子 配列 探査에 비해 대단히 비경제적이 된다. 또한 垂直探査는 각 측점 사이에 국부적인 異常帶가 존재할 경우 이를 놓칠 우려가 많으나 雙極子 配列 探査는 연속적인 2 차원 探査이므로 이러한 가능성이 상대적으로 낮다고 할 수 있을 것이다. 그러나 雙極子 配列方法에 의한 比抵抗 探査시 地表 淺部의 水平的 電氣傳導度 變化(lateral conductivity variation)에 대단히 민감하므로 그로부터 야기되는 異常帶를 정확히 解析할 수 없는 어려움이 있다. 이는 雙極子 配列 探査가 垂直探査에 대해 갖는 큰 단점의 하나로 볼 수 있다. 이러한 難點을 해결하기 위해서 本 硏究에서는 임의의 地下構造에 대한 理論値를 계산할 수 있는 컴퓨터에 의한 數値 모델링 方法 및 逆算法을 이용하였다(김정호외, 1988; 김정호외,1990).

CSAMT 探査

MT(Magnetotelluric)探査는 0.0001 - 100Hz 周波數 帶域의 自然電磁波(自然場)를 이용하며 그 探査深度가 수 km에 달하기 때문에 地熱探査, 石油探査, 地殼構造의 硏究 등에 널리 이용되어온 方法이다. AMT(Audio-frequency Magnetotelluric)探査는 周波數 10-10,000Hz의 可聽 周波數 帶域을 이용하므로 그 可探深度가 1 km 이하의 MT에 비해 상대적으로 淺部의 電氣傳導度 分布의 把握을 위해 제안된 方法이라 할 수 있다. 그러므로 AMT 探査는 金屬鑛床, 地熱, 地下水 探査에 널리 사용되어 왔다. AMT 또는 MT 探査는 自然場을 이용하므로 探査를 위한 에너지원이 필요없다는 큰 강점을 갖는다. 또한 平面波 가정이 가능하기 때문에 解析이 상대적으로 비교적 용이하다는 장점이 있다. 이에 반해 바로 自然場을 그 에너지원으로 이용하므로 信號가 대단히 약할 경우가 많기 때문에 雜音이 함유될 소지가 많고 波源의 방향을 알 수 없으며 시간적으로 그 방향 및 세기가 변한다는 弱點을 갖는다.

이러한 問題點을 극복하기 위해 自然場을 에너지원으로 사용하는 대신에 수 km 이하의 양단을 접지한 긴 전선에 電流를 흘려 이를 에너지

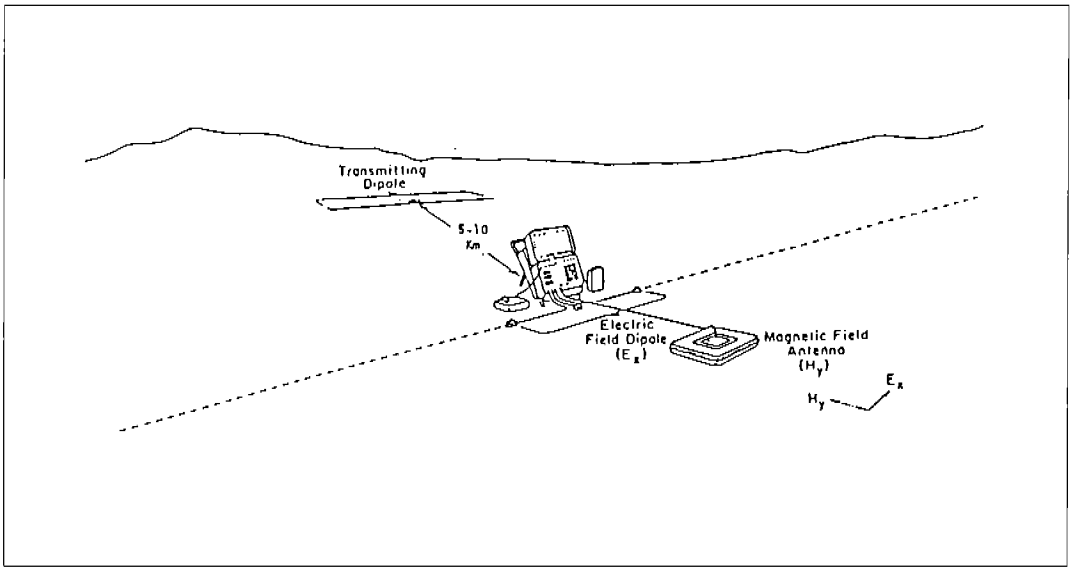


Fig. 2 Schematic illustration of CSAMT survey

원으로 사용하는 方法이 시도되었다. 현재 일반적으로 사용되는 CSAMT 探査의 周波數 帶域은 0.1 - 1,000Hz 이다.

CSAMT 探査는 電氣場 및 磁氣場을 測定한다는 점에서는 MT 探査와 동일하나 MT 혹은 AMT 探査가 텐서 測定을 필요로하는 반면에 CSAMT 探査는 電氣場 및 磁氣場 각각의 단일 成分만을 測定함으로써 가능하다. 이는 CSAMT 探査에서는 에너지원의 방향을 알고 있기 때문에 가능하게 된다. 일반적으로 測定되는 成分은 에너지원인 線電源의 방향을 x 축으로 할 때 電氣場은 이와 나란한 成分(Ex component)이 測定되며, 磁氣場은 이에 垂直인 成分(Hy component)을 이용한다(Fig. 2). 測定된 Ex 및 Hy로부터 겉보기 比抵抗 및 位相差(phase difference)를 계산하여 이를 이용하여 解析한다. CSAMT의 겉보기 比抵抗은 MT에 사용되는 Cagniard 比抵抗을 사용하며 계산식은 다음과 같다.

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega}\left|\frac{Ex}{Hy}\right|^2$$

$$\phi = \phi_E - \phi_H$$

where ρ_a : apparent resistivity in ohm-m
Ex : E-field magnitude in mV/km
Hy : H-field magnitude in Ampere/meter
μ : magnetic permeability in vacuum
ω : angular frequency
ϕ : phase difference
ϕ_E : E-field phase
ϕ_H : H-field phase

CSAMT 探査資料의 1차적인 解析의 시작은 雙極子 配列 電氣 比抵抗探査와 마찬가지로 겉보기 比抵抗 假斷面圖를 작성하는 것이다. CSAMT 探査資料의 假斷面圖 작성 원리는 低

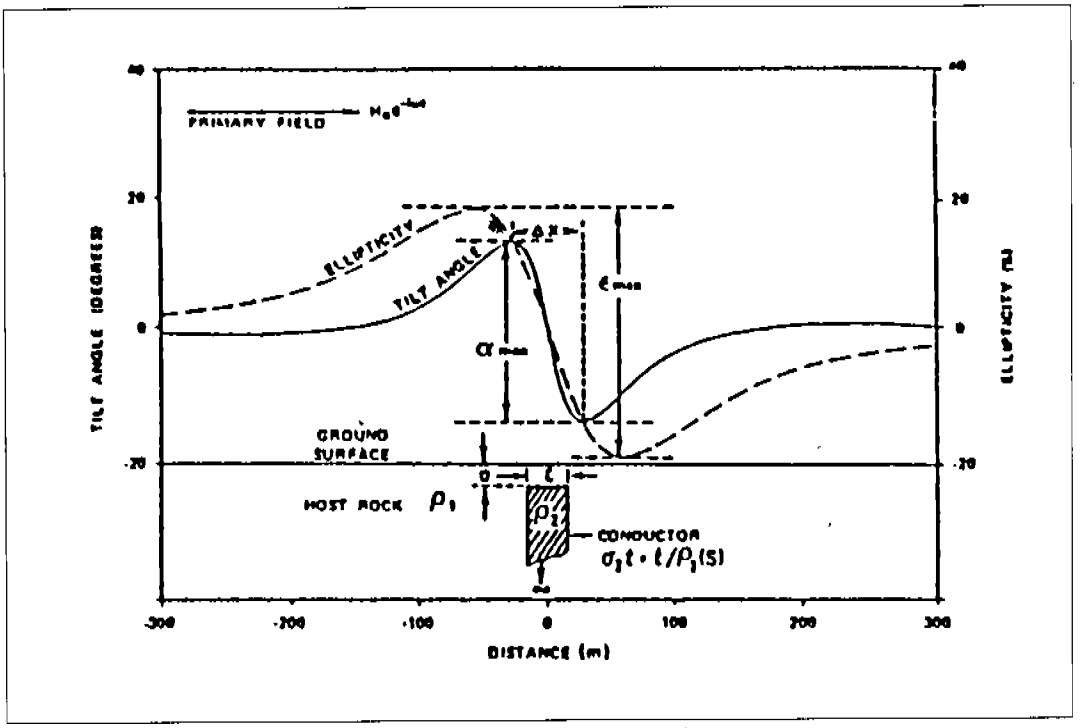


Fig. 3 Typical example of tilt angle and ellipticity over conductor.

周波數는 深部의 資料에 高周波數는 淺部의 資料에 대응됨에 있다. 이는 雙極子 電氣 比抵抗探査에서 電位電極과 電流電極간의 거리와 深度와의 관계와 같다. 따라서 CSAMT 探査資料의 假斷面圖上에서 가로축은 측점, 세로축은 周波數이며 세로축의 周波數는 밑으로 갈수록 低周波가 된다. 단일 측점에서 각 周波數에 대해 電氣場 및 磁氣場을 測定하여, 이로부터 상기식을 이용하여 겉보기 比抵抗 및 位相差를 계산하여 假斷面圖를 작성한다.

解析은 現場探査資料와 1차원 水平多層構造에 대한 地層의 두께 및 比抵抗을 計算하는 自動 逆算 프로그램을 作成, 수치 모델링 方法과 逆算 方法을 병행하여 해석하였다(정승환외,1990).

VLF 電磁探査法

電磁探査法은 金屬鑛床 또는 破碎帶나 斷層과 같은 地質構造線에 粘土鑛物 및 물이 많이 含有되어 있어 電氣 傳導度가 높은 電氣的 良導體를 探査하는 方法이다. 이 方法은 一般的으로 地表에서 送信 코일에 交流電流를 흘려 발생하는 1次 磁場이 地下의 良導體에 2次電流(渦電流)를 惹起시키고 이 2次電流에 의한 2次 磁場을 測定하여 良導體의 위치 및 賦存狀況에 대한 情報를 얻어내는 方法이다.

VLF 電磁探査(very low frequency electromagnetic method)란 接地한 수백 피트 높이의 垂直 안테나에 강력한 交流를 통하여 발생하는 대잠수함용의 15 - 25kHz의 周波數 帶域의 電磁波를 信號源으로 사용하여 수신기만으로 鑛體를 探査하는 電磁探査法이다. 우리나라의 경우 濠洲 NWC(22.3kHz)와 日本의 NDT(17.4kHz)를 주로 사용한다.

1次 磁場은 垂直 안테나를 중심으로 球面波로

傳播되나 探査對象 地域이 아주 멀리 떨어져 있으므로 傳播되는 1次 磁場은 均質한 平面波의 성질을 갖는다. 만일 調査 지역내에 鑛體나 傳導性 物質을 많이 포함한 地質構造線이 존재한다면 傳播되어온 1次 磁場은 傳導性 物質 때문에 지면 앞에서부터 뒤로 貫通하는 渦電流를 생성하고 이 渦電流는 다시 화살표와 같은 2次 磁場을 형성한다. 1次 磁場과 2次 磁場의 합에 의하여 타원 분극을 형성한다.

VLF 探査時 測定하는 것은 傾斜角(tilt angle, 同相成分)과 離心率(ellipticity, 異常成分)이다. 대략적인 傾斜角과 離心率은 Fig. 3과 같다. 그러므로 傳導性 鑛體나 地質 構造線의 직상부에서 항상 두 測定値가 0 이 되는 반전점(cross-over point)이 형성되며 이 점들을 연결하면 地質 構造線의 방향을 알아낼 수 있다. VLF 探査에서는 사용 周波數가 15kHz - 25 kHz 정도로 可探深度가 약 50m 내외이므로 淺部의 地質構造 調査에 적합한 方法이다.

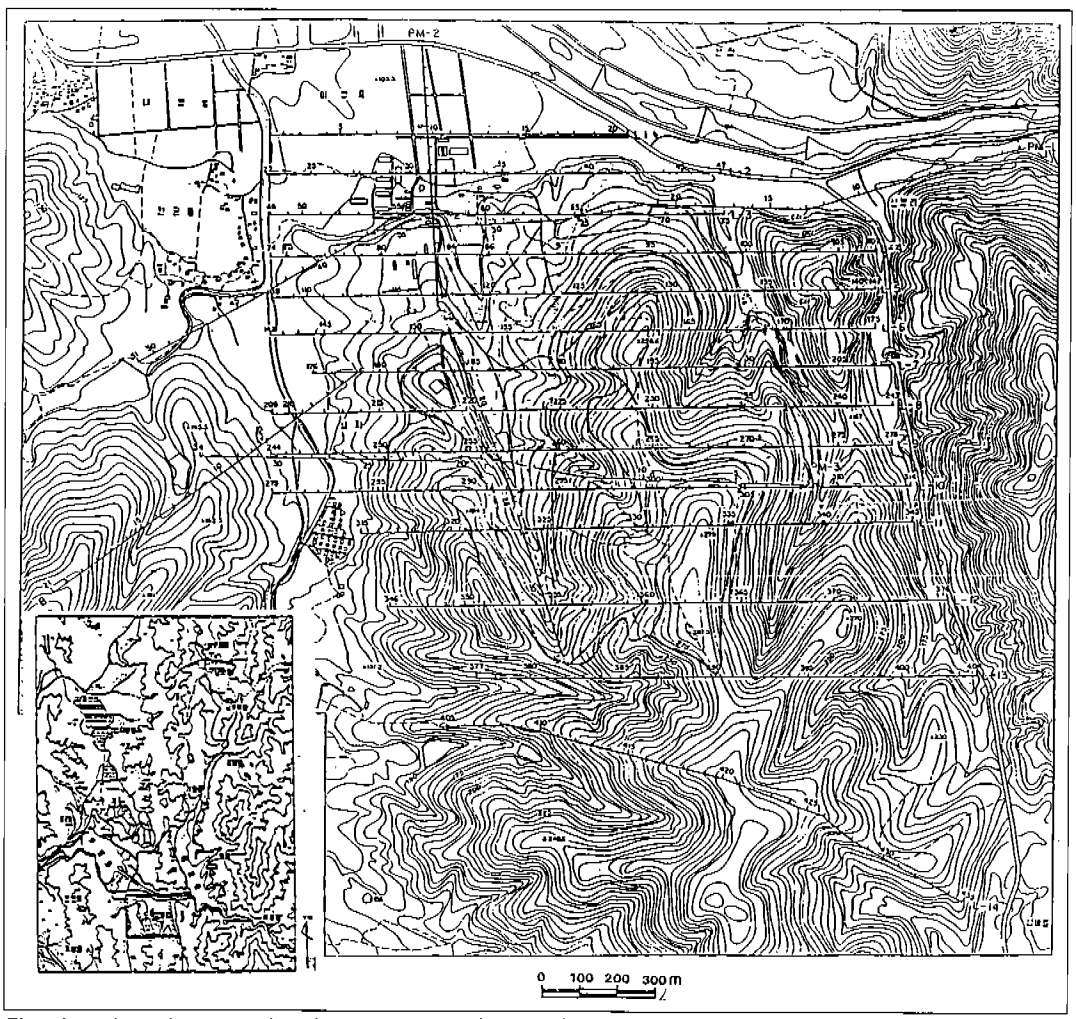


Fig. 4 Location map showing survey area(hatched) and CSAMT transmitter(Tx).
Fig. 5 Survey lines map .

磁力探査

磁力探査는 海上, 陸上 또는 空中에서 地球磁場을 測定하여 이를 土臺로 地下의 磁性體 分布를 아는 것으로 부터 地下構造, 岩質, 資源 등을 調査하는 物理探査法 中의 하나이다. 地殼을 構成하는 岩石은 磁鐵鑛과 같이 强磁性 물질의 함유량에 따라 磁力이 결정된다. 따라서 岩石 및 鑛物의 磁化率에 따라 磁力 强度가 다르므로 서로 다른 磁力 反應을 얻을 수 있다.

本 硏究 地域과 같은 地域에서는 磁性이 강한 花崗岩과 火山岩이 磁性이 약한 堆積層을 貫入하였을 경우에 磁力探査의 結果 圖面으로부터 貫入 岩石의 境界, 傾斜 및 貫入의 형태 및 深度 등을 알 수 있으며 地下 基盤岩의 起伏에 관한 情報를 얻을 수 있다. 本 磁力探査는 核磁氣共鳴型 磁力器(proton magnetometer)를 사용하였으며 磁力 測定値는 現場에서 직접 디지탈로 기억된다. 測定 精密度는 1 gamma 정도이며 磁場의 日變化 補正을 위해 本 探査地域 중 비교적

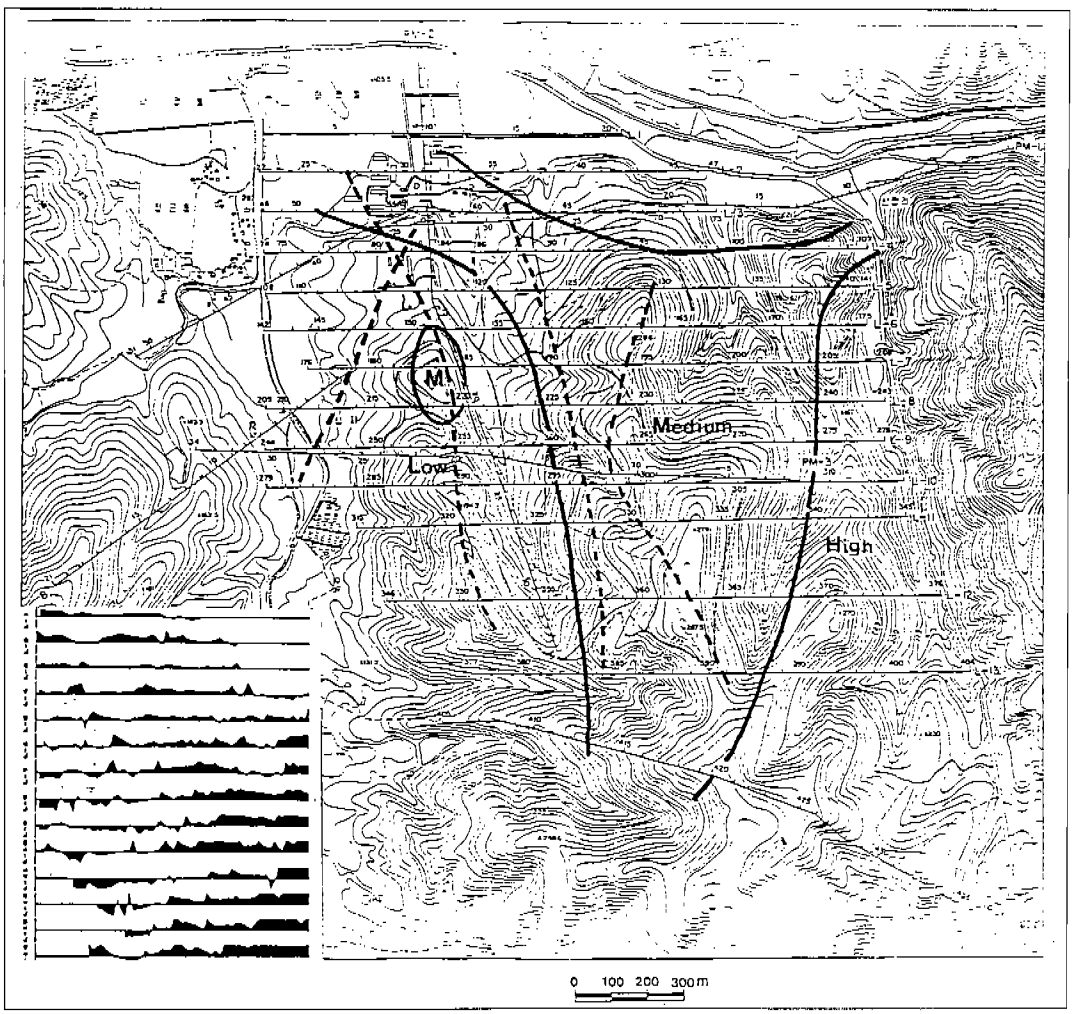


Fig. 6 Total magnetic intensity distribution over the survey line.
Fig. 7 Interpreted magnetic lineament.

가장 變化가 안정적인 곳을 택하여 base station 을 운용하고 매 5초마다 磁力變化를 기록하였다. Base station 에서 기록된 日變化量과 함께 야외에서 測定된 磁力値는 補正 프로그램에 의하여 정밀하게 補正하였다. 本 探査地域에 대해서는 정량적 解析 보다는 정성적 解析에 치중하였다.

物理探査資料의 解析

本地域에서의 物理探査는 磁力探査, VLF 電磁探査, 電氣 比抵抗探査, CSAMT 探査의 4종류의 物理探査法이 종합적으로 투입되었다. 물성적인 측면으로 고찰할 때에 磁力探査는 투자율(magnetic permeability)등과 같은 磁性이 대상이 되며, 나머지 VLF 探査, 比抵抗 探査및 CSAMT 探査는 電氣比抵抗과 같은 電氣的인 성질이 그 대상이 된다. 또한 공간적인 각 探査의 적용성으로 생각하면 磁力 및 VLF 探査는 지표상의 水平的인 探査의 성격을 갖고, 電氣探査 및 CSAMT 探査는 水平的인 調査 뿐 아

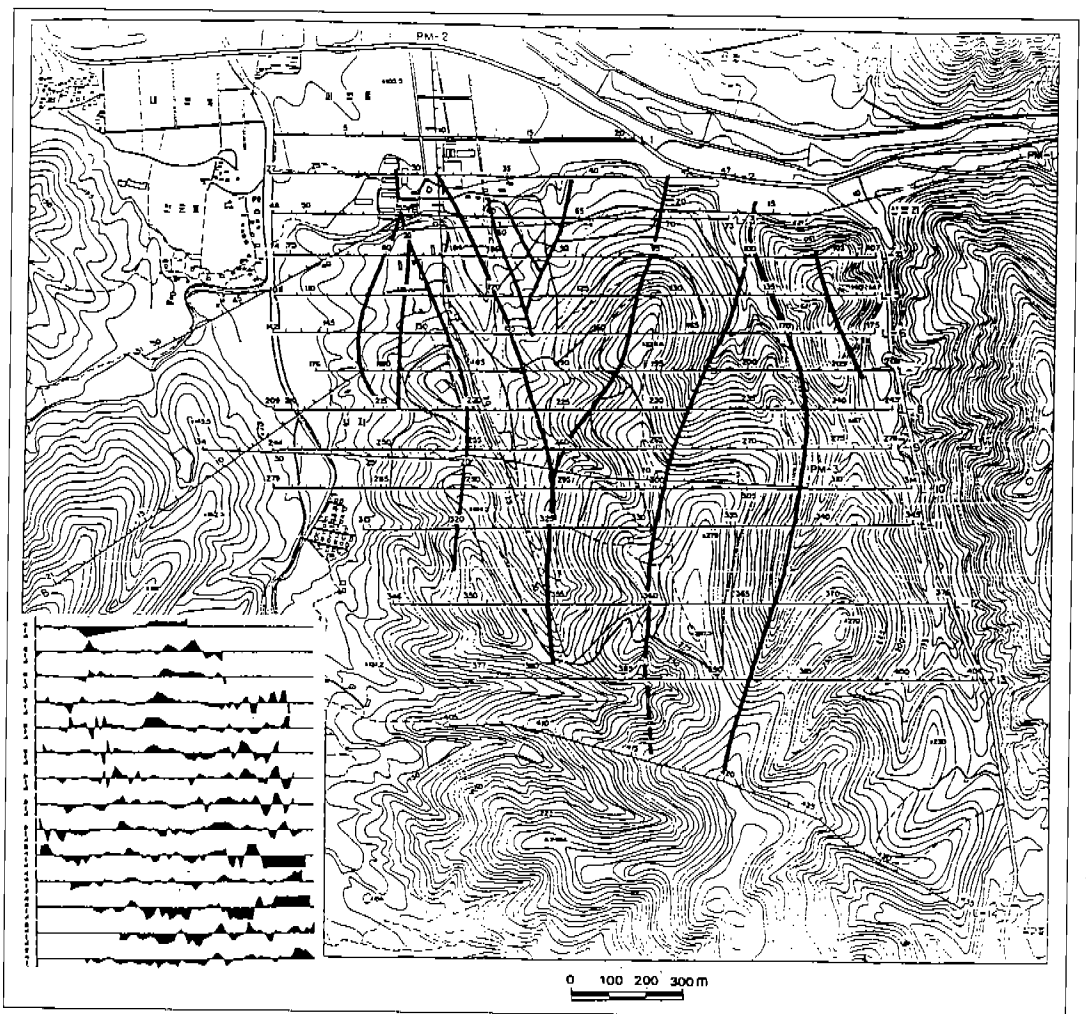


Fig. 8 VLF ellipticity of 22.3kHz(NWC) over survey lines.
Fig. 9 Interpreted lineament using VLF method.

니라 深度에 따른 물성의 변화를 把握할 수 있는 水平-垂直 探査로 생각될 수 있다. 堆積岩보다 火成岩이 그 磁力値가 높이 나타나므로 磁力探査의 목적은 지하의 熱源으로 간주될 수 있는 火成岩體의 分布 및 개략적인 構造線(lineament)의 把握에 있다. VLF 電磁探査는 지하 50m이내의 淺部 破碎帶의 分布狀態의 把握에 그 목적이 있다. 電氣 比抵抗 探査는 100 - 250m 내외의 深度에 대한 電氣 比抵抗의 分布상태의 把握에 그 목적을 두었다. CSAMT 探査는 지하 300 - 1,000m의 深部에 있어서 電氣 比抵抗 分布의 把握에 그 목적이 있다. 본調査에서는 상기한 바와 같은 각 探査法의 목적에 부합되도록 探査法을 설계, 실시하였다.

Fig. 4는 調査地域의 位置圖이며 빗금친 부분이 調査地域에 해당되며 Tx로 표시된 선은 CSAMT 探査의 送信源의 位置를 나타낸 것이다. Fig. 5는 調査地域 測線圖로써 Fig. 4의 빗금친 부분에 해당된다. 이하 각 探査의 結果 및 解析結果를 토의하고 이를 종합적으로 검토한다.

磁力 探査

磁力探査는 測線 1부터 14까지 總 延長 약 21km에 달하는 全 測線에 걸쳐 수행되었다. 測點 間隔은 약 25m이다. 測線 L-1에서 2까지의 2 개 測線은 電力線이 많아 電力線에 의한 높은 磁氣場 雜音 때문에 測定이 불가능한 測點들이 많았다.

Fig. 6을 보면 가장 뚜렷한 양상은 測線의 右側, 즉 東側이 西側部에 비해 전반적으로 磁力値가 높으며, 어느 정도 低磁力値를 보이는 地域, 중간 정도의 자력치를 보이는 지역과 高磁力値를 보이는 地域으로 구분될 수 있다는 점이다. 磁力値 分布의 高低 및 磁力線構造(magnetic lineament)를 추론하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 자력선의 분포양상을 보면 서쪽의 북북동-남남서 방향의 자력선구조를 중심으로 하여 저자력대와 중간 자력대로 구분되며, 동쪽의 북북동-남남서 방향의 구조선을 따라 중간 자력대와 고자력대가 구분된다.

雙極子 配列 比抵抗 探査를 토대로하여 두 지점에 試錐가 실시되었는 바 이 두 지점은 測線 L-3의 68번 부근과 L-7의 185번 부근에 대응된다. 두 試錐孔에서 花崗岩이 나타나는 深度는 68번 부근의 試錐孔에서는 약 500m에서, 185번 부근의 試錐孔에서는 약 200m에서 나타났다. 이러한 사실은 測點 68번 試錐孔이 低磁力値에, 185번 試錐孔은 高磁力値에 해당되는 사실과 잘 부합되며 따라서 本 地域의 磁力値의 高低로써 花崗岩體의 상대적인 高低의 추론이 가능할 것이다. 本 그림을 토대로 하여 전반적인 花崗岩體의 발달 상태를 추론할 때에 東側部가 西側部보다 火成岩體의 深度가 얕다고 추론할 수 있을 것이다.

VLF 電磁探査

VLF 電磁探査는 測線 L-1부터 14까지의 14개 測線, 總 延長 약 21km에 걸쳐 磁力探査와 동시에 실시되었다. 測點 間隔은 약 25m이다. 測定周波數는 일본의 NDT 방송국의 17.1kHz, 호주의 NWC 방송국의 22.3kHz, 하와이의 NPM 방송국의 23.4kHz의 3개의 周波數에 대해 동시에 測定되었다. 3 종류의 周波數에 대한 測定資料중 本 地域의 主構造線의 방향이 北北西-南南東 또는 北北東-南南西 방향이므로 NWC의 22.3kHz의 資料가 解析에 이용되었다. 일본 및 하와이의 방송국에 대한 資料를 그려봄으로써 이러한 사실을 간접적으로 확인할 수 있었다. 이하 모든 資料는 호주의 VLF 送信源에 의한 探査資料를 의미한다.

Fig. 8은 異相成分을 그래프로 나타낸 것이며 각測線의 프로파일상에서 垂直線은 電磁場의 세

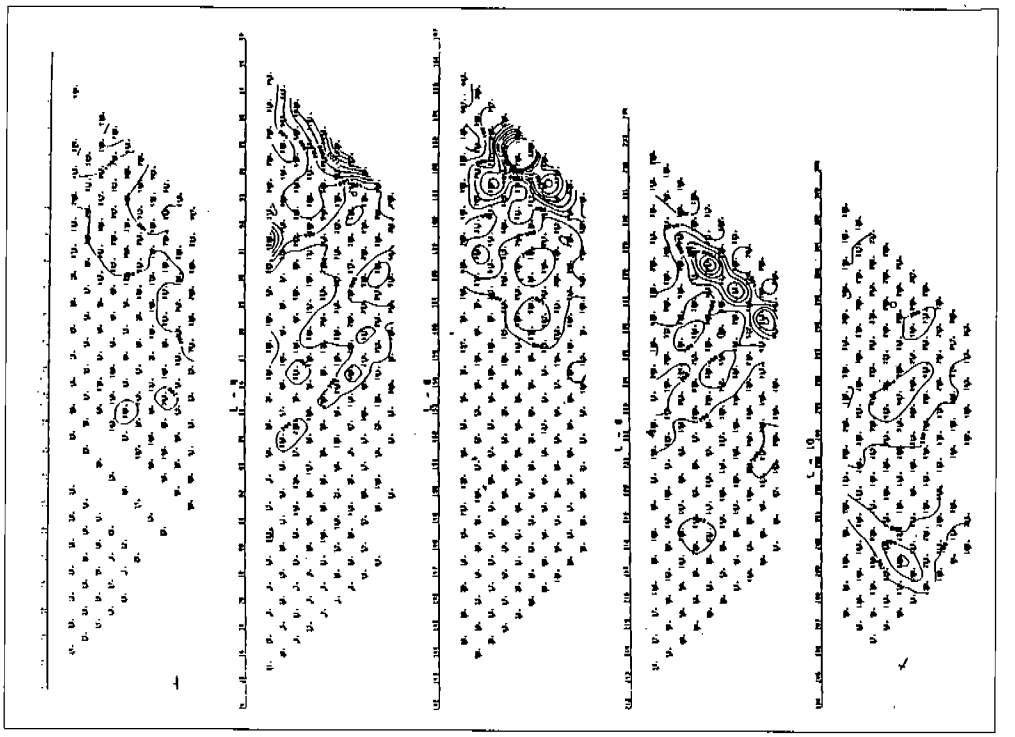


Fig. 10 Apparent resistivity pseudosections of Dipole-dipole resistivity survey.

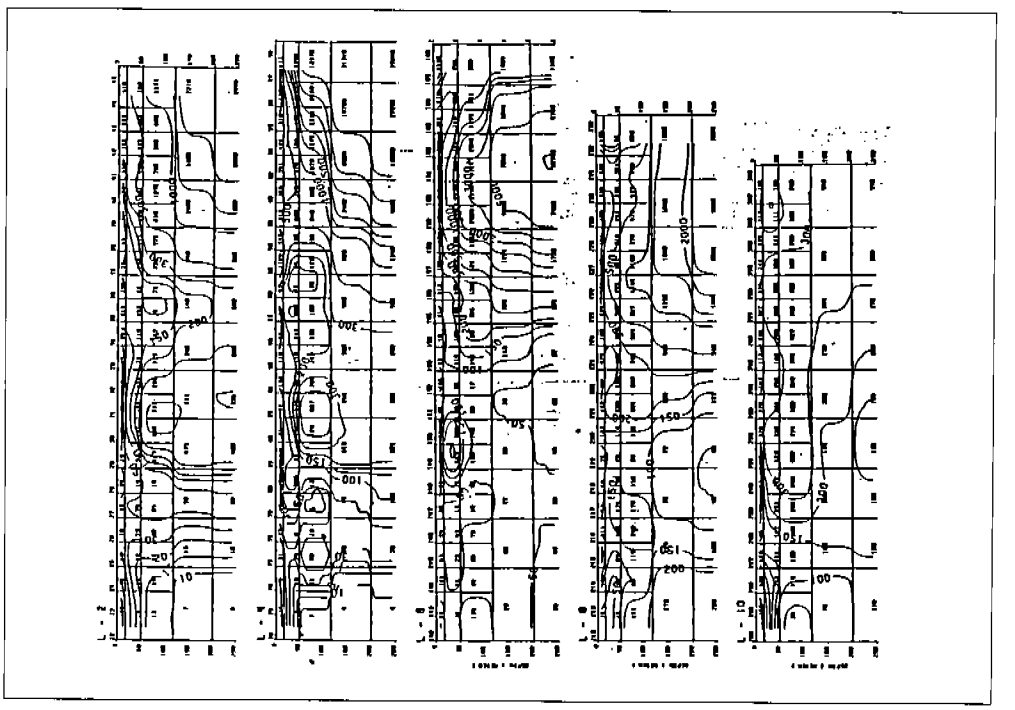


Fig. 11 Subsurface resistivity distribution calculated from 2-D inversion method.

기에 해당된다. 本 資料는 VLF 地形補正 전산 프로그램을 이용하여 모두 地形效果에 대한 補正을 수행한 것이다(정승환외,1990). 垂直線이 없는 測點은 상기한 높은 雜音 때문에 測定이 불가능하였던 測點에 해당된다. 14개의 全 測線들 中, 測線 L-1에서 2까지의 2개 測線은 電力線이 많아 電力線에 의한 높은 電磁場 雜音 때문에 測定이 불가능한 測點들이 많았다.

VLF 探査資料의 解析에 있어서 同相 및 異相成分의 값도 중요하지만 가장 중요한 것은 測定치의 부호가 바뀌는 제로축과의 交叉点(zero crossing)이다. 이는 垂直 傳導體의 직상부에서 測定값의 부호가 반전되며 이는 破碎帶의 位置를 말해 주는 것이기 때문이다. 즉 本 地域의 西쪽은 北-南, 또는 北北西-南南東 방향이, 중앙부는 北北東-南南西 방향이 우세하며 동쪽에서는 남-북방향의 구조선이 나타나고 있다. Fig.9는 동상성분 및 이상성분을 토대로 하여 추론한 淺部 破碎帶 내지는 構造線이다. 西側은 北北西-南南東 방향이, 중앙부에서는 北北東-南南西 방향이 우세하며 동측에서는 동상성분과 마찬가지로 골짜기를 따라서 구조선이 발달하고 있다. 그림 9는 앞으로의 淺部 地下水 探査 및 確保에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

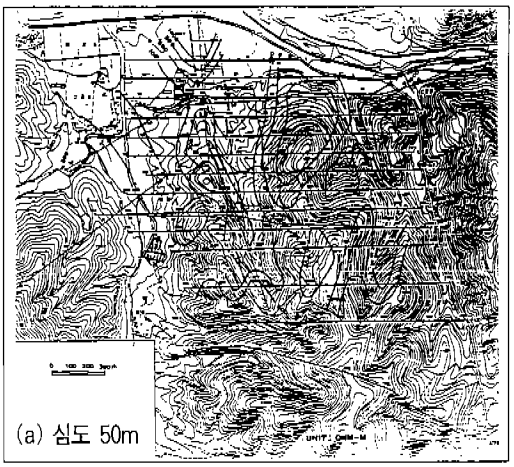
電氣 比抵抗探査

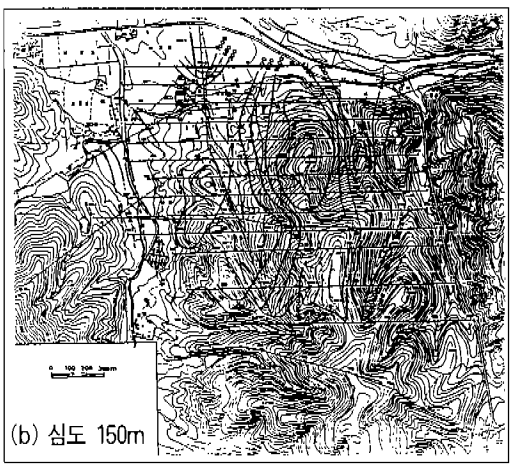
電氣 比抵抗 探査는 雙極子 配列을 채택하여 Fig. 5의 測線圖와 같이 總 延長 12km에 걸쳐 測點間隔 50m로 수행되었다. 電氣探査가 수행된 測線들은 探査 효율의 극대화를 위해 CSAMT 探査와 겹치지 않도록 짝수번호의 測線을 선택하여 실시되었다. 本 雙極子配列 電氣探査의 電極間隔 a는 100m 또는 50m, 電極展開數 n는 各各 10 내지 8이며 本 地域의 수백 ohm-m 정도의 電氣 比抵抗을 고려할 때에 最大 可探深度는 각각 약 500m 와 250m 내외가 된다.

探査結果 획득된 現場資料 겉보기 比抵抗 假斷面圖를 각 測線간의 分布狀態를 쉽게 把握할 수 있도록 Fig. 10에 일부 도시한 것이다. 전반적인 각 測線의 겉보기 比抵抗 分布를 보면 測線 L-2, L-4, L-6, L-8의 4 개 測線은모두 유사한 分布狀態를 갖으며, 특히 西側部의 100 ohm-m이하의 가장 낮은 比抵抗을 나타내는 부분과 중앙의 대략 100 ohm-m이상 500 ohm-m이하의 中間정도의 比抵抗을 보이는 부분과 東側部의 대략 500 ohm-m 이상의 高比抵抗帶로 삼분될 수있음을 알 수 있다. 이에 반해 測線 L-11은 測點 262 부근을 중심으로東, 西의 高, 低 比抵抗帶로 나뉘어 짐은 다른 測線과 유사하나 그 차이가 다른 測線에 비해 뚜렷하지 않다.

전술한 겉보기 比抵抗分布가 東側部와 中間部分, 西側部分의 3 부분으로 나뉘어질 수 있음이 眞比抵抗 分布圖인 Fig.11에서 뚜렷히 나타난다. 특히 中央의 中間比抵抗帶와 東쪽의 高比抵抗帶의 구분은 더욱 뚜렷하게 나타난다. 高比抵抗帶와 中間比抵抗帶의 기준을 500 ohm-m 내외로 생각하고 本 雙極子探査의 可探深度를 고려하여 이 두 比抵抗帶을 구분하는 선은 測線 L-2의 39번, L-4의 90번, L-6의 157번, L-8의 225 번을 연결하는 선이 된다. 한편 100 - 500 ohm-m의 中間 比抵抗帶와 100 ohm-m 이하의 低比抵抗帶를 구분하는 선은 그다지 뚜렷하지는 않으나 대략 測線 L-2의 29번, L-4의 82번, L-6의 153번, L-8의 221번을 연결하는 선이 된다. 한편 測線 L-10 에서는 다른 測線과는 달리 뚜렷하지는 않으나 測點 293부근을 중심으로 西側의 低比抵抗帶와 東側의 高比抵抗帶로 나눌수 있다.

이와같은 比抵抗의 分布狀態가 뚜렷하게 구분될(zoning) 수 있음은 結晶質岩內에서의 地下水 探査에 있어서 상당히 중요한 의미를 갖는다. 즉





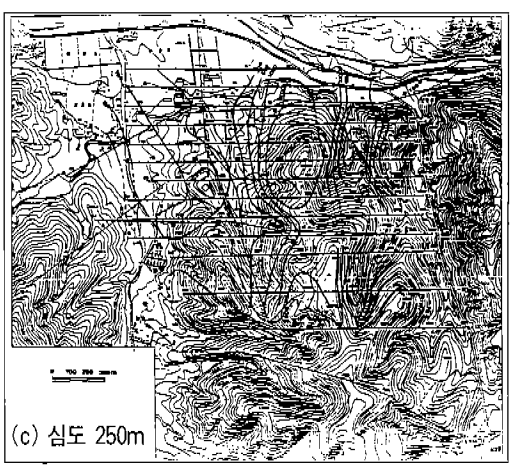


Fig. 12 Horizontal resistivity distribution at each depth. Depths of (a),(b) and (c) are 50m 150m, and 250m, respectively.

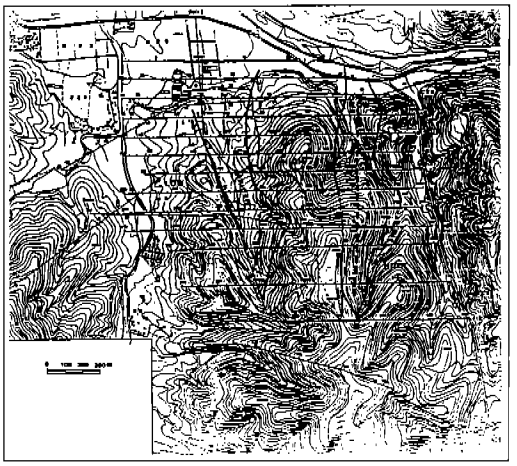


Fig. 13 Resistivity distribution and lineament inferred from dipole dipole resistivity method.

堆積層內의 地下水가 透水性이 높은 砂岩層등이 層序的인 帶水層의 역할을 하는데 반해 結晶質岩에서는 破碎帶가 중요한 帶水層의 역할을 하며, 이는 比抵抗의 分布상태를 결정하는 構造線상에 발달될 確率이 높기 때문이다. 雙極子 探査結果에 의해 試錐가 수행되어 지하 약 500m 부근에서 상당한 地下水가 발견된 2號孔은 測線 L-7의 測點 185번 부근으로 低比抵抗帶와 中間比抵抗帶를 구분짓는 선상에, 5호공은 測線 L-3의 65번 부근의 中間比抵抗帶와 高比抵抗帶의 선상에 존재한다. 이러한 사실은 電氣比抵抗 構造線이 본地域의 結晶質岩內에서의 地下水의 유동경로로써 중요한 역할을 할 수 있을 가능이 높음을 시사하는 것으로 생각된다.

探査資料를 종합하여 地下 50,150,250m 지점의 眞比抵抗값 분포를 測線圖上에 圖示한 것이 Fig. 12이다. 深度의 증가에 따라 약간의 비저항분포가 차이가 있으나 전반적으로 連續性을 보여주고 있으며, 중앙의 測線 L-2의 39번부터 測線 L-12 357번을 연결하는 선을 경계로 左側의 低比抵抗帶와 右側의 高比抵抗帶로 구분되며, 특히 右側의 高比抵抗帶內에 南北方向의 低

比抵抗帶가 帶狀으로 분포하는 것이 특징적이다. 이들 高比抵抗帶와 低比抵抗帶 境界部는 전술한 電氣比抵抗 構造線으로 판단되며 Fig. 13에 도시하였다. 중앙의 低比抵抗帶와 高比抵抗帶의 境界部인 L-2 의 39번, L-4의 90번, L-6의 157 번, L-8의 225번을 연결하는 선은 試錐位置로 추천되었다. 우측의 高比抵抗帶와 高比抵抗帶內에 발달하고 있는 低比抵抗帶와의 境界部인 L-4 의 99번, L-6의 166번과 L-12 의 364번을 연결하는 선과 L-4의 102번, L-6의 171번과 L-12의 366번을 연결하는 비저항값이 약 500 ohm-m인 電氣比抵抗 構造線도 地下水 유동통로일 가능성이 높은것으로 생각된다. 또한 이들 帶狀으로 分布하는 低比抵抗帶는 深部로 갈수록 幅이 增加하며, 저비저항값도 더욱 낮아져 100 ohm-m 이하의 低比抵抗값을 갖는다. 이는 深部까지 연결된 大規模 地質構造線의 영향으로 판단된다. 따라서 중간부근의 자료는 불확실하나 L-6의 170번과 L-12의 365번을 連結하는 構造線 부근 지역에 深部 地下水가 존재할 가능성이 높은 것으로 생각된다.

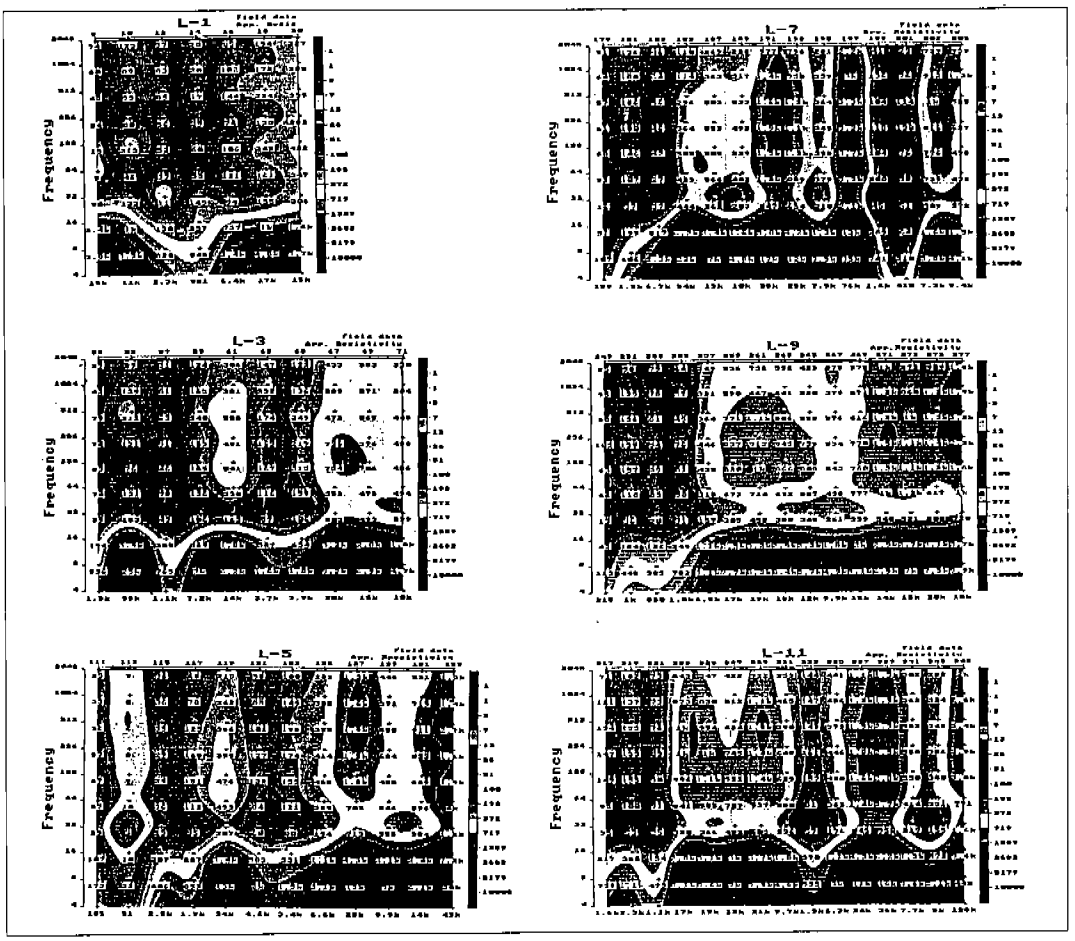


Fig. 14 CSAMT apparent resistivity pseudo section.

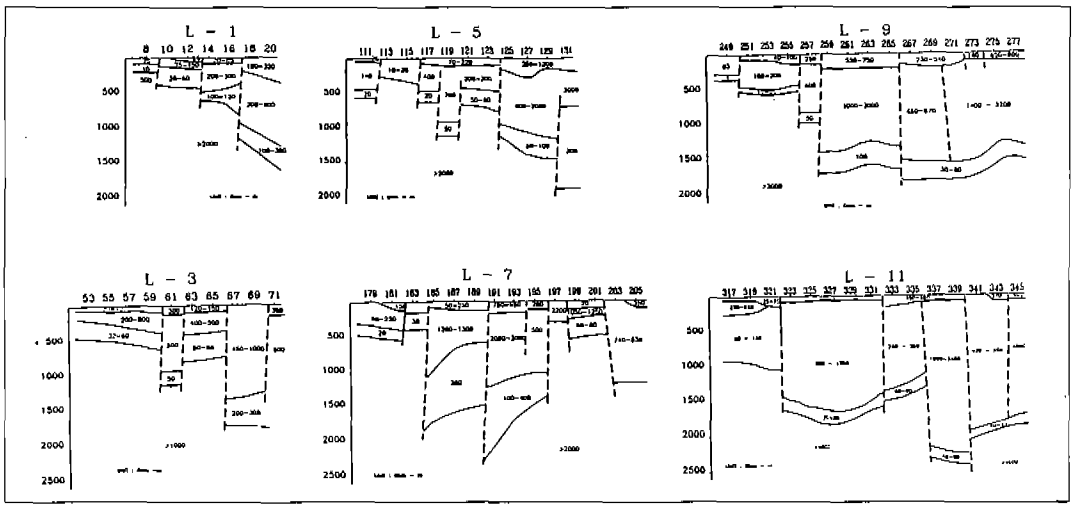


Fig. 15 4-layer resistivity model interpreted by CSAMT method.

CSAMT 探査

CSAMT 探査는 測線圖인 Fig. 5의 L-1, L-3, L-5, L-7, L-9, L-11의 6개 測線, 總 延長 약 5.5km에 걸쳐 測點間隔 100m로 수행되었다. 사용된 周波數는 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 Hz의 10개의 周波數이다. 電場測定을 위한 電位電極 間隔은 50m이며 送信源의 位置는 Fig. 4와 같고 送受信 間隔은 약 9km이다.

假斷面圖 Fig. 14를 살펴보면 西側部의 比抵抗이 대단히 낮은 부분, 조사지역 중앙을 기준으로 서측의 中間 정도의 比抵抗, 중앙부의 高比抵抗帶로 삼분되어 나타나며 동측에서는 고비저항대에 저비저항대가 협재되어 나타나고 있다. 조사지역 중앙을 기준으로 서측에서 나타나는 저, 중, 고 비저항대로 삼분되는 경향은 測線 L-1와 L-9, L-11에서는 그다지 뚜렷하지 않은바, L-1에서는 西側部의 低比抵抗帶와 東側部의 中間比抵抗帶로 2분되는 것처럼 나타난다. 이는 測線 L-1 자체의 연장이 짧아서 高比抵抗帶까지 충분히 연장되지 아니한 때문으로 사료된다. 또한 測線 L-9 및 L-11은 比抵抗 探査에서 나타난 바와 같이 남쪽으로 갈수록, 즉 測線 번호가 증가할수록 中間 比抵抗帶가 줄어들어 수렴되는 현상에 의한 것으로 생각된다. 이와 같이 假斷面圖상에서 比抵抗帶를 구분짓는 測點을 들면 中間 比抵抗帶와 低比抵抗帶를 구분짓는 지점은 L-1에서 測點 12과 14 사이, L-3에서 測點 59와 61 사이, L-5에서 測點 115와 117 사이, L-7에서 183과 185 사이, L-9에서 255와 257, L-11에서 321과 323 사이로 돌 수 있을 것이다. 한편 中間 比抵抗帶와 高比抵抗帶를 구분짓는 지점은 測線 L-3에서 測點 65, L-5에서 123와 125 사이, L-7에서 189, L-9 에서 258, L-11에서 322번으로 들 수 있을 것이다. 중요한 사실은 비록 겉보기 比抵抗 假斷面圖에 의한 추론이긴 하지만 比抵抗帶를 구분짓는 각 지점이 선으로 연결될 수 있다는 사실이다. 흥미로운 점은 中間 比抵抗帶와 高比抵抗帶를 구분하는 測點 65, 125, 189의 比抵抗이 주위에 비해 국부적으로 낮다는 사실이며 이는 이들 경계면상에 상당한 破碎帶가 존재함을 암시한다고 생각된다. 한편 조사지역의 동측부에서는 서측에서처럼 명확하게 구조선이 나타나지는 않지만 고비저항대 사이에 저비항대가 협재되어 나타나고 있다. 이

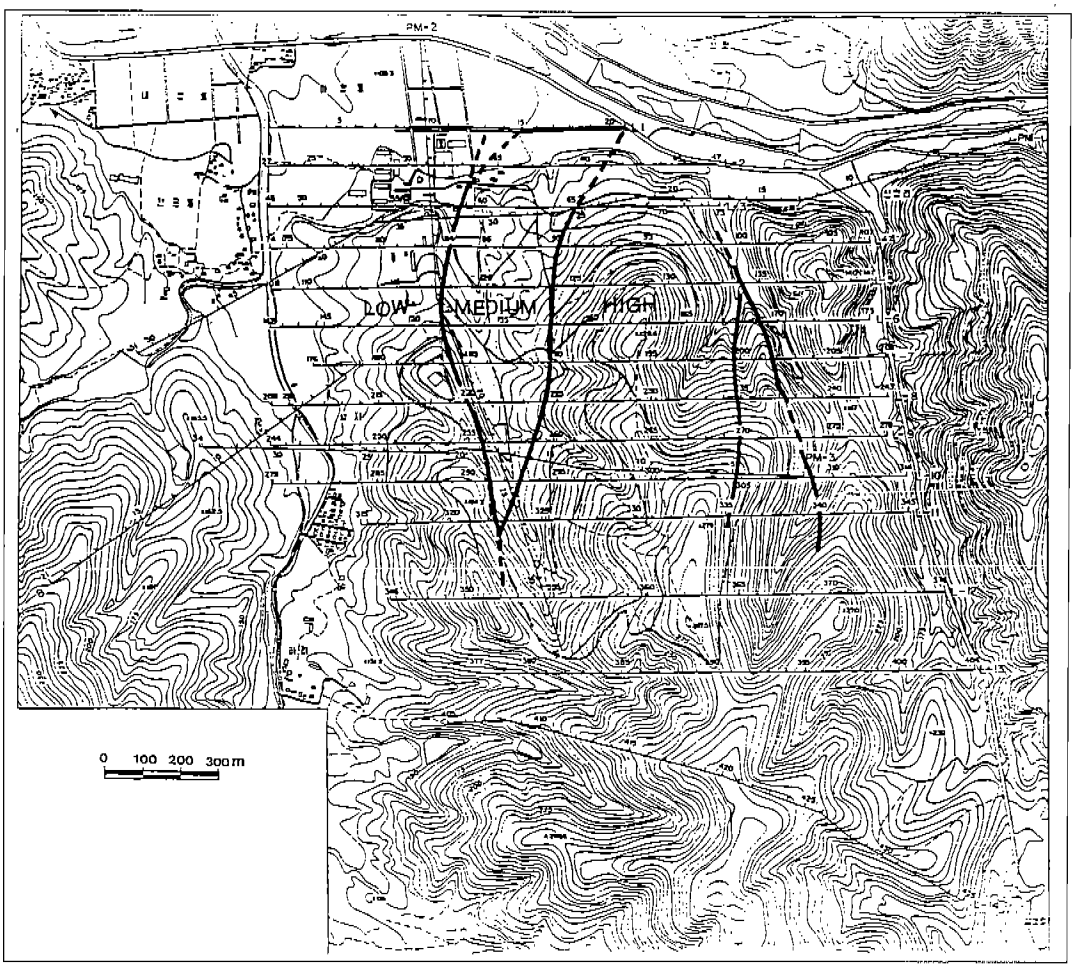


Fig. 16 CSAMT resistivity distribution and electrical resistivity lineament.

러한 저비항대와 고비저항대가 이루는 경계는 L-7의 202번, L-9의 273번, L-11의 340번으로 연결되는 구조선과, L-7의 199번, L-9의 270번, L-11의 335번으로 연결되는 구조선을 이루고 있음을 알수 있다.

層序 모델링 및 역산시에 사용된 層序의 수는 4層 構造이다. 比抵抗의 高低 및 層序別 深度를 고찰하여 Fig.15와 같이 CSAMT 電氣比抵抗 層序圖를 작성하였다. CSAMT의 可探深度가 1 km 정도라는 측면에서 볼 때에 本層序圖에서 1 km 하부의 層序에 대한 解析 結果는 어느 정도 信賴度가 떨어짐을 지적한다.

각 層序에서 東쪽으로 갈수록 그리고 南쪽으로 갈수록 比抵抗이 증가하는 경향을 나타냄은 겉보기 比抵抗 假斷面圖의 논의에서 지적한 바와 같다. 그리고 假斷面圖에서 논의한 比抵抗帶의 구분의 기준이 Fig.15의 각 測線에서 解析된 斷層이 됨은 대단히 흥미로운 사실이다. 比抵抗의 변화와 각 層序의 深度의 고찰로써 유추된 구조선들을 기준으로 CSAMT 比抵抗의 구조선도를 작성하여 Fig.16에 도시한다.

電氣比抵抗 層序圖 Fig. 15에서 西側의 低比抵抗帶에서 第 1層의 比抵抗은 北쪽으로 갈수록 높아지는 일반적인 경향을 갖기는 하나 대개

100 ohm-m 이하의 값을 나타낸다. 이는 아마도 粘土質이 많이 含有된 砂岩層일 것으로 解析된다. 조사지역 중앙부 및 동측의 高比抵抗帶에서도 일부 地域을 제외하고는 모두 100 ohm-m에서 1,000 ohm-m 정도의 값을 보여준다. 이 역시 低比抵抗帶와 마찬가지로 砂岩層으로 解析되어지나 低比抵抗帶에 비하여 比抵抗이 높은 것은 상대적으로 높은 固結度 및 粘土質의 含量의 차이에 의한 것으로 解析된다. 뿐만 아니라 같은 中間比抵抗 地域에서도 測線 L-1의 14번과 18번 사이, 測線 L-3의 63번과 65번 사이, 測線 L-5의 121번과 123번 사이 등의 구간에서 100 ohm-m 내외의 1 層의 낮은 比抵抗은 상대적으로 심한 風化와 이로 인한 높은 粘土成分 함량 때문으로 생각된다.

第 2層의 경우 低比抵抗 및 中間比抵抗帶에서 測線 L-5까지는 모두 200 ohm-m에서 700 ohm-m 내외의 값을 나타내며 高比抵抗帶에서는 測點 71, 125, 129, 199-205, 195, 341, 343번의 하부를 제외하고는 1,000 ohm-m 이상의 높은 값을 나타낸다. 低比抵抗帶에서의 2層은 모두 어느 정도 破碎 또는 風化가 진행된 砂岩 또는 세일層 내지는 그의 互層群으로 생각된다. 高比抵抗帶에서 1,000 ohm-m 이상의 높은 比抵抗을 나타내는 2層은 花崗岩으로, 그리고 수백 ohm-m 정도의 比抵抗을 나타내는 2層은 砂岩層으로 解析되어질 수 있다. 한편 磁力値 分布圖 Fig. 6에 의하면 測線 L-5 부터는 中間 내지는 高磁力帶에 속한다. 이와 같은 사실은 第 2層의 比抵抗이 남동쪽으로 갈수록 比抵抗이 높아진다는 사실과 잘 부합된다. 그러나 低磁力 地域에 속하는 測線 L-3의 測點 67, 69 하부의 1,000 ohm-m의 高比抵抗을 갖는 2層은 花崗岩보다는 透水性이 낮은 砂岩層으로 解析된다. 磁力分布로 보아 測線 L-5, L-7, L-9, L-11의 高比抵抗帶의 第 2層은 모두 花崗岩으로 구성된다고 解析된다. 그런데 測線 L-5의 測點 119, 121, 123 하부 2層의 比抵抗이 수백 ohm-m임은 花崗岩으로써는 상당히 낮은 값이다. 이러한 낮은 比抵抗 값과 높은 磁力値로 생각하면 이 地域은 상당히 破碎가 진행되어 透水性이 높은 花崗岩이거나 혹은 火成起源의 岩脈이 다수 貫入된 砂岩層으로 解析되어진다. 本 CSAMT의 電氣比抵抗 層序의 기반은 그 높은 比抵抗으로 보아 花崗岩으로 解析하였다.

結　言

VLF 探査結果 地表淺部에 많은 破碎帶가 존재할 수 있음을 확인하였다. 이들의 主 方向은 本 調査地域의 西쪽은 北北西-南南東, 중앙부는 北北東-南南西 방향이 탁월하며, 동쪽에서는 골짜기를 따라서 方向性을 나타내고 있다. 이 方向性은 磁力探査, 電氣比抵抗 探査, CSAMT 探査에서도 동일하게 나타난다.

이러한 VLF 探査의 結果와 함께 本 地域의 探査에 있어서 중요한 位置를 차지하고 있는 것은 磁力探査 結果 도출된 磁力値 分布의 傾向이다. 本 地域 探査의 목적이 微溫性 溫泉의 探査에 있으며 微溫性 溫泉의 主熱源은 地溫增加率에 있음은 주지의 사실이다. 따라서 地溫增加率이 堆積岩에 비해 상대적으로 높은 花崗岩 分布의 把握이 중요하다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 地下水의 존재이며 結晶質岩內에서 帶水層으로 중요한 位置를 차지하고 있는 斷層 내지는 破碎帶의 把握이다. 그러므로 花崗岩의 分布를 把握할 수 있는 磁力探査의 解析 結果와 深部 破碎帶의 位置를 도출할 수 있는 電氣 比抵抗探査 및 CSAMT 探査 解析結果를 綜合 유기적으로 解析하여야 할 것이다.

參考文獻

김정호, 정승환, 1988, 쌍극자 배열 탐사자료의 2차원 역산, 탐사기술개발연구, KR-87-11, 한국동력자원연구소.

김정호, 정승환, 조인기, 전정수, 이소훈, 1990, 전기 비저항 탐사자료의 평활화 제한을 가한 2차원 자동역산, 탐사기술개발연구, KR-89-2D-2, 한국동력자원연구소.

정승환, 김정호, 1988, 수평다층구조에 대한 CSAMT 탐사의 수치모델링에 관한 연구, 탐사기술개발연구, KR-88-2D-2, 한국동력자원연구소.

정승환, 이소훈, 김정호, 조인기, 전정수, 1990, 필터링 기법을 이용한 VLF 전자탐사 자료의 심도변환, 탐사기술개발연구, KR-89-2D-2

Goldstein, M.A. and Strangway, D.W., 1975, Audio frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source, Geophysics, Vol.40, pp.669-683.

Sandberg, S.K. and Hohmann, G.W., 1982, Controlled-source audio-frequency magnetotellurics in geothermal exploration, Geophysics, Vol.47, pp.100-116.