

## 인도네시아 중부 칼리만탄 타란지역에서의 물리탐사

조진동\* · 김인준 · 박인화

한국지질자원연구원

### Geophysical Survey in the Taran Area on the Central Kalimantan, Indonesia

Jin Dong Cho\*, In Joon Kim and In Hwa Park

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM)

There are many typical epithermal deposits scattering in the Taran of central Kalimantan, Indonesia. To get the shallow geological information, we carried out the geophysical exploration: spontaneous potential survey, in-suite magnetic susceptibility measurement and resistivity survey method in this area for a few weeks from September 30th to October 27th in 1999. SP survey (Fluke 27 multimeter)/magnetic susceptibility (EK-7 meter) measurement was carried out with a 250 m × 10 m lattice net in N45°W direction. The dipole-dipole array resistivity survey was conducted with an electrode spacing of  $\alpha=30$  m and electrode separation index  $n=7$  at the line 5. The result shows that the gold bearing quartz vein area can be divided into two type zone: low sulfidation type and high sulfidation type zone. The low resistivity value in the survey line 5 indicated a fracture zone associated with the high sulfidation zone.

**Key words**: spontaneous potential anomaly, electrical resistivity, magnetic susceptibility, sulfidation type, hydrothermal solution

천열수 광상 합금석영맥이 도처에 발달하고 있는 인도네시아 중부 칼리만탄 타란 지역에서 천부 지질정보 획득(지질구조 및 광상분포 확인)을 목적으로 1999년 9월30일부터 10월27일 까지 28일간의 일정으로 자연전위탐사, In-suite 대자율 측정 및 전기 비저항 탐사법을 수행하였다. 자연전위탐사/in-suite 대자율 측정은 10 m×250 m 간격으로 5개 축선에서, 쌍극자 탐사는 전극간격  $\alpha=30$  m, 전극배열  $n=7$ 으로 1개 축선에서 행하였다. 탐사결과, 합금 석영맥의 분포지역은 유화광물을 많이 포함하는(은, 아연 및 연의 광화작용)형태, 유화광물을 적게 포함하는(금 광화작용)형태 지역으로 분리 할 수 있다. 축선5에서 낮은 비저항값을 보여주는 구간은 파쇄대, 유화광물을 많이 포함하고 있는 구간을 의미한다.

**주요어** : 자연전위이상, 전기비저항, 대자율, 유화물형태, 열수용액

### 1. 서 론

인도네시아의 칼리만탄 지역은 1880년대에 처음으로 네덜란드 지질학자들이 석탄자원탐사를 목적으로 개략적인 조사가 시작된 이래, 1900년대에 들어서면서부터 석유를 찾기 위한 지질조사가 여러 석유회사들에 의해서 수행되었다. 그후 인도네시아 및 외국회사들에 의해서 자원탐사가 수행되었다. 특히 인도네시아 지질조

사소(GSI)와 JICA(Japan International Cooperation Agency)/MMAJ(Metal Mining Agency of Japan)와의 협력으로 1975-1978년에 걸쳐 총 36,300 km<sup>2</sup>의 면적에 대해 인공위성 및 항공사진 관독, 항공자력탐사, 지표조사, 지화학 및 방사능탐사를 수행하였다(MMI, 1997, 1998). 인도네시아 칼리만탄 타란지역에서의 물리탐사 수행은 국제협력단(KOICA)의 개발조사사업의 일환으로, 1차광상인 천열수 광맥계인 합금석영맥이 도처에 발달하고 있는 인도네시아 중부 칼리만탄 타란 지역(Fig. 1)에서 천부 지질정보 획득(지질구조 및 광

\*Corresponding author: jdc@kigam.re.kr

상분포 확인)을 목적으로 1999년 9월30일부터 10월27일 까지 28일간의 일정으로 물리탐사를 수행하였다. 수행된 물리탐사법은 자연전위탐사, in-suite 대지율 측정 및 수직-수평정보를 획득 할 수 있는 쌍극자 배열법의 2차원적 전기비저항 탐사법이다.

2. 지질 및 광상

2.1. 지 질

Fig. 1의 지질도에서 보여주고 있듯이, 화산암이 타란지역에서는 퇴적암에 둘러 쌓여 나타나 있다. 제3기 퇴적암류 사이에 노출되어 있는 화산암은 관입 상의 반상 안산암과 분출상의 현무암질 안산암, 라피리용회암등의 화산 쇄설암이 혼재되어 있으며, 이 지역은 풍

화가 매우 심해 이들의 경계를 정확하게 구획하기가 매우 어렵다. 또한 화산암류 분포지에는 많은 지역에서 광화대가 형성되어 있으며, 특히 타란지역에서는 금을 함유한 석영맥의 모임을 이루고 있다. 화산암류를 관입한 대부분의 관입암류는 플러그나 맥암 형태로 나타나며, 이들은 대부분 안산암내지 세립질의 섬록암이며, 곳에 따라 주상절리가 발달하여 지형적으로 사면이 급한 원추(cone) 형태를 보이며 곳에 따라 풍화작용에 의해 강한 녹염석화 및 녹니석화 작용을 받았다. 조사지역의 구조를 보면 먼저 소규모의 NE 방향의 단층이 있었고 이후 NW방향의 단층이 2개조 지나가며 최후에 비교적 큰 NE방향의 단층이 있었다. 이들은 거의 주향이동 단층이며 이들은 석영맥과도 잘 일치하고 있다(전희영 등, 2001).

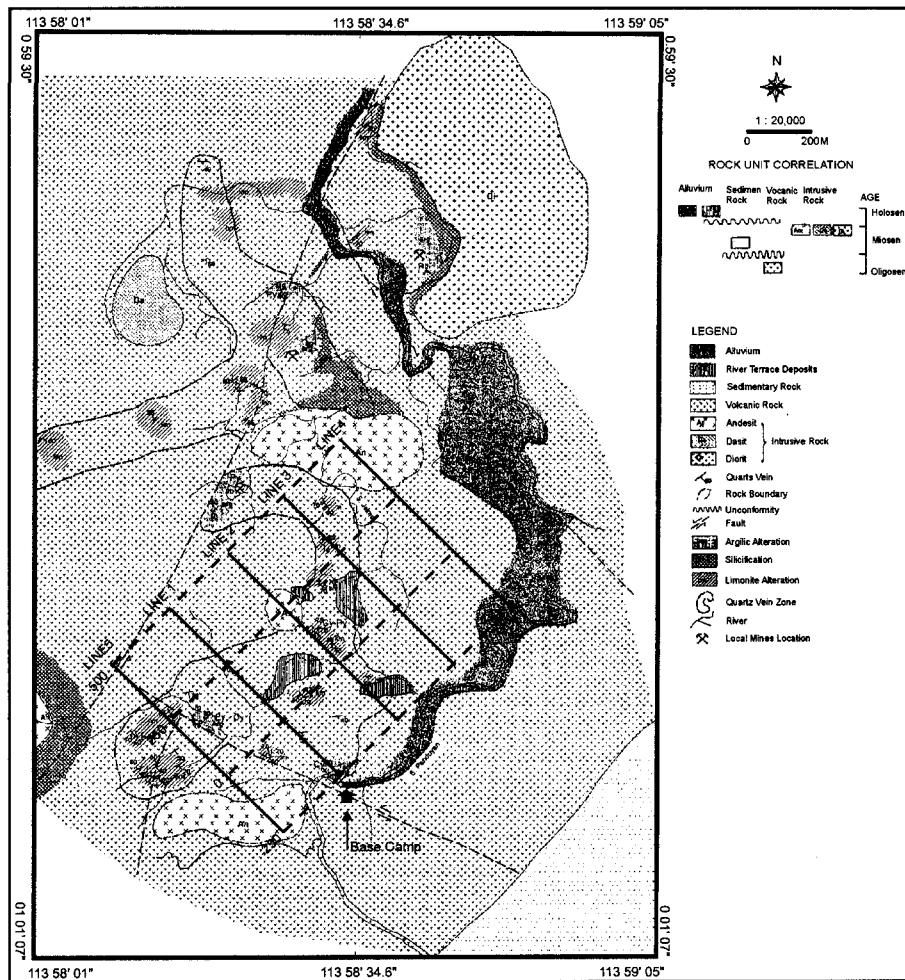


Fig. 1. Generalized geological and geophysical survey location map in the Taran area on the central Kalimantan, Indonesia.

2.2. 광 상

칼리만탄 섬은 고생대의 변성암류와 백악기의 심성 활동 및 제3기 화산활동에 의한 금, 은, 연, 아연 등의 금속광상은 섬의 중부를 동서로 가로질러 분포한다. 화산활동 후기에 잔류 마그마가 올라오면서 석영맥을 형성시켰으며, 광상타입은 관입상의 반상안산암내에 열수 용액내에 농집된 금이 석영맥과 함께 올라와 관입하면서 변질작용 및 광화작용을 일으켜 천연수 광상을 형성하고 있다. 이는 주 석영 맥상에 황철석, 황동석, 유비철석등 다수의 유화물들을 포함하고 있다. 지표 석영 맥으로부터 이어진 구조선은 격자 상으로 발달하고 있으며, 하나의 석영맥이 아니라 석영맥이 여러 번 겹쳐서 형성된 것으로 생각된다. 석영 맥 대부분은 유화물을 거의 갖지 않는 형태이나 주 석영맥은 유화물을 많이 포함하고 있는 형태로서, 전체적으로 두 타입이 공존한다. 그러나 금은 주로 유화광물을 많이 포함하고 있는 형태의 석영맥에서 함량이 높은 것으로 나타

났다. 석영맥의 폭은 1 cm에서 수십cm, 연장은 1 m에서 수십m로 확인된다. 또한 사금의 원천이 되는 석영맥은 화산암내에 무수히 발달하고 있으며, 이들 석영맥은 주로 NE 방향성을 갖고 있다(전희영 등, 2001).

3. 자료 획득 및 고찰

물리탐사는 인도네시아 중부 칼리만탄의 타란(Taran) 지역의 천부 지질정보 획득(지질구조 및 광상분포 확인)을 목적으로 1999년 9월30일부터 10월 27일까지 28일간의 일정으로 수행하였다. 수행된 물리탐사방법은 자연전위탐사법, 쌍극자 전기비저항탐사법 및 in-suite 대자율측정 등이다.

3.1. 자연 전위(SP)탐사

본 탐사는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 타란지역에서 측선을 N45°W방향으로 5 개 측선을 설정하였으며

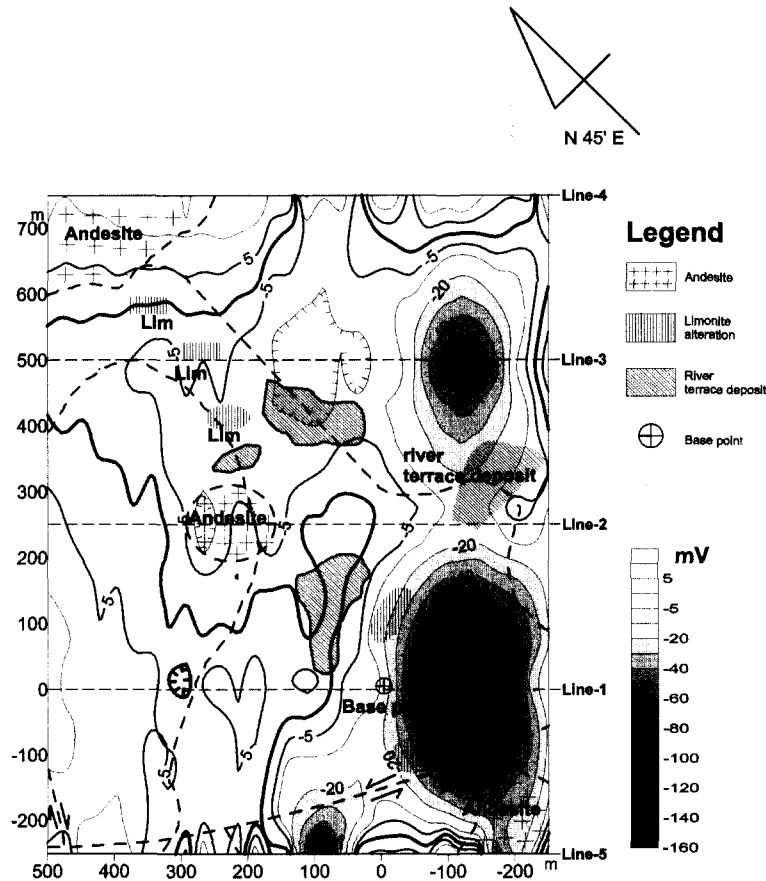


Fig. 2. SP anomaly and geological map in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia.

250 m×10 m의 격자망을 구성하여, 고감도의 직류전위차계(Fluke27 multimeter; 입력저항 20,000~50,000 Ω)에 도선을 연결하여 전극분극현상을 일으키지 않는 비 분극전극(non-polarizable electrode)을 사용하여 수행하였다. 하나의 전극을 조사지역에서 멀리 떨어진 곳에 설치하고 다른 전극을 격자 점(측정점)으로 이동시키면서 기점(측선 1의 0)에 대한 각 측정점의 상대적인 전위 차를 측정하였다. 측정된 자연전위의 변화량 보정은 기점에 대한 반복측정을 수행하여 Δt에 대한 SP 변화량을 산출하여 선형 보정을 수행하였다.

본 조사지역은 북동-남서 방향을 가지는 2 개의 부(-) SP 이상대를 확인 할 수 있다(Fig. 2, 3). 기선을 중심으로 하여 왼쪽에서 보여 주는 SP 이상대는 전측선을 통하여 뚜렷한 연속성을 가지고 발달되어 있으나 측선 2와 4에서는 SP값이 낮은 부(-) 이상을 보여 준다(Fig. 3). 한편 기선 오른쪽에서 보여주는 부(-) SP 이상은 측선1에서는 발견될 수 없으며 SP-1 이상대 값은 제 SP-2 이상대 보다 낮은 SP값을 보여주고 있다. 각 측선 별로 자연전위(SP) 분포상태를 검토하여 보면 다음과 같다.

① 측선 1에서는 측정점 -130(E)에서 -162.8 mv, 측

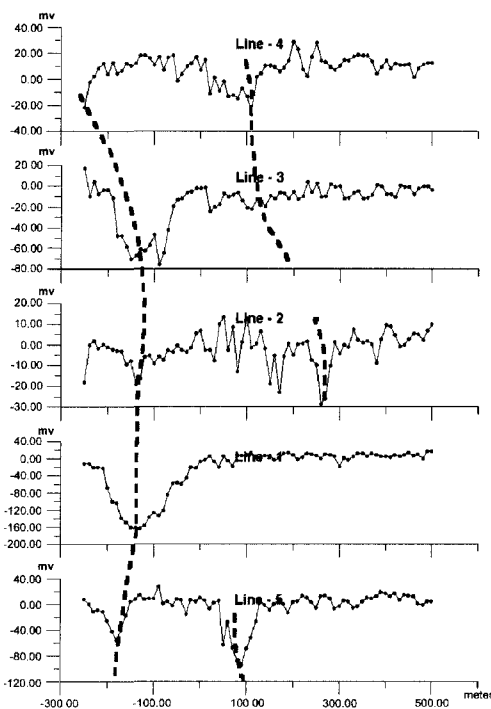


Fig. 3. SP survey profile map in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia.

점 300(W)에서 -18.9 mv를, ② 측선 2에서는 측정점 -250(E)에서 -18.1 mv, 측정점 -140(W)에서 -19.2 mv, 측정점 260(W)에서 -28.7 mv를 ③ 측선 3에서는 측정점 -90(E)에서 -76.0 mv, 측정점 110(W)에서 -22.4 mv, 측정점 20(W)에서 -24.2 mv를 ④ 측선 4에서는 측정점 -250(E)에서 21.6 mv, 측정점 110(W)에서 -27.0 mv를 ⑤ 측선 5에서는 측정점 -180(E)에서 -56 mv, 측정점 90(W)에서 -95 mv를 보여주고 있다. 낮은 자연전위 이상대를 보여주는 지역은 비교적 많은 량의 유화물을 포함하고 있는 곳으로 추정된다.

### 3.2. In-situ 대자율 측정

자력탐사에 있어서 암석광물의 대자율 특성은 중력탐사에서 암석밀도와 같이 중요한 역할을 하고 있다. 따라서 지질조사에 있어서 암석광물의 대자율을 야외에서 직접 측정하는 것은 암석분리 및 광상을 규명하는 데 좋은 열쇠가 된다. 1 차적으로 형성된 안산암류(andesitic pyroclastics)와 2 차적으로 금을 배태하고 있는 열수용액(hydrothermal solution) 관입에 의해 형성된 석영 맥들의 분포 확인을 목적으로, 제 3기 화산암류가 넓게 분포하고 있는 본 조사지역에서 대자율 측정기(Scintrex Co., Type EK-7)을 가지고 직접 대자율을 측정하였다. 측정은 조사 지역 내에서 수행된 SP탐사와 같이 10 m×250 m의 격자망을 구성하여 수행하였다. 본 역에 분포하고 있는 암석들에 대한 대자율값은 ① 갈철석  $220 \times 10^6$  emu, ② 석영  $-1 \times 10^6$  emu 및 ③ 안산암  $13,500 \times 10^6$  emu 등이다(장광택등, 1980). Fig. 4에서 보는바와 같이 측선 1에서는 측정점 -180 m ~ -190 m, 측정점 -120 m ~ -70 m, 측정점 -40 m, 측정점 10 m ~ 30 m에서, 측선 3에서는 측정점 -130에서, 측선 5에서는 측정점 -120 m, 측정점 70 m ~ 100 m에서의 대자율 값은  $0.1 \times 10^{-6}$  cgs 이상을 보여주고 있으며, 특히 측선 1의 측정점 -100 m에서는  $0.32 \times 10^{-3}$  cgs 값을 보여주고 있다. 이들은 화산암류가 분포하고 있는 조사 지역내에서 1 차적으로 관입하여 분포하고 있는 안산암류 및 갈철석 변질작용을 받은 것에 의한 것으로 생각된다.

### 3.3. 쌍극자(Dipole-Dipole)배열 비저항탐사

쌍극자 비저항 탐사는 SAS 300(ABEM Co.)비저항탐사를 가지고 타란지역 1개 측선에서 전극간격  $a=30$  m로 하여 전극전개계수  $n=7$ 까지 수행하였으며, 획득된 자료는 DIPRO(김정호, 1996)프로그램을 사용하여 해석하였다. 그 결과는 Fig. 5에서 보는바와 같으며,

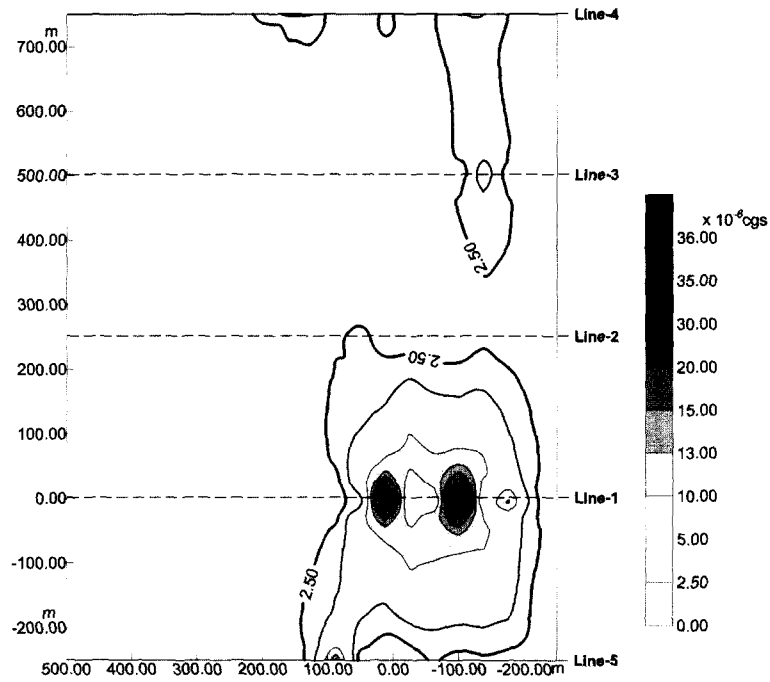


Fig. 4. In-suit magnetic susceptibility map in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia.

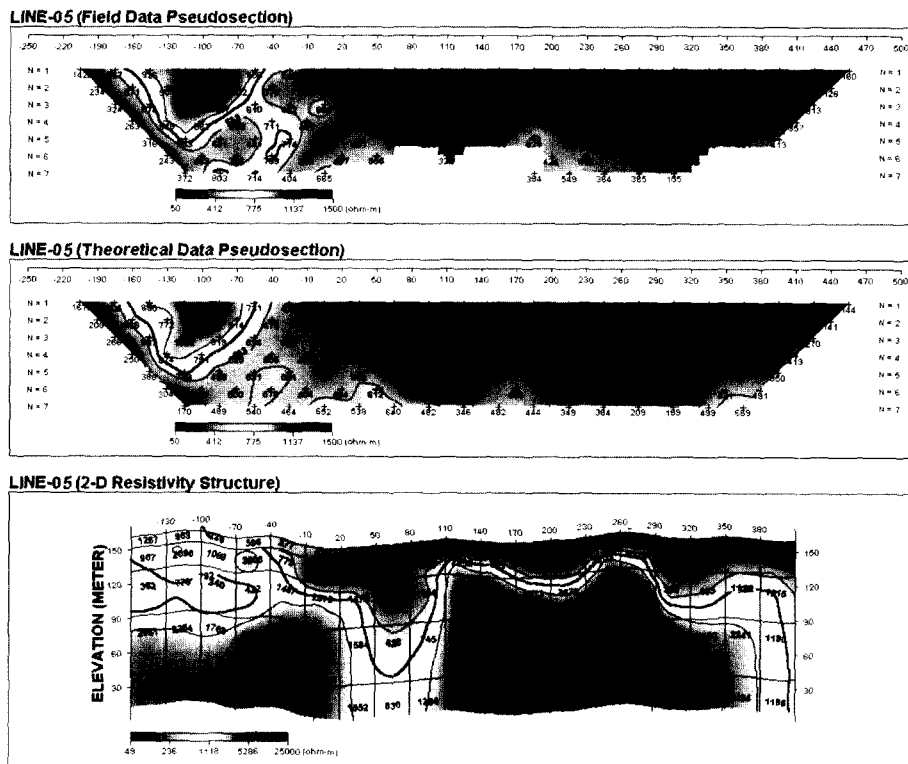


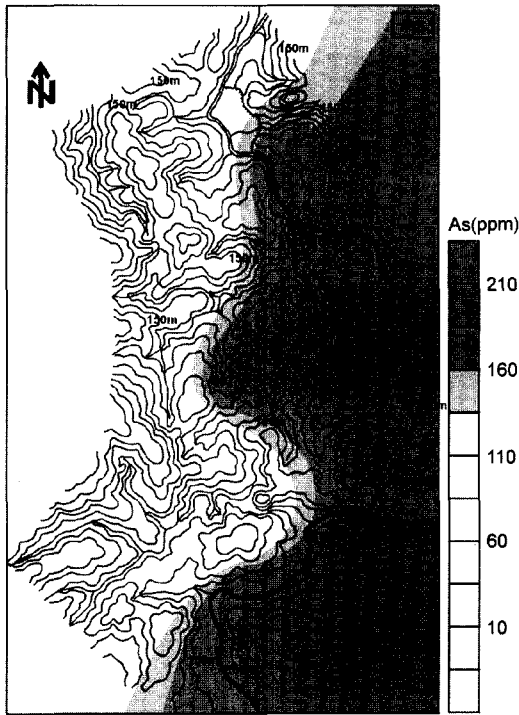
Fig. 5. The interpretation result of dipole-dipole array survey in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia.

측선 5의 비저항 분포를 보면 천부의 비저항 값의 분포는 기선의 기점을 중심으로 +방향으로 증가되는 곳에 낮은 비저항 값을 보여주고 있다. 지표 40 m 하부에서의 비저항 분포 상태는 +120 m~+360 m사이이고 비저항 값(3600 Ωm~22,000 Ωm)을, +50 m~+80 m사이에는 저 비저항 값(140 Ωm~830 Ωm)을, -20 m~-160 m사이에서는 2000 Ωm~5000 Ωm 정도의 비저항 값을 보여주고 있다. 지표면에서의 낮은 비저항 값은 화산암류들의 변질에 의한 응회암층에 의한 것으로 판단된다. 한편 천부에서 보여주는 낮은 비저항값은 파쇄대 및 유화물을 많이 포함하고 있는 석영맥에 의해서, 비저항 값이 높게 나타난 지역은 유화물 함량이 작은 석영맥에 의한 것으로 판단된다.

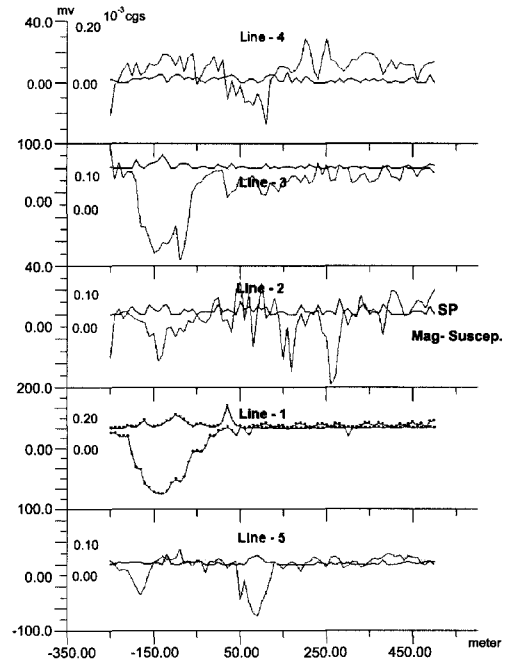
**3.4. 종합 결과**

석영 맥 대부분은 유화물을 갖지 않는 형태이나 주 석영맥은 유화물을 많이 포함하고 있는 형태로, 전체적으로 두 타입이 공존한다. 그러나 금은 주로 유화물이 많은 형태 석영맥에서 함량이 높은 것으로 나타났다(전희영 등, 2001). 화산암류내의 대부분 석영맥은

유화물을 갖지 않는 형태가 분포하고 있는 서부지역에서는 뚜렷한 자연전위 이상을 확인 할 수 없었다. 그러나 주 석영맥은 유화물을 많이 포함하고 있는 형태가 분포하고 있는 동부지역에서는 부(-)자연전위 이상을 보여주고 있다. 이들 부(-) 자연전위(SP)이상지역은 화산암류내에 층상광상, 갈철석변질작용(limonite alteration) 및 유비철석 분포지역등에서 낮은 값을 보여주고 있다. 석영맥 중에서 As의 양은 보통 1-50 ppm정도를 가지며, 또한 넓은 범위를 가지고 황화물과 공존한다. 본 역의 SP탐사 이상 지역에서는 비소가 평균 69 ppm 보다 높은 160 ppm이상 량을 보여주고 있다(Fig. 6). 비소(As)는 은(Ag)과 친화적인 관계를 보이므로 자연전위 이상지역은 은 광화작용의 가능성을 있음을 지시한다(전희영 등, 2001). 특히 SP-1 자연전위 이상은 갈철석 변질 작용 및 파쇄대 지역에서, SP-2자연전위 이상은 지화학탐사에 의한 화학분석에 의하면 200-300 ppm 량의 비소를 포함하고 있는 유비철석(arsenopyrite)의 분포지역, SP-3자연전위 이상은 인접지역에 분포하고 있는 층상광상 지역에서 보여주고 있다. 한편 SP-2와 SP-3와의 연장상태, SP-1과 SP-2의 분포상태로 보아 이들 사이에 구조선이 지나가는 것을 판단된다. 측선 5에서 보여주는 SP-1이상과



**Fig. 6.** Arsenic distribution map of quartz vein samples in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia (Chon et al., 2001).



**Fig. 7.** SP and magnetic susceptibility profiles in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia.

측선 1에서 보여주는 SP-2이상치가 나란하지 않고 약간 떨어진 상태를 보여주는 것은 외부의 영향에 의해서 지질구조가 변형된 것을 의미한다. 이는 광역적인 항공자력탐사(JICA, 1979)에 의해서 확인된 주향이동단층과 일치하고 있다. 또한 두 개 측선 사이에서 N115°E방향을 가지고 발달된 정단층의 영향을 확인할 수 없었다. 한편 본 역의 토양/암석 매질의 자기적 특성 파악을 목적으로 현장에서 직접 측정된 대자율 값(Fig. 4)을 검토하여 보면 측선 1에서는 측정 -180 m에서 측정 30 m 사이, 측선 3에서는 측정 -200 m에서 측정 150 m 사이와 측선 5는 측정 -120 m, 측정 80 m에서 측정 110 m에서 비교적 높은 대자율

값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이들은 주로 유화물을 많이 포함하고 있는 형태의 석영맥의 분포 지역으로서, 안산암류 분포지역과 거의 일치하고 있다. 또한 측선 5와 측선 1에서 보여주는 자력 이상대가 연속성을 보여주지 못하고 약간 떨어져 이상대를 보여주고 있음은 이들 측선 사이에 있음을 의미하는 것으로 생각된다. Fig. 7에서 SP값은 현지에서 직접한 대자율 값과 같은 구역에서 부(-)을 보여주고 있다. 특이한 점은 높은 대자율 값을 보여주는 측정 10 m에서 측정 30 m 지점에서는 SP값이 다른 측정점의 SP값보다 높은 값을 보여주고 있다는 점이다. 이들 대부분은 본 역에 1 차적으로 분출된 화산암류에 의한 것으로 생각된다.

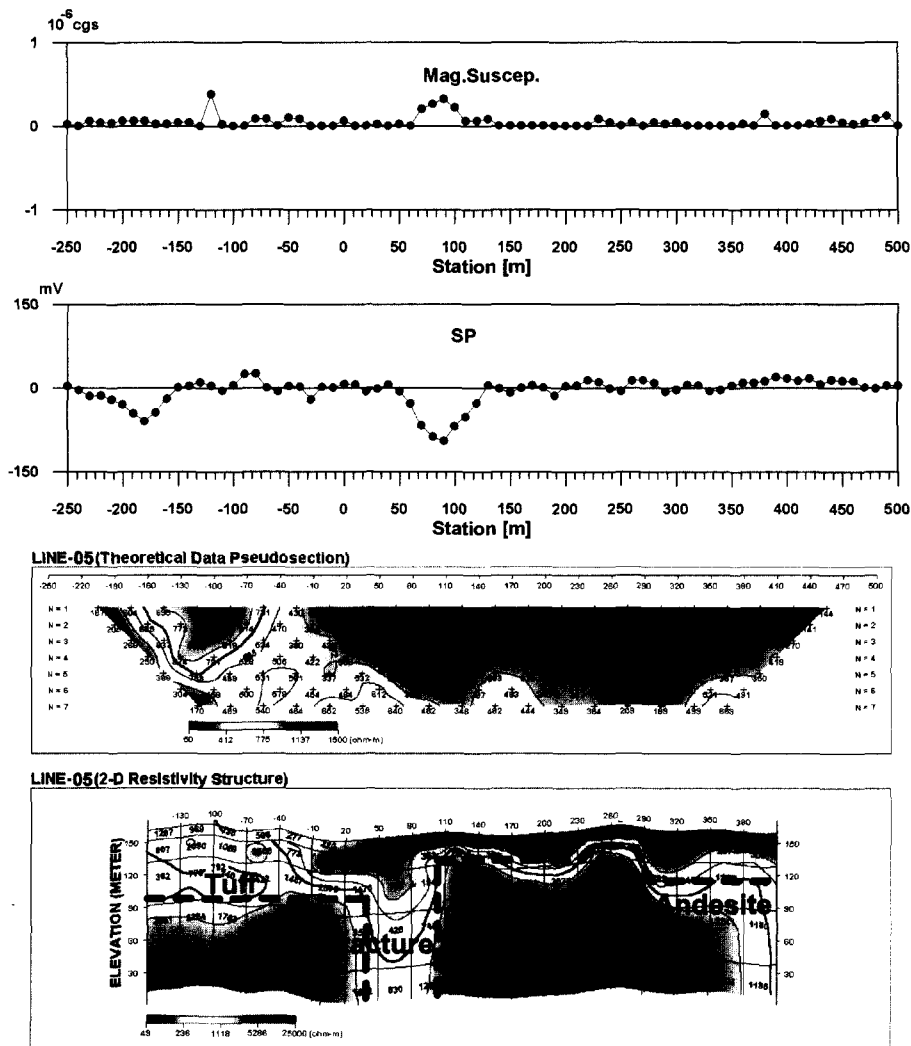


Fig. 8. Combined geophysical map at the survey line 5 in the Taran area on central Kalimantan, Indonesia.

한편 유화물이 적은 형태의 석영맥이 분포하고 있는 서부 지역에서 뚜렷한 부(-) SP이상을 발견 할 수 없는 것과 같이 높은 대자율 값을 보여주지 못하고 있다.

측선5에서의 비저항 분포(Fig. 5)는 대체적으로 지표면에서 낮은 비저항 값을 보여주고 있는데, 이는 이 지역이 풍화가 매우 심하여 화산암류들의 변질에 의한 응회암층에 의한 것으로 생각된다. 한편 기선의 기점을 중심으로 +방향으로 증가되는 곳에서 천부에 낮은 비저항값을, 그 하부에 고 비저항 값을 나타내고 있다. 반대로 -방향에서는 저, 고, 저비저항값을 보이다가 심도 60 m 하부에서 고 비저항값을 보이고 있다. 대체로 +방향에서의 하부에 고 비저항값을 보이는 것은 유화물이 적은 석영맥 분포구간을 의미하고, -방향에서의 비저항값 의미는 관입암류인 화산암류의 안산암에 의한 것으로 판단된다. 또한 자연전위이상 지역과 일치되는 낮은 비저항대를 보여주는 구간은 파쇄대가 존재하고 있음을 의미한다. 물리적 특성을 고려 할 때 Fig. 8에서 보는 바와 같이 직접 조사지역에서 측정된 암석 대자율 값이 높고 SP값이 낮은 부(-)이상을 보여 주고 있는 것은 화산암내에 유화물이 많고/자성의 성질이 큰 광물들이 포함된 암석류에 의한 것으로 사료되며, 낮은 비저항 값을 보여주고 있는 구간은 파쇄대, 화산암내에 유화물이 많은 암석 및 인접 측선 상에 노출되어 있는 안산암질과 같은 것으로 생각된다.

물리탐사 결과를 종합하여 볼 때 높은 대자율, 낮은 (-) 자연전위 이상 그리고 낮은 비저항값을 보여주는 구간은 은, 아연 및 연의 광화작용을 받은 구간이며, 한편 낮은 대자율, 정(+) 자연전위이상을 보여 주는 구간은 금 광화작용을 받은 지역이라고 사료된다.

#### 4. 결 론

인도네시아 중부 칼리만탄 타란지역에서 수행된 물리탐사 탐사결과들을 종합하여 요약하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. SP탐사/In-suite 대자율 측정에 의하면, 유화물이 많은(은, 아연 및 연의 광화작용) 형태의 석영 맥과 유화물이 적은(금 광화작용)형태의 석영 맥 분포지역으로 분리 할 수 있다. 측선 1과 5 사이에 단층 구조선을

확인 할 수 있다.

2. 측선5에서 낮은 비저항대는 파쇄대, 유화물이 많은(은, 아연 및 연의 광화작용)형태가 분포하고 있는 구간을 의미한다.

3. 높은 대자율, 낮은 (-) 자연전위 이상 그리고 낮은 비저항값을 보여주는 구간은 은, 아연 및 연의 광화작용을 받은 구간이며; 낮은 대자율, 정(+) 자연전위 이상을 보여 주는 구간은 금광화작용을 받은 지역이다.

4. 본 역에서 심부 구조 및 광상 분포확인을 위해서는 전기 비저항 탐사, 유도분극탐사 및 자력탐사가 효율적인 것으로 판단된다.

#### 사 사

이 연구는 KOICA사업 “인도네시아 중부 칼리만탄 지역의 지질매핑 연구과제”의 일환으로 수행되었으며, 심사과정에서 많은 조언을 하여주신 강원대학교 김영화 교수님과 인천교육대학교 이희순 교수님에게 감사 를 드립니다.

#### 참고문헌

- 김정호 (1996) DIPRO ver. 2.0 사용자 안내서. 희송지오택, 57p.
- 장광택, 조진동, 김영달 (1980) 산업응용물리탐사, 동명사, 257p.
- 전희영, 김인준, 송교영, 김복철, 김정찬, 조동률, 이승렬, 류충렬, 이병주, 이재호, 이한영, 이사로, 이진수, 조진동, 박인화, 문건주, Koswara Y., Bambang S., Sahat S., Eko P., Syahya S., Iwan N., Danny Z.H., Budhi P., Zulkifli B., Isnurozi M., Tuan K., Aris M., Yulian T., Rachmat E. and Chan H.(2001) 인도네시아 중부 칼리만탄 지질탐사 사업(최종년도 종합보고서), KOICA, 한국 지질자원연구원, 413p.
- JICA(1979) The report on geological survey of central Kalimantan.
- Ministry of Mines Indonesia, GSI, JICA-MMAJ (1977) Report on Geological Survey of Central Kalimantan, Phase I and II, Landsat-Data Analysis, Aerial Photograph and Airborne Magnetic Survey.
- Ministry of Mines Indonesia, GSI, JICA-MMAJ (1978) Report on Geological Survey of Central Kalimantan, PhaseII1-2 and Phase III 1-2, Aerial Photograph and Airborne Magnetic Survey.

2002년 3월 11일 원고접수, 2002년 4월 26일 게재승인.