

인도네시아 칼리만탄 타카오이(미고결 역질층)지역에서의 전기비저항 탐사

조진동¹⁾ · 박인화¹⁾

The Resistivity Survey of the Takaoi Area on Central Kalimantan, Indonesia

Jin-Dong Cho¹⁾ and In-Hwa Park¹⁾

요 약 : 2차 광상 성인에 의해서 형성된 미고결 역질층내에 배대되고 있는 금 광상이 분포하는 인도네시아 중부 칼리만탄의 타카오이 지역의 천부 지질정보 획득 및 탐사자료 특성 파악을 목적으로 물리탐사를 수행하였다. 사용된 물리 탐사법은 전기비저항탐사로서, 1999년 10월 15일부터 10월 27일 까지 수행하였다. 쌍극자 탐사는 전극간격 $a=3\text{ m}$, 5 m , 전극 전개수 $n=10$ 으로 5개 측선에 대하여, 수직탐사는 6개 지점에서 수행하였다. 취득된 자료들은 DIPRO와 SOUNDPRO 프로그램을 이용하여 처리·해석하였다. 자료해석 결과, 조사지역의 층서는 비교적 수평 층으로 분류할 수 있으며, 수직 비저항 탐사자료 형태는 중간지층의 비저항 값이 높은 KH형을 보여주고 있다.

Abstract : In order to obtain the geological information of the shallow subsurface and the characteristics of resistivity curves to the lateral extent of the gold bearing gravel layer underlaid by a thick layer, electrical resistivity surveys had been carried out in the northern area of Takaoi village, Kalimantan, Indonesia from September 30th to October 27th in 1999. The Dipole-Dipole (Dp-Dp) resistivity survey was carried out with a electrode spacing of $A=3\text{ m}$, 5 m and electrode separation index $n=10$, and the vertical electrical sounding (VES) of the Schlumberger type was performed at 6 sites. The interpretation of the Dp-Dp data and VES curves by computer modeling indicates 5 classified layers as the horizontal structure. And the characteristics of VES curves shows us KH type.

Keywords : shallow subsurface, Resistivity survey, VES

서 론

국제협력단(KOICA)의 개발조사사업의 하나인 인도네시아 칼리만탄 중부 탐사 지질도 작성사업으로, 물리탐사는 1999년 10월 15일부터 10월 27일까지 13일간 풍화와 운반에 의해서 형성된 2차 성인 금 광상분포 지역인 인도네시아 중부 칼리만탄의 타카오이 지역(Fig. 1)의 천부 지질정보 획득 및 물리탐사 자료 특성 파악을 목적으로 수행하였다. 금 탐사에 대한 물리탐사 기술은 광상형태에 따라 적용방법이 달라진다. 사금(Gold placer)에 대해서는 직접적인 탐사법을 적용할 수 없고 간접적인 방법을 사용하는 것이 일반적이다. 외국에서는 전기비저항탐사, 탄성파탐사 및 중력탐사 등을 이용하는 것이 보통이다. 국내에서는 사금에 대한 물리탐사는 이상규 등(1988)에 의해서 고분해능 TEM탐사를 수행한 사례가 있다. 타카오이 지역은 퇴적층 내에 금의 함유율이 매우 작기 때문에 금에 대한 물리적인 특성을 이용하기 힘들다. 따라서 금을 대상으로 하는 직접적인 물리탐사법을 적용하여 금을 찾는 것보다 금이

함유되고 있을 가능성이 큰 퇴적층의 층서 분포 확인을 목적으로 지구물리탐사의 일종인 전기비저항탐사를 사용하였다. 수행된 전기비저항탐사는 매질의 수직적 변화에 대한 분해능이 좋은 슬럼버저배열 수직탐사와 지질매체에 대한 수직-수평 정보를 획득할 수 있는 쌍극자 배열 전기비저항 2차원 탐사이다.

지표지질 및 광상

조사지역의 지표지질은 편암과 천매암과 같은 변성퇴적암류로 이루어진 석탄-페름기의 피노 변성암류를 최하위 지층으로 하여 토날라이트, 화강섬록암, 화강암 등의 각종 화강암질암과 소량의 각섬암 및 섬록암으로 구성된 백악기 세파옥심성암류가 제3기 분지의 기반암을 형성하면서 분포한다. 화강섬록암 내에 세립질 화강암이 도처에 관입한 것이 관찰된다. 수직적인 시료채취조사(Fig. 2)에 의하면 표토층의 두께는 얇은 곳이 약 1 m, 깊은 곳은 약 10 m 내외이다. 표토층 하부에는 점토층, 또

*2001년 5월 14일 접수

1) 한국지질자원연구원 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

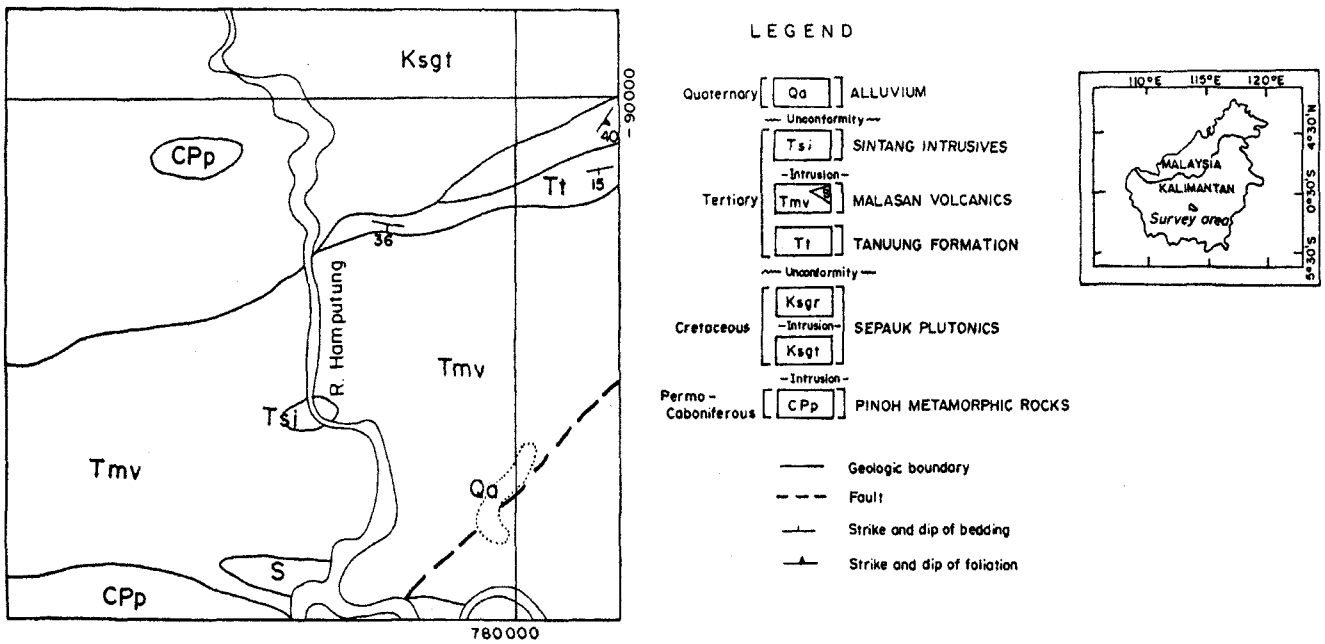


Fig. 1. Geological map of the study area in central Kalimantan, Indonesia.

는 두께가 약 20 cm~2 m인 미고결 역질층이 분포하고 있다. 점토층 또는 역질층 하부에는 기반암인 화강섬록암이 분포하고 있으며, 이들은 심하게 풍화되었으나, 원암의 구조를 거의 지니고 있으며, 금은 거의 배태되지 않는다. 한편 사금 광상은 표토층 내에서는 거의 발견되지 않으며, 표토층 하부에 분포하는 미고결 역질층 그리고 미고결 역질층과 기반암 사이에 배태되어 있다(Fig. 1). 이 같은 사금의 기원은 아직 정확히 알려지지

않고 있으나, 화산암내에 분포했던 석영맥이 부서지면서 이들 금이 석영맥에서 분리되어 운반 퇴적된 것으로 생각된다 (Chon *et al.*, 2000).

자료획득 및 처리

조사지역에 대한 천부 지질정보 획득을 목적으로 수행된 쌍

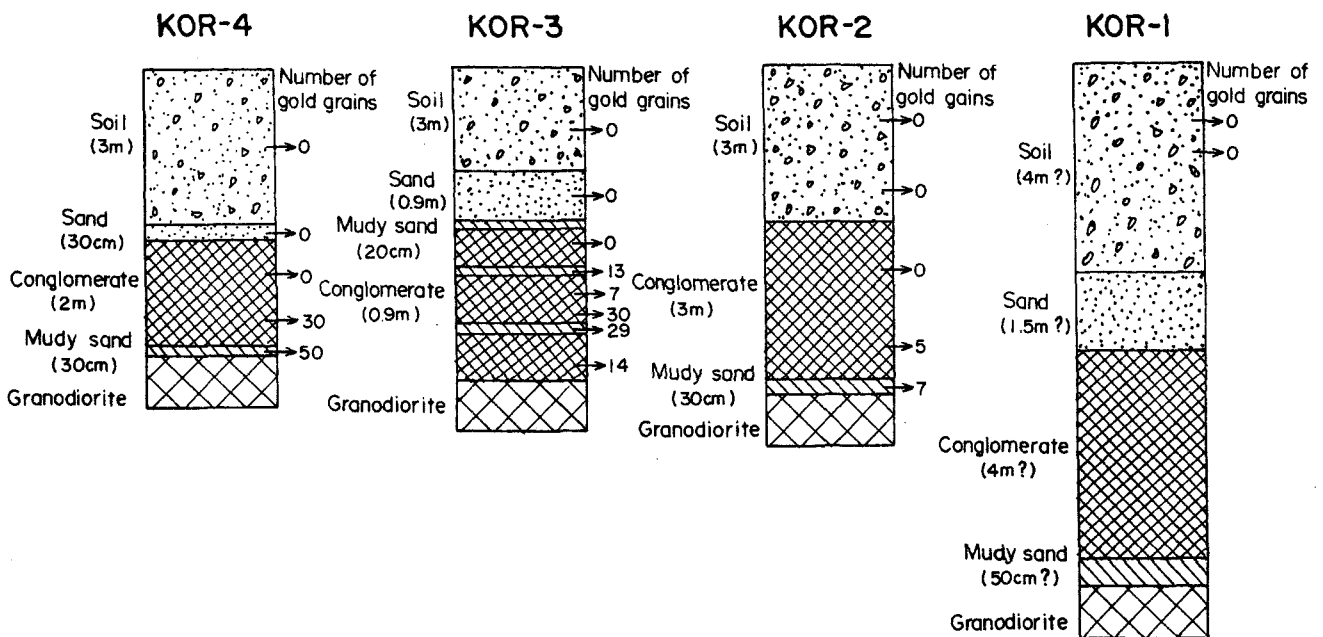


Fig. 2. Columnar section in the Takaoi area on central Kalimantan, Indonesia and map showing number of gold grains in each zone (after Chon, Hee Young *et al.*, 2000).

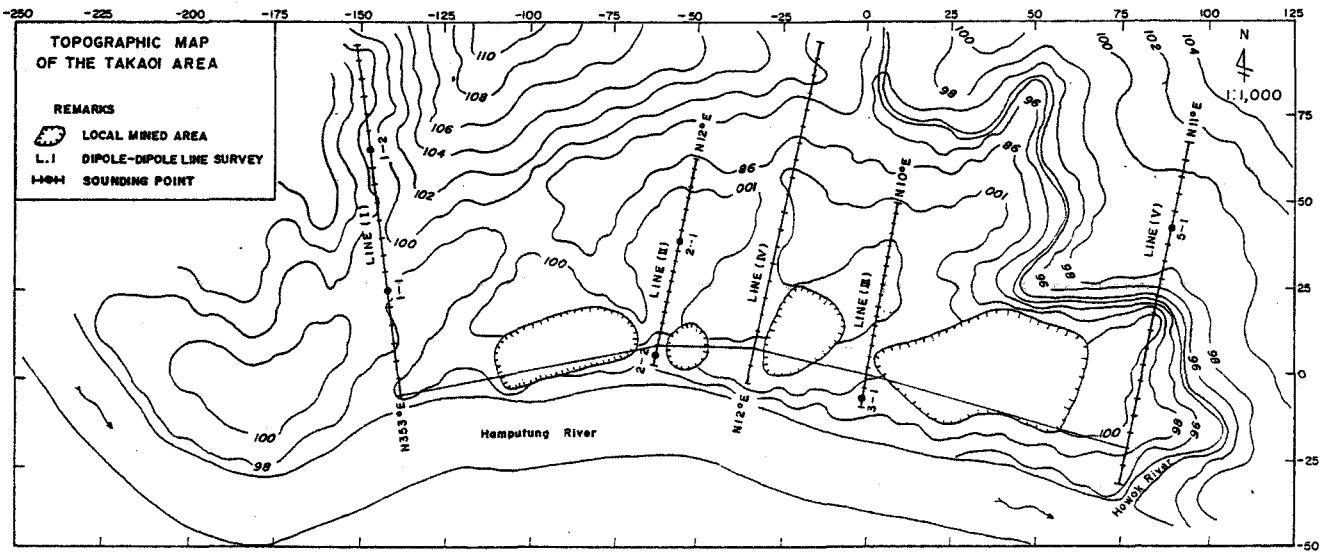


Fig. 3. Electrical survey map including topographic in Takaoi area, Kalimantan, Indonesia.

극자배열 전기비저항 2차원탐사와 슬럼버저배열 수직탐사의 5 개 측선 및 6개 측정점은 Fig. 4와 같다. 모든 측선 및 측정점은 Hamputung River의 동편에 위치하고 있으며, 측선들의 방향은 N7°W~N12°E로서, 대체적으로 서로 평행하게 설정되었다. 또한, 2차원탐사 결과와 비교 해석을 위하여 측선 I, II, III, V 상에 수직탐사 측정점을 설정하였다.

측선 I, IV, V에서 수행한 쌍극자배열 2차원 탐사의 경우, 측정 시 가탐심도를 25 m 내외로 하기 위하여 전극간 거리와 전극전개수를 각각 5 m와 1~10으로 하였고, 측선 II와 III에서 다른 측선들과 비교하여 상대적으로 천부에 대한 지질정보를 얻기 위해 전극간 거리를 3 m로 하였다. 6개의 측정점에서 수행한 슬럼버저배열 수직탐사의 경우, 전위 및 전류전극 간격을 각각 0.1~5 m 그리고 0.5~100 m까지 전개하여 측정하였다. 측정된 자료에 대한 해석을 위하여 이 연구에서는 평활화제한 역산법 (smoothness constraint inversion method)을 이용한 DIPRO와 SOUNDPRO(Kim, Jeong-Ho, 1996)를 사용하여 역산하였다.

자료해석 및 토의

수직 비저항 탐사

조사지역에 설정한 6개의 측정점에서 측정된 수직탐사 자료에 대한 역산 결과는 Fig. 4와 같다. 측정점 1-1 및 1-2에서 측정된 탐사자료에 대한 역산으로부터 산출된 전기비저항의 분포는 $\rho_0 < \rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ 의 형태를 나타내며, 지전기적 층구조는 5개의 층으로 구성된다. 매우 얇은 층(약 20 cm 이하)으로 확인되는 제1층은 탐사목적 및 탐사조건 그리고 설치된 전극의 기하학적 위치에 대한 오차 등을 고려할 경우, 역산결과에 대한 의미를 부여할 수 없으나, 전체적으로 제1층의 전기비저항이 제2층보다는 낮음을 알 수 있다. 측정점 1-1과 1-2에서 제2층

의 두께는 약 2 m 내외이고 전기비저항값은 약 2000 ohm-m 내외로서, 전기비저항이 1000 ohm-m 이하를 보이는 제3, 4층과 비교하여 상대적으로 높은 전기비저항값을 갖는다.

측점 2-1에서 측정된 겉보기 전기비저항 곡선은 다른 측정점의 곡선들과 유사하며, 역산에 의해 확인된 5개 층에 대한 전기비저항값의 분포는 $\rho_0 < \rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ 이다. 즉, 상대적으로 높은 전기비저항을 보이는 제2층의 전기비저항값은 1868 ohm-m이고 제3층과 제4층의 전기비저항값은 각각 266 ohm-m, 374 ohm-m인 낮은 전기비저항을 보인다. 역산에 의해 확인된 측정점 2-2의 전기비저항값의 분포는 $\rho_0 < \rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ 형태, 즉 제1층의 전기비저항은 약 1000 ohm-m, 제2층은 5624 ohm-m, 제3층 355 ohm-m, 제4층은 68 ohm-m, 제5층은 4192 ohm-m이다. 측정점 3-1과 5-1에서 지자기적 층서구조에 대한 전기비저항의 분포형태는 측정점 2-2와 같은 $\rho_0 < \rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ 이나, 제4층의 전기비저항값은 측정점 2-2와 비교하여 상대적으로 매우 낮음을 알 수 있다.

수직적인 시료채취 조사자료에 의하면 본 지역의 퇴적물 층서는 대체적으로 토양/사질/미고결 역질층/점토질 사암(풍화대)기반암 등을 유지하고 있는 것으로 보고되었다(Chon et al., 2000). 따라서, 수직 비저항 탐사자료를 시료 채취조사 자료와 연계하여 생각할 때, 이곳에서 보여주는 전기비저항값들의 의미는 제1층은 토양, 제2층은 사질층, 제3층은 미고결 역질층, 제4층은 점토질 사암/풍화대 및 제5층은 기반암으로 분류 할 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 전기비저항 수직 탐사로부터 측정된 자료의 곡선 형태는 ① H형: 중간지층의 비저항이 가장 낮은 경우, ② Q형: 심도에 따라 순차적으로 낮아지는 경우, ③ K형: 중간지층의 비저항이 가장 높은 경우, ④ A형: 심도에 따라 순차적으로 높아지는 경우 등으로 분류된다(Burger, H. Robert, 1992). 본 역에서 측정된 수직비저항

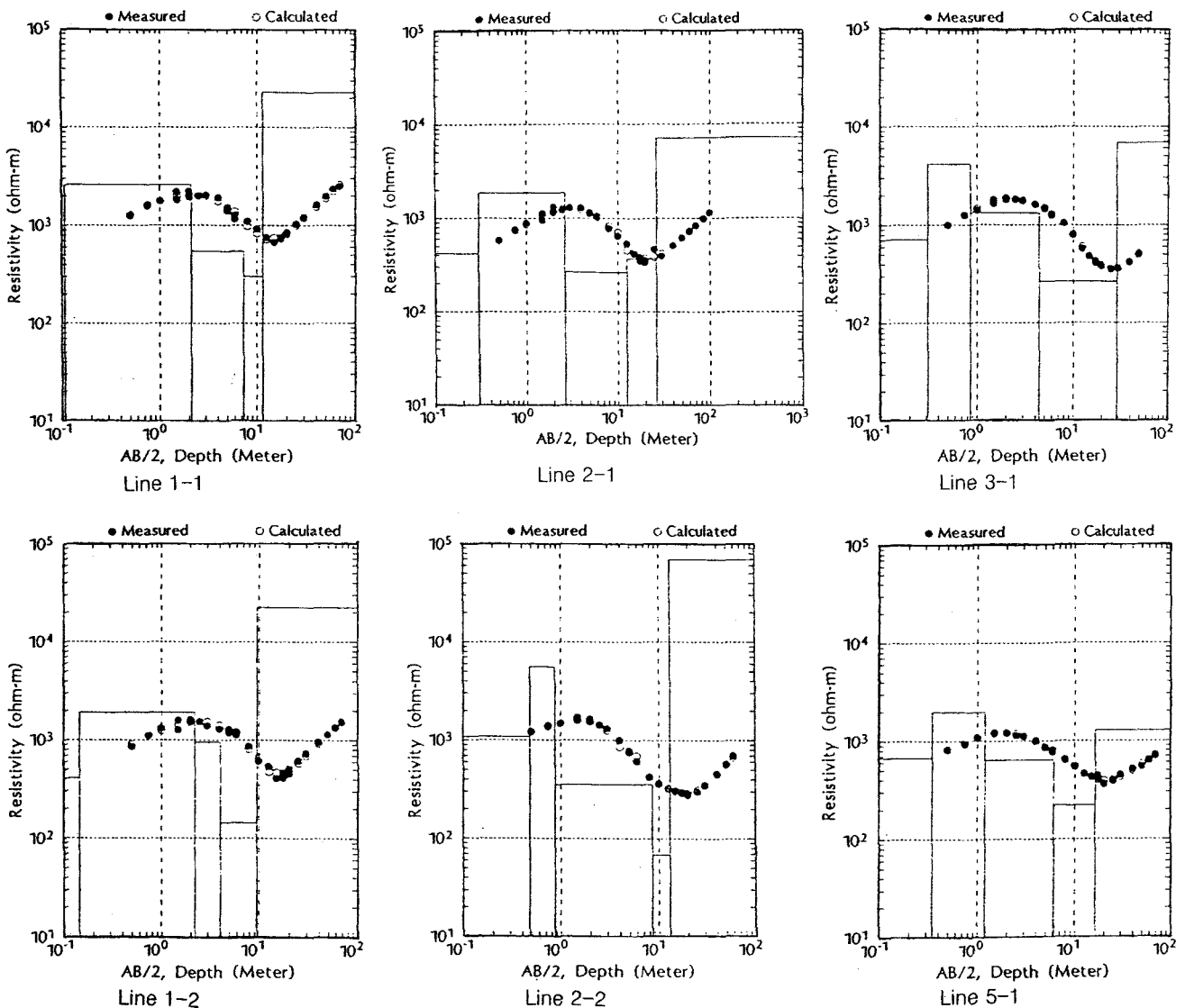


Fig. 4. Inversion results of DC resistivity sounding data carried out at Takaoi area.

탐사자료 형태는 중간지층의 비저항값이 고, 저, 고의 경향을 보여주는 KH형이다.

쌍극자 배열 전기비저항탐사

5개의 측선에서 수행된 전기비저항 2차원탐사에 대한 역산 결과는 Fig. 5와 같다. 전체적인 전기비저항의 분포는 중간층이 낮은 전기비저항을 갖는 층서구조를 나타내고 있으며, 전기비저항 수직탐사의 결과 그리고 시추조사와도 비교적 잘 일치하고 있다. 측선 I은 3개의 서로 다른 전기비저항, 즉 제1층은 상대적으로 높은, 제2층은 낮은 그리고 제3층은 높은 전기비저항을 갖는 층으로 구성된 수평구조를 나타낸다. 여기서, 전기비저항 수직탐사와 시추조사에 대한 결과들을 연계하여 종합 해석할 경우, 제1층은 토양/미고결 역질층, 제2층은 점토질 모래층, 제3층은 모래층과 접한 상부의 풍화대와 기반암으로 해석된다.

측선 II에 대한 전기비저항 수직단면도는 측선 하부의 지전기적 구조가 제1층은 높은 전기비저항 그리고 제2층은 상대적으로 낮은 전기비저항을 갖는 2개의 층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있으며, 제2층에 대한 전기비저항의 수평적 분포는 측선의 시작점, 즉 남동부와 비교하여 측선의 북서부에 낮은 전기비저항대가 존재한다. 전기비저항 수직탐사에 의해 심도 약 10 m 내의에서 확인된 기반암은 분해할 수 없었으나, 시추조사를 참조할 경우, 제1층은 토양/미고결 역질층, 제2층은 점토질 모래층과 기반암의 풍화대인 것으로 유추할 수 있다. 측선 III에 대한 전체적인 전기비저항의 분포는 심부로 갈수록 낮은 전기비저항값을 보여주고 있으나, 측선의 중앙부(측점 7~12)에서는 기반암으로 판단되는 높은 전기비저항대가 지표로부터 약 20 m 심도에 분포하고 있다. 기반암 상부에 존재하는 낮은 전기비저항대는 점토질 모래층 그리고 기반암의 풍화대를 포함한 것으로 해석된다. 측선 IV의 지전기적 구조는 다

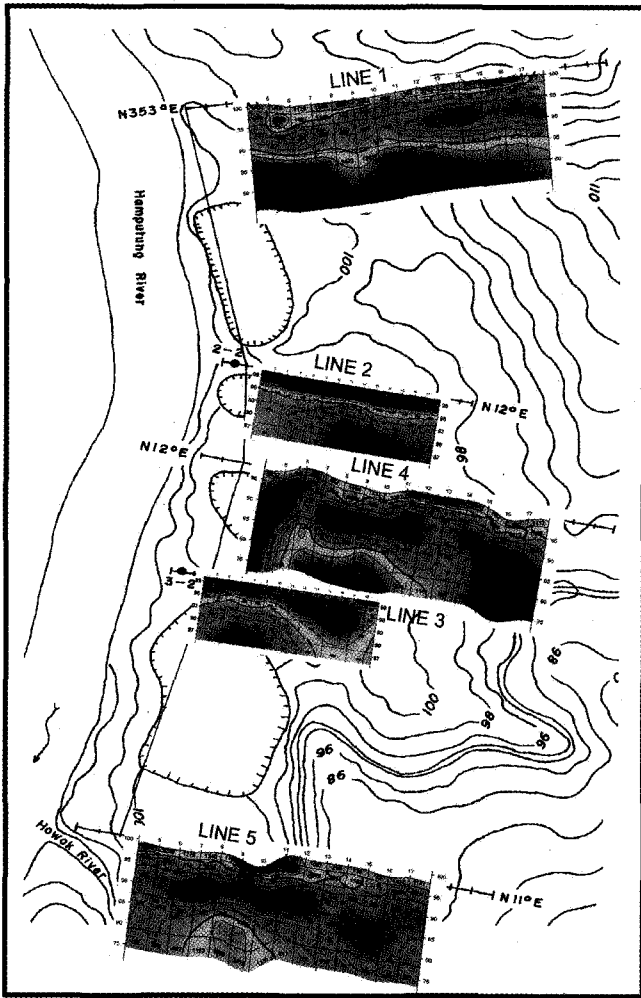


Fig. 5. Topographic map including vertical resistivity sections obtained from two-dimensional DC resistivity surveys carried out at Takaoui area.

른 측선에서 수행한 전기비저항탐사의 결과와 동일한 서로 다른 전기비저항값을 갖는 2개의 층으로 구성된다. 측선과 인접한 지점에서 실시한 시추결과로부터 천부에 존재하는 높은 전기비저항대는 토양/미고결 역질층으로 판단되며, 그 하부의 낮은 전기비저항대는 점토질 모래층으로 해석된다. 특히, 다른 측선과 다른 특징은 제1층의 높은 전기비저항대의 분포심도가 측선의 남동부에서 북서부로 갈수록 차차 깊어진다는 것이다. 측선 V의 매질의 특성은 크게 3개 층으로 분류할 수 있으며, 특히 측점 7-11까지는 천부는 고 비저항대, 제2층에서는 저 비저항대를, 제3층에서는 고 비저항대인 3층구조를 확인할 수 있었다. 천부에서 2~3m의 두께를 갖는 고 비저항대 제1층은 토양/미고결 역질층, 심도 15m 하부에서 고 비저항대를 보여주는 제 3층은 풍화대로 생각된다.

전기비저항 수직탐사와 2차원탐사 그리고 시추조사에 대한 결과로부터 조사지역의 동부는 사질층/미고결 역질층/풍화대/기반암의 순서로 수평적인 층서 구조를 갖고 있으며, 또한 주어진 물리탐사의 가탐심도 내에서 기반암의 심도를 어느 정도 확인할 수 있다. 이에 반하여 조사지역의 중앙부와 서부의 전기비저항의 분포는 천부에 수평적으로 존재하는 미고결 역질층의 높은 전기비저항대를 제외하고는 매우 불규칙한 분포를 보이며, 전체적으로 기반암의 심도는 조사지역의 동부로부터 서부로 갈수록 깊어진다. 또한 시추조사에 의한 조사지역의 중앙부와 서부지역의 층서구조는 각각 사질/점토질 모래층 및 미고결 역질층/풍화대 그리고 사질층/미고결 역질층 및 점토질 모래층/풍화대 순서로 구성되었다.

결 론

중부 칼리만탄 지역에서 수행된 전기비저항 탐사에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있다. 1) 전기비저항 탐사 결과, 본 지역은 4~5개 수평층으로 분류할 수 있다. 즉, 제1층은 토양층, 제2층은 사질층, 제3층은 미고결 역질층, 제4층은 점토질 사암층/풍화대 및 제5층은 기반암층으로 분류할 수 있다. 2) 수직탐사자료의 비저항곡선은 $\rho_0 < \rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ 의 형태의 KH형을 나타내고 있다. 3) 금을 배태하고 있는 제3층 미고결 역질층은 본 지역에 수행된 비저항 탐사 결과에 의하면 대략적으로 지하 1.6m에서부터 약 5~6m 정도의 두께를 가지는 제3의 수평층임을 알 수 있다.

사 사

이 연구는 KOICA사업 “인도네시아 중부 칼리만탄지역의 지질매핑 연구과제”의 일환으로 수행되었으며, 많은 조언을 하여 주신 심사위원님들에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 이상규, 박인화, 정현기, 이명민, 1988, 금 탐사를 위한 고분해능 TEM탐사, 금속 광상 조사연구, KR-88-2A-2, p177-151.
- Chon, Hee Young *et al.*, 2000, The final report of geological mapping project in central Kalimantan region, Indonesia (Phase II), KOICA and KIGAM. 225p.
- Burger, H. Robert, 1992, Exploration geophysics of the shallow subsurface, 489p.
- Kim, Jeong-Ho *et al.*, 1996, The software package on the processing and interpretation of the resistivity data.