

월악산화강암체의 파쇄대규명을 위한 전기비저항탐사 Electrical Resistivity - Measurements for the Detection of Fracture Zones in the Woraksan Granitic - Bodies

김 지 수 (Kim, Ji - Soo)

충북대학교 지구환경과학과

권 일 룡 (Kweon, Il - Ryong)

충북대학교 지구환경과학과

요약 / ABSTRACT

결정암체의 불규칙한 파쇄대에 대한 전기탐사 자료의 효율적인 자료처리·해석 연구를 목적으로 큰 저반의 월악산화강암체에 대하여 전기비저항 쌍극자배열 탐사, 전기비저항 슬럼버저배열 수직탐사를 수행하였다. 파쇄대등의 불균질대는 쌍극자배열법으로 잘 규명되었고, 균질하고 치밀한 화강암체내에도 소규모의 파쇄대가 비교적 심부까지 발달되어 있는 것으로 해석되었다. 파쇄대는 전기비저항 쌍극자탐사자료 단면도에서 주로 고비저항대와 저비저항대의 경계에 분포된다고 할 때, 수직탐사자료들을 서로 내·외삽시켜 만든 2차원의 층, 3차원적인 입체도에서도 그 분포양상이 잘 나타났고 그 천부 경계선은 극저주파 전자탐사자료에서 영점통과점으로 확인되었다. 불규칙한 파쇄대의 삼차원적인 지하영상은 여러 단면도들을 배열하여 만든 합성단면도 (fence diagram)에 시각적으로 보이며 그 공간적인 분포양상은 투사각 변화를 주어 가며 여러 각도에서 조명하므로써 효과적으로 해석되었다. 월악산 흑운모화강암체와 파쇄대의 복합 비저항값은 약 $4,000\ ohm - m$ 로서 $700\ ohm - m$ 의 석회규산염암 자료에 비해 매우 높게 나타나는데 이 차이는 일차적으로 두 지역에 분포하는 암석에 기인하지만 화강암의 관입작용과 관련되어 화천리층에 발달한 습곡이나 단층등의 2차 공극과도 관련 된 것으로 보인다. 파쇄대에 대한 전기비저항값의 특성분석은 단면도영상의 표준편차, 비대칭도, 첨도등의 통계적인 분석으로 접근되었다. 고비저항대와 저비저항대 경계의 파쇄대는 균질한 암석에 비해 높은 표준편차로 특징되며 그 분포양상은 비대칭도 및 첨도 영상에서도 잘 상관되었다.

Electrical resistivity methods of dipole - dipole array profiling and Schlumberger array sounding were tested on a segment of the Woraksan granitic batholith for the research into the imaging of irregular attitudes of fracture zones in the crystalline rock in terms of processing and interpretation schemes. By the dipole - dipole array method, inhomogeneities such as small scale of fracture zones were properly delineated down at some depth even within hard rock environment. Fracture zones were interpreted to

be at the boundaries between the high amplitude zone and very low amplitude zone in the resistivity plot and they were also successfully outlined in two - dimensional layer and pseudo - three - dimensional volume constructed by the incorporation of vertical sounding data. The surface location of the fracture zones was correlated by the zero - crossing point in the VLF(very low frequency) electromagnetic data. Pseudo - three - dimensional attitudes of fracture zones were efficiently illuminated by optimum projection angle. The mean of bulk resistivity for the Woraksan granite and the near fracture zones is estimated to be approximately of $4,000 \text{ ohm-m}$, which is much higher than the value of 700 ohm-m for the Hwachunri limesilicate environment. This difference is due to both the rock type, i.e., biotite granite vs limesilicate, and the occurrence of secondary openings of fold and fault associated with the intrusion of granite. In this study statistical analyses on the resistivity color plot were performed in terms of three representative statistical moments, i.e., standard deviation, skewness, and kurtosis. The fracture zones in the standard deviation plot were characterized by the higher value, compared to the value of homogeneous portion. The upper boundary of the high resistivity zone was also successfully delineated in the skewness and kurtosis plots.

서 론

건설토목, 지질환경문제등과 관련된 엔지니어링 연구 및 사업에서 가장 중요하고 우선적인 것은 지하암반내에 발달된 주요 불균질대의 분포범위가 되는 파쇄대등을 지표 지구물리탐사법으로 정확히 규명하는 작업이다. 이때 일반적으로 고려하여야 할 지질학적 기준은 암체의 구조적인 안정성 및 균질성등으로서, 이 조건들을 만족시키기 위해서는 화강암체와 같은 치밀하고 신선한 암반을 최대한 크게 확보하고 그 주변의 단층, 파쇄대의 유무, 위치, 발달상황등을 규명하여 지하암반의 안정성에 대한 검토를 충분히 해야한다(Brown and Soonawala, 1989; 김호영외, 1997).

대표적인 지표물리탐사에는 예를 들어 핵폐기물의 안전한 처리장소 및 지하공간건설 부지 선정을 위해서 결정암반내의 소규모 단층, 절리, 파쇄대등의 탐지(detection)와 규명(resolution)에 많이 쓰이는 탄성파반사법, 탄성파굴절법, 전기탐사, 전자탐사, 중·자력탐사등이 있다. 이 중에서 전기탐사와 탄성파반사법 탐사는 지하 단층 및 파쇄대등의 원격투시에 가장 신속하고 효과적으로 이용할 수 있는 대표적인 지표 물리탐사 방법이라 할 수 있다(Ross et al., 1990; Kim et al., 1994; 송무영과 경재복, 1996; 송영수의 1996).

탄성파반사법은 암반내에 발달한 파쇄대 및 절

리 등의 경계에서 일어나는 반사에너지를 자료처리하여 지하구조 영상으로 직접 나타내는 고분해능(high resolution) 탐사라 할 수 있는데 이미 스웨덴, 캐나다, 핀란드등에서 수행되고 있는 지하공간 건설 및 핵폐기물처리 부지선정에 성공적으로 활용되고 있다(Mair and Green, 1981; Almen and Zellman, 1991; Backblom, 1991). 일반적으로 탄성파반사법에서 미세한 균열대(single fracture)는 시간-공간 분해능 문제와 관련되어 영상화하기에 한계가 있으나 수개의 균열대가 군집된 일정 두께 이상의 파쇄대(fracture zone)는 성공적으로 탐지되고 규명될 수 있다. 그러나 퇴적층에 비해 결정암(crystalline rock)에 발달하기 쉬운 수직에 가까운(subvertical) 불연속면은 아직도 파의 회절현상등으로 적용되기 어려운 단점이 있다(Telford et al., 1990).

한편 전기탐사가 지하의 전기적인 물성의 차이에 의한 반응을 지표에서 측정하여 지하구조를 영상화시키는 모든 방법을 의미한다고 할 때, 전기비저항법은 지하불연속면에 대한 분해능은 탄성파반사법에 비해 떨어지나 맥상 파쇄대에 잘 적용되는 장점이 있다. 파쇄대에 대한 전기비저항법은 주로 쌍극자배열법을 적용하는데 지금까지 전개된 파쇄대의 규명은 주로 퇴적암환경에서의 지하수탐사 및 환경평가를 목적으로 전개되어 왔다(이기화와 김형수, 1994; 김형수의 1995; 이상규외, 1995). 이 연

구에서는 관입 화강암환경에 대한 파쇄대 탐사의 효율성을 평가하기 위하여 관입암의 큰 저반을 이루고 있는 월악산화강암체를 대상으로 하여 전기탐사의 수행과 그에 대한 적용성을 검토하였다. 탐사지역이 전자기적 잡음이 거의 없는 지대임을 고려하여 전기탐사법에 극저주파 전자탐사법도 수행하여 그 결과를 전기탐사자료와 비교하여 보았다.

불규칙한 저비저항대의 영상은 한 개의 축선단 위로는 단면도를 해석할 때 어려운 점이 많으므로 해석적인 차원에서 여러 단면도를 조합하여 파쇄대 및 고비저항대의 삼차원적 모형을, 그리고 투사각 변화를 주어 가며 그 공간적인 분포 양상을 여러 각도에서 조명하고자 하였다. 또한 수직탐사자료는 자료의 속성상 1차원자료의 한계성으로 해석에 무리가 따르는 관계로 여러 수직탐사 자료를 서로 내·외삽시켜 2차원의 층(layer), 3차원적인 입체도를 재건하여 쌍극자탐사자료와 상관·비교하였다.

높은 비저항값으로 특징되는 월악산화강암체와 대비·분석하기 위하여 관입환경의 경계부근에 위치한 화천리층의 석회규산염암 환경에 대한 비저항값을 살펴보았다. 칼라 비저항 단면도에서 파쇄대의 영상특성을 알아보고, 자료처리때 수반되는 고주파 인공잡음을 제거하는데 초점을 두고 고비저항대, 저비저항대 및 그 경계면의 개략적인 물성 (bulk properties) 정보를 얻고자 비저항 영상의 통계분석을 시도하였다. 또한 이 연구의 목적이 파쇄대의 규명에 있는 점을 고려하여 탄성파반사법 자료처리에서 얻어지는 지층반사면의 영상 효과처럼 고비저항대와 저비저항대의 경계면 영상화를 비저항값의 통계분석으로 접근하고자 하였다.

연구 지역

월악산 일대의 지질은 주로 조선계 대석회암통의 석회규산염암 이후 부정합으로 피복하는 시대미상의 서창리층의 변질대 및 이들을 관입한 각섬암과 백악기에 분출한 안산암과 유문암 이후에 관입한 불국사통의 흑운모화강암들로 구성되어 있다. 특히 흑운모화강암은 단양, 문경일대까지 포함하는 하나의 큰 저반을 이루는 단위로서 월악산화강암체(그림 1)의 큰 주류를 이룬다. 이 암체는 충북지역의 체천화강암체, 속리산화강암체와 더불어 경상계

불국사통에 속하며 주라기의 대보화강암체에 비하여 비교적 천부까지 관입한 것으로 알려졌다 (나기창외, 1986; Lee et al., 1994)

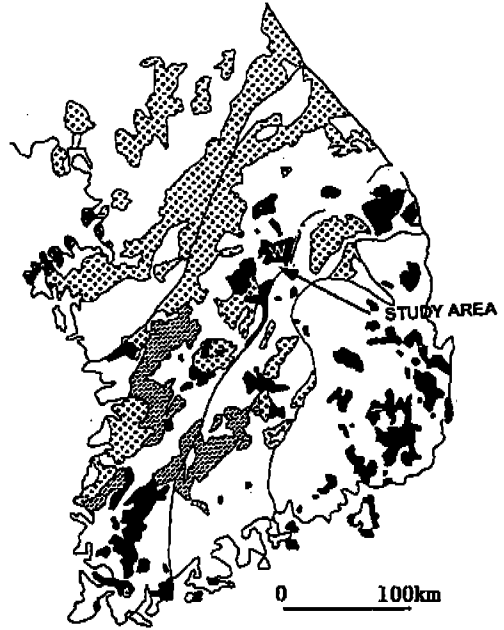


Fig. 1. Distribution of granite rocks in south Korea. Woraksan granite (W) is represented by the arrow. Dot, cross, and solid patterns represent Archean-Proterozoic, Jurassic, and Cretaceous granitic mass respectively. (After Lee, I., 1994.)

이 연구에서는 큰 저반을 이루고 있는 화강암체 내의 주요 불균질대 및 전기적인 물성을 규명하고자 수치지형 음영도 (그림 2) 및 지질도를 참조하여 비교적 습곡이나 단층등 큰 지질학적인 불연속면이 없는 지역 중에서, 산세가 험한 월악산 정상보다는 화강암체의 남서 주변부에 위치하며 탐사조건이 양호한 월악산 국립공원 후분이 위치한 충주시 상모면 사문리 일대 (그림 3)를 탐사대상으로 하였다. 월악산화강암체의 관입작용은 접촉변성작용을 일으켜 주위에 석회규산염암의 변질대를 형성하는데 이는 단순한 화성기원에 의한 규화가 아니라 일차적인 기원 즉, 퇴적시에 규산 부화대(silica rich zone), 칼슘 부화대(calcium rich zone)가 교호

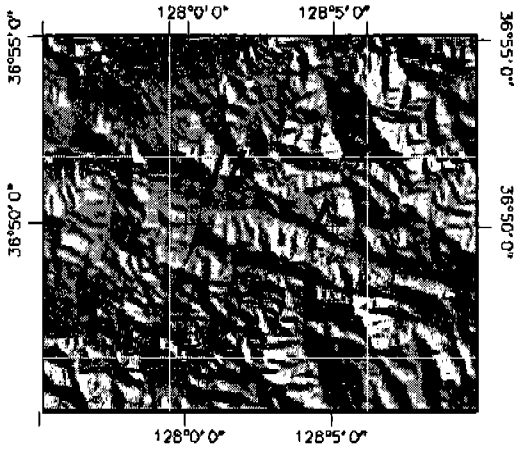


Fig. 2. Computerized shaded relief image for the study area. The Samunri and Hwachunri are represented by the right arrow and the left arrow respectively.

적으로 퇴적되었으며 그 후에 산성화강암의 관입에 따른 변질작용을 받은 것으로 해석된다(한국지질도 황강리도폭, 1967; 한국지질도 문경도폭, 1967; Reedman et al., 1973). 이 연구에서는 월악산화강암체뿐만 아니라 남서쪽으로 약 5 km 떨어진 석회규산염암으로 이루어진 화천리층에 대한 탐사를 수행하여 월악산화강암체와의 물성 대비를 파악하고자 하였다.

자료수집·처리·해석

이 지역에서 사용한 탐사배열법은 쌍극자배열 전기비저항과 슬림버저배열 전기비저항 수직탐사법이며 천부구조의 상관해석을 위하여 극저주파(VLF) 전자탐사법도 추가 수행하였다. 사용된 탐사 기기는 전기비저항탐사를 위해서 스웨덴 Atlas Copco사의 ABEM TERRAMETER SAS 300C 및 BOOSTER를, 극저주파 전자탐사에서는 같은 회사

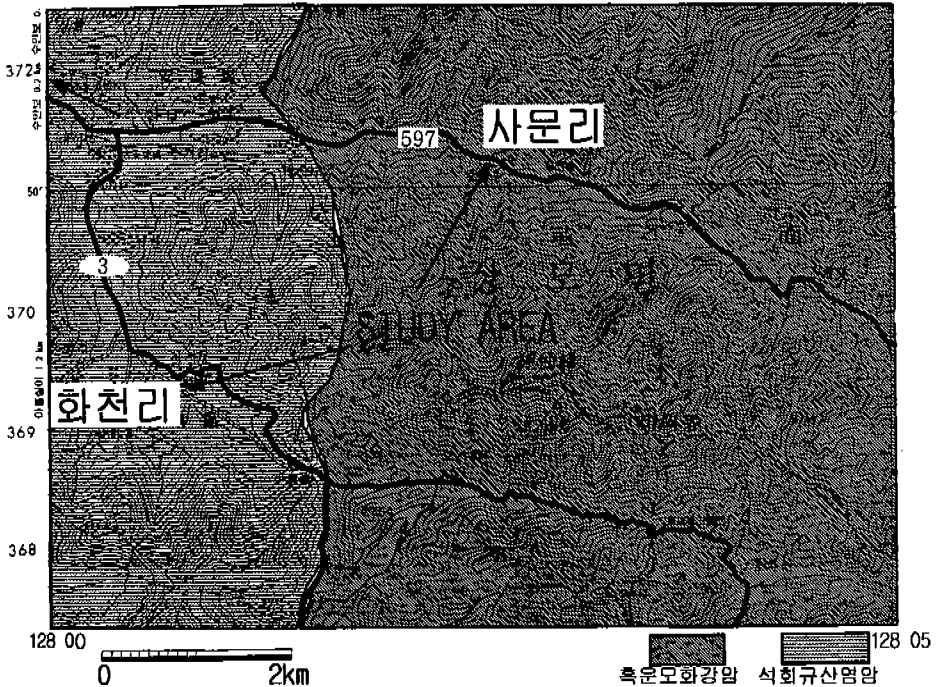


Fig. 3. Location and geology of study area of the Samunri Woraksan granite and the Hwachunri Ilmesilicate.

의 ABEM WADI를 사용하였다. 전기탐사 자료처리에는 주식회사 희송(1996)의 상업용 소프트웨어 DIPRO 및 SOUNDPRO를 사용했으며, 극저주파 전자탐사자료는 ABEM SECTOR (Atlas Copco, 1992)를 사용하였다.

쌍극자배열 탐사

사문리 일대에서의 탐사는 축선의 전개조건을 고려하여 전기탐사에서는 서로 교차하는 4개의 쌍극자축선 (축선길이 : 2개의 1.0km, 2개의 0.5km) 과 수직탐사 8점에 걸쳐 수행하였다(그림 4). 사용된 쌍극자 간격은 $a=25m$ (LINE 2, LINE 3)와 $a=50m$ (LINE 1, LINE 4, LINE 2_A), 전극전개는 $n=8$ 로 하여 가탐심도를 각각 125m와 200 m가 되도록 하였다. 자료의 수집과정에서 투입전류가 50mA 이상을 유지하기 어려웠던 것은 이 지역의 지질환경이 천부까지 관입한 흑운모화강암으로서 전기전도성이 양호하지 않은 것에 기인한다. 따라서 탐사일정을 비가 온 직후로 잡았으며 측정할 때 각 전극에 소금물을 주입하여 신호 대 잡음 (S/N) 을 최대한 높이는 데 주력하였다.

그림 5a,b,c는 각각 축선 LINE 1에 대한 현장자료로부터 거리계수가 보정된 겹보기비저항 가단면도(field data pseudosection), 지하구조 모형으로부터 계산된 이론 겹보기비저항 가단면도(theoretical data pseudosection), 자동역산 결과 얻어진 지하구조 모형(resistivity structure)을 도시한 것이다. 여기에서 이론 겹보기비저항 단면도에서 현장 겹보기비저항 가단면도와 의 근접성은 자동역산 결과 얻어진 지하구조 모형의 객관적 타당성을 의미한다(김정호,1987). 각 지하구조 모형의 도출에 사용된 오차한계 범위는 RMS 오차 0.05~0.1로서 단순히 오차만을 최소화시키는 경우 발산문제로 의미없는 지하구조가 도출되는 관계로 지하구조에 제한을 두기 위한 Creeping Damped 최소자승법(김정호외, 1989)을 주로 사용하였다.

측점간격 50m로 길이 1.0km에 걸쳐 얻어진 LINE 1의 현장자료에서 측정번호 18의 동쪽은 비저항값이 4,000 $ohm-m$ 이상으로 나타나 퇴적암 환경이나 다른 화성암환경 자료에 비해 매우 높은 값을 보이고 있다. 반면에 측정번호 7과 12의 구간

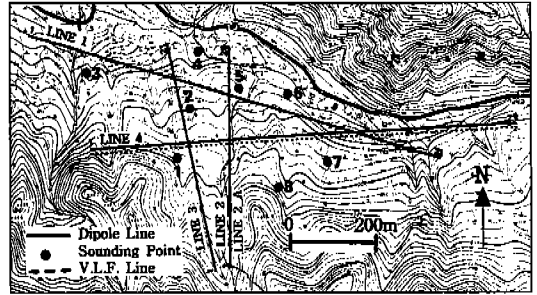


Fig. 4. Survey lines for the Woraksan granite at the Samunri area. The lines LINE 2 and LINE 2_A exactly overlie each other.

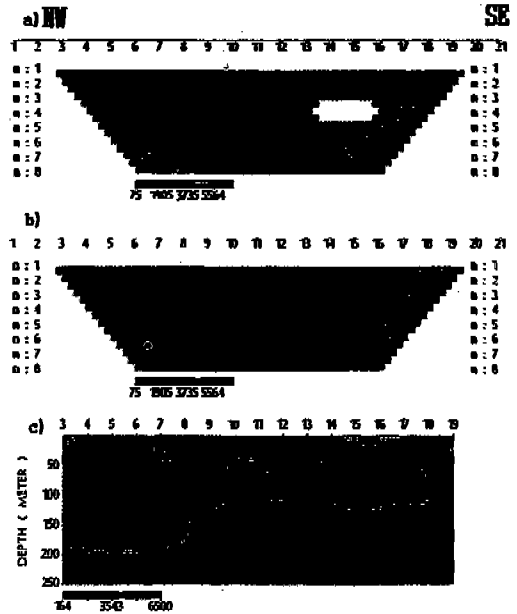


Fig. 5. Resistivity data for the LINE 1 (Unit : $ohm-m$): (a) field data pseudosection, (b) theoretical data pseudosection, and (c) resistivity structure.

은 1,000 $ohm-m$ 내외의 상대적으로 작은 비저항값을 보이고 있다. 측정번호 9와 12 사이에 돌출된 천부의 고비저항값은 현장가단면도의 측정번호 5와 6의 하부에 보이기 시작하는 고비저항값의 영향으로 보이는데 당초 이 돌출부는 현장자료의 측정번호 7번과 12 구간의 낮은 비저항값과 큰 차이

를 보여 그 구조를 확신할 수 없었다. 그러나 뒤에 수행한 교차측선 LINE 2 (그림 6a)의 측정번호 14와 17사이의 고비저항대와 서로 상관됨을 볼 때 그 신뢰성은 인정된다.

측선 LINE 1을 가로질러 남북방향으로 0.5km의 길이, 전극간격 $a=25m$ 으로 측정한 LINE 2 (그림 6a)는 수집자료의 신뢰성을 확인하고 파쇄대의 심부 연장성을 살펴보기 위하여 동일 측선에 대해 전극간격 $a=50m$ 의 자료 (LINE2_A)를 함께 얻어 보았다(그림 6b). 두 현장자료들에서 보듯이 비저항값은 공통적으로 측선 중앙부의 수백 $ohm-m$ 이 양단으로 가면서 4,000 $ohm-m$ 내외까지 증가하고 있다. LINE 2의 측정번호 6의 오른쪽에 나타난 심도 125m까지 연장된 500 $ohm-m$ 내외의 저비저항대는 일단 심부까지 연장된 파쇄구조라 생각할 수 있다. 그러나 전극간격 $a=50m$ 로 탐사하여 가탐 심도가 200m까지 늘어난 LINE 2_A (그림 6b)에서 볼 때 그림 6a의 측정번호 3과 6사이에서 심도 200m까지 연장된 고비저항대에 의해 차단되어 있

음을 알 수 있다. 그림 6c는 LINE 2의 단면도와 LINE 2_A의 단면도를 서로 상관분석하기 위하여 LINE 2의 좌우 양단에 나타난 고비저항대의 영상에 강조를 두어 배열하였다. LINE 2의 양단에 보이는 고비저항대의 영상은 LINE 2_A에서도 잘 이어지고 있고 LINE 2의 최대심도 125 m 까지 나타난 고비저항대는 LINE 2_A에서 200 m 심도까지 연장되고 있다. 또한 파쇄대의 폭도 심부로 갈수록 좁아지고 있음을 새롭게 알 수 있다. 이를 볼 때 쌍극자탐사자료의 수집에서 주 설계대로 측정을 마친 후 측선을 그대로 두고 전극을 한 개씩 뛰어 넘어 재측정하여 자료의 신뢰성을 확인하고 지하구조의 심부 연장성을 규명하는 것이 바람직하다고 본다.

측선 LINE 2에 나타난 파쇄대의 분포범위를 동서방향으로 정밀조사하기 위하여 LINE 2와 근접시켜 거의 나란한 방향으로 LINE 3을 설계하였다. 이 측선의 비저항값 양상 (그림 7a)도 전체적으로 볼 때 LINE 2의 자료와 같이 중앙부근에서 저비저

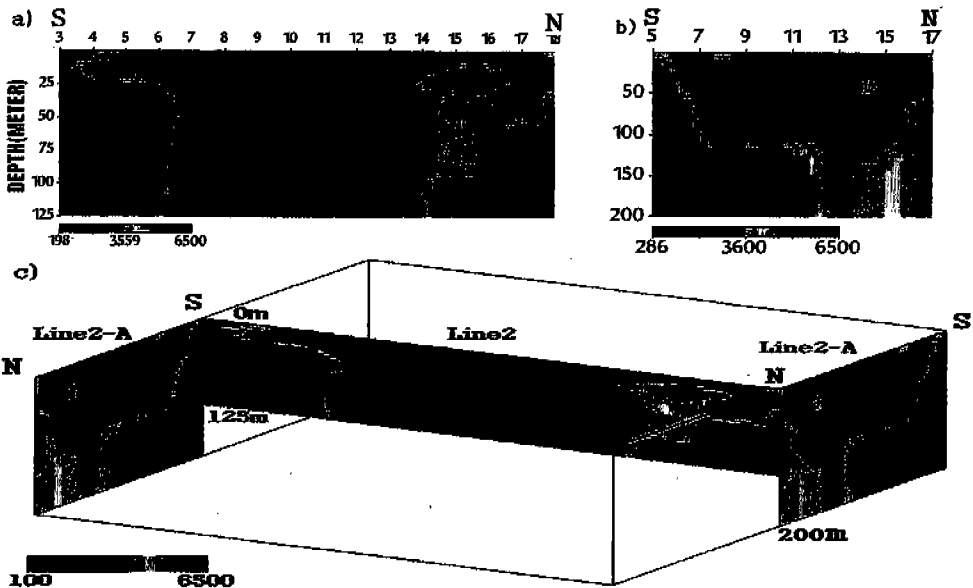


Fig. 6. Resistivity data for the LINE 2 (Unit : $ohm-m$): (a) resistivity structure for the LINE 2, (b) resistivity structure for the LINE 2_A, and (c) fence diagram for the LINE 2 - LINE2_A. The section for the LINE 2_A is schematically sutured with the both sides of LINE 2 for the correlation of the high - resistivity zone down to the depth of 200 m.

항대, 양단에 고비저항대를 보이고 있다. 특히 중앙부에서의 저비저항분포는 LINE 2의 경우와 잘 부합된다.

LINE 2와 LINE 3에 나타난 중앙의 파쇄대분포, LINE 1의 남동쪽, LINE 2 및 LINE 3의 남단에 보이는 고비저항대의 분포를 삼차원적으로 재건하기 위하여 세 축선 모두를 지나가도록 동서방향의 축선 LINE 4를 설계하였다. 현장자료단면도 (그림 7b)에서 보듯이 4,000 $ohm-m$ 내외의 고비저항분포는 축점번호 11의 동쪽에 심부 250m까지 연장되어 축선 LINE 1의 남동쪽에 보이는 분포범위와 잘 부합된다. 또한 LINE 2 및 LINE 3 와 교차하는 LINE 4의 지하구조 단면도는 교차부근에서의 저비저항값을 잘 나타내고 있어 파쇄대의 연장성을 정성적으로 확인할 수 있다.

하여 얻어진 결과를 사용하였다. 현장자료 및 역산 결과는 그림 8에 나타난 바와 같이 세로축은 겹보기 비저항을, 가로축은 전류전극 간격의 반(AB/2)을 나타내며, ●는 현장에서 얻어진 측정자료이고 ○는 1차원 모델을 가정한 자동역산에서 얻어진 이론해이다. 최대전류전극과 전위전극간격은 탐사심도를 고려하여 각각 250m, 15m 또는 500m, 25m로 하였고 각 전류전극간격에 따라 전위전극 간격을 상호 중복시켜 측정, 자료의 정확성을 기하였다. 역산은 보통 쓰이는 감쇠최소자승법 대신에 모든 탐사점자료들을 서로 상관 삼입(interpolation) 시켜 여러 층에 대한 정보를 얻을 목적으로 Smoothing 방법을 사용하여 비저항값이 부드럽게 변화하도록 하였다.

쌍극자축선 LINE 3와 LINE 4의 교점 주위에 위치한 수직탐사점 1은 다른 수직점자료에 비해 그 비저항값이 1,000 $ohm-m$ 이하로서 파쇄대가 심부까지 연장됨을 알 수 있고 (그림 8a) 이는 Fence Diagram (그림 10b)의 영상과 잘 부합된다. 수직점 2는 축선의 전개조건이 좋아 최대전류전극 간격을 1.0km로 하여 가탐심도를 500m가 되게 하였다. 심도 200m 이하에서 4,000 $ohm-m$ 이상의 값으로 나타나는 고비저항대 (그림 8b)는 쌍극자단면도 (그림 7a)의 축점번호 14에서의 양상과 정성적으로 부합된다. 수직탐사점 3, 4, 5, 6등도 모두 심도 약 100 - 150m 이하에서 비저항값이 급히 증가하고 있다.

천부 불균질대와 관련된 구조선의 탐지를 위하여 1개의 쌍극자탐사축선 (LINE 4)에 대하여 극저주파 전자탐사를 수행하였다. 송신원은 호주에서 송신하는 22.3kHz(NWC)를 사용하였으며 측정간격은 25m이고 축점수는 총 40점이다. 그림 9a에 현장자료의 동상(real)과 이상성분(imaginary component)을 도시하였다. 일반적으로 동상성분과 이상성분이 부호가 바뀌면서 0점을 통과하는 지점(zero crossing point)이 천부의 파쇄대를 의미한다.

현장자료에 나타난 반응값의 양상은 축선의 중앙을 기준으로 서쪽에 극부적인 파쇄대가 나타나고 있고 동쪽에는 영점통과점이 거의 없다. 이 현상은 쌍극자탐사 축선 LINE 4의 동쪽에 고비저항대의 치밀한 흑운도화강암이 천부에 존재한다는 해석과

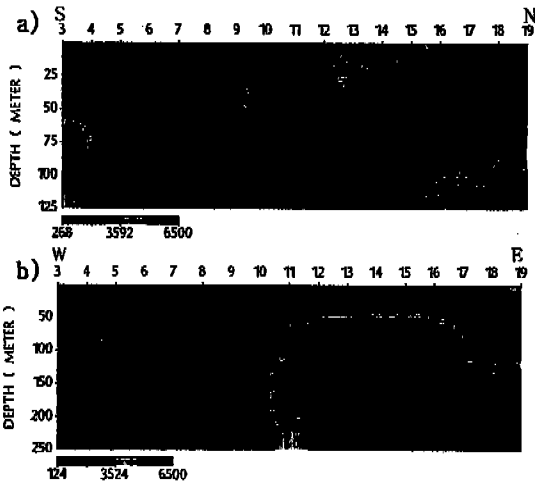


Fig. 7. Resistivity structure for the (a) LINE 3 and (b) LINE 4. (Unit : $ohm-m$).

슬럼비저배열 수직탐사 및 VLF 탐사

쌍극자축선에 대한 쌍극자탐사결과에 대한 보완과 정량적 해석을 위하여 탐사축선 위치도 (그림 4)에 나타난 바와 같이 4개의 쌍극자축선 주위에 분산된 총 8개의 축점에 대하여 슬럼비저배열 전기비저항 수직탐사를 수행하였다. 기본적인 해석은 지하를 수개의 수평 다층구조로 가정하고 각종의 두께와 전기비저항을 추정변수로 자동역산을 수행

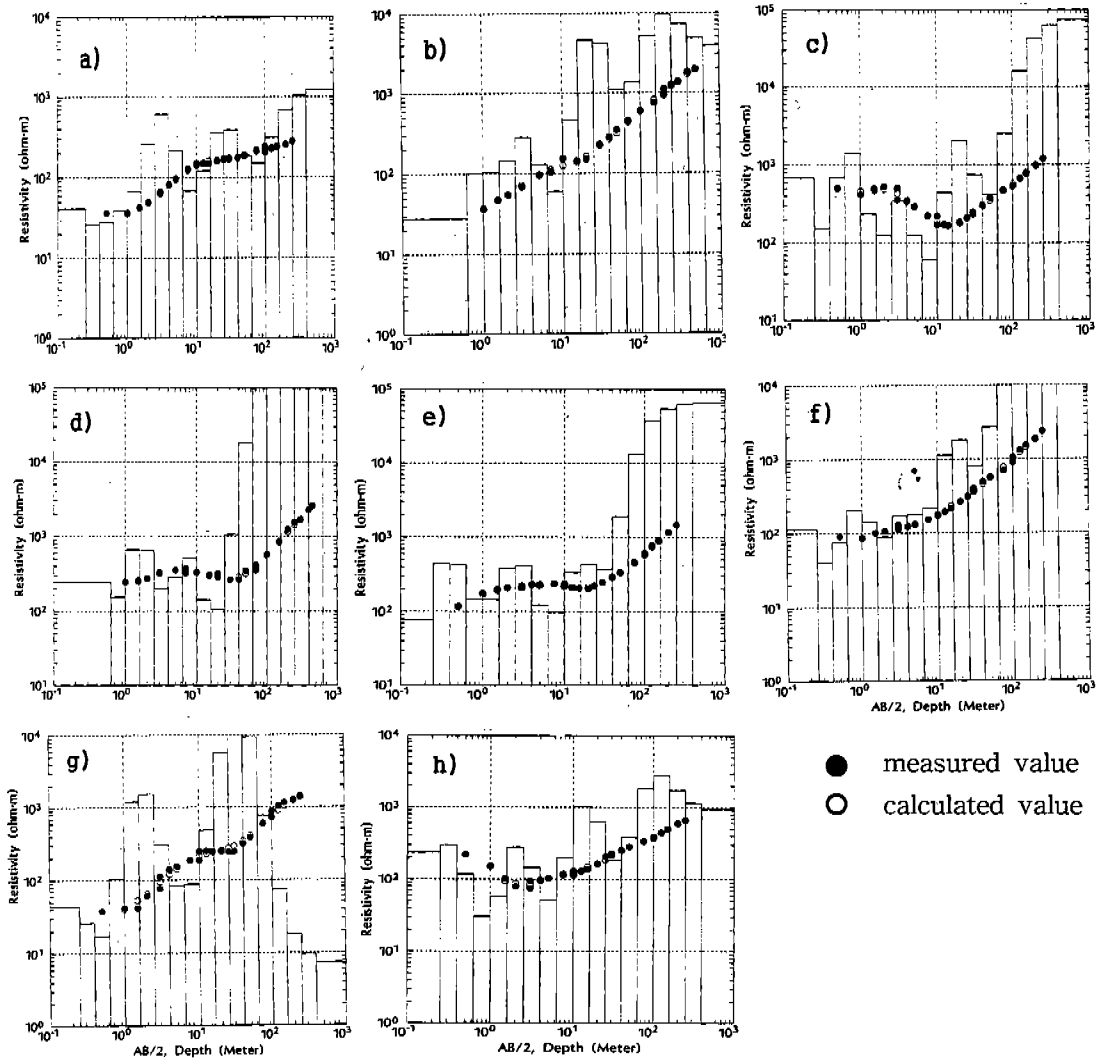


Fig. 8. Vertical sounding data for the points of (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7, and (h) 8. (Unit : $ohm - m$).

일치하고 있다. 또한 현장자료에 대한 동상성분의 그래프에 나타난 영점통과점은 대체로 쌍극자단면도의 고비저항대와 저비저항대의 경계선 (축점번호 11)부근과 일치한다. 이 양상은 쌍극자단면도에서 동쪽으로 흑운모화강암(고비저항대)이 천부까지 올라와 있고 중앙부에서 파쇄대(저비저항대)가 발달되어 있다는 해석과 잘 부합된다. 그림 9b의 등가 전류밀도(equivalent current density) 분포도에서

흑색 부분이 백색에 비해 전류밀도가 큰 매체라 볼 때 중앙부근은 상대적으로 전도성이 큰 부분으로 물성이 변화하는 암질의 경계에 해당되는 파쇄대를 해석하였다.

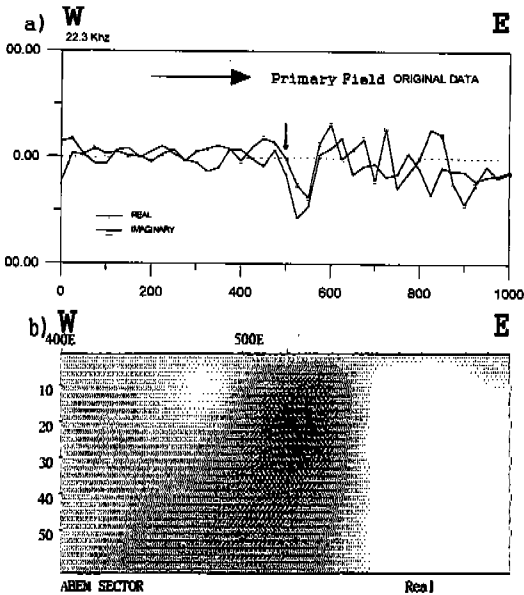


Fig. 9. VLF EM data for the LINE 4; (a) original data and (b) equivalent current density. The arrow represents a zero crossing point.

영상재건·통계분석

쌍극자자료의 합성단면도

4 축선의 해석결과 도출된 지하구조 비저항단면도를 자료구현 (data visualization) 소프트웨어의 하나인 IDL(Interactive Data Language, 1996)을 사용하여 삼차원적 지하구조 모형을 탐사축선 (그림 4) 기준으로 재건하였다. 그림 10a는 대상지역의 남동쪽에서 투영한 합성단면도로서 LINE 1 과 LINE 4의 고비저항대를 잘 일치시켜 주고 있으며 중앙부근에서 발달한 파쇄대의 공간분포를 잘 보여주고 있다. 그림 10b는 지역의 남서쪽에서 투영한 입체도로서 LINE 1의 서편-LINE 2-LINE 3으로 이어지는 고비저항대와 함께 LINE 4-LINE 1-LINE 2-LINE 3으로 연결되는 고비저항대에 대한 남서 방향의 경사를 보여준다.

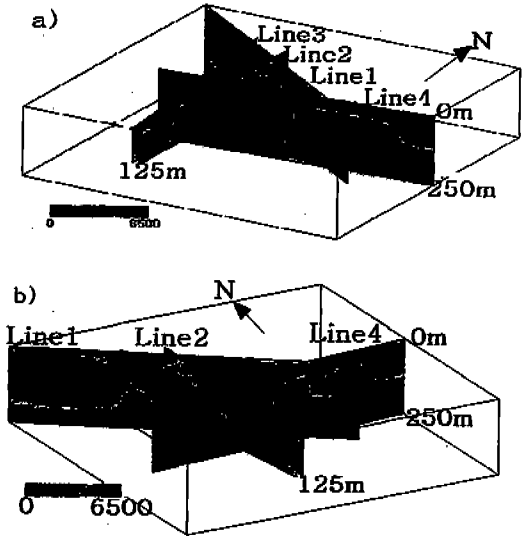


Fig. 10. Resistivity fence - diagram for the Samunri lines, projected toward (a) the northwest and (b) northeast direction. (Unit : $ohm - m$).

수직탐사자료 합성도

8개의 수직탐사점 역산결과에서 얻어진 심도별 비저항값을 수평적으로 서로 삽입(interpolation)시켜 0, 5, 20, 100, 300m 심도에서의 비저항분포도를 삼차원적으로 재건하여 보았다(그림 11). 심도 5m 까지 전반적으로 청색으로 보이다가 적색으로 채색되어 20m의 단면도에 보이기 시작하는 고비저항대는 간접적으로 풍화대의 깊이가 20m 이하에 존재함을 알려준다. 비저항값이 높은 부분은 주로 축선 LINE 1을 기준으로 북쪽에 분포하고 있으며 그 비저항값은 심도 100m에서 증가하다가 300m 층에서 매우 높은 값을 보여 주는데 이 양상들은 앞에 제시된 합성 단면도 (그림 10a,b)의 영상에서도 잘 나타나고 있다. 그림 10b에 나타난 북동방향의 고비저항대, 남서방향의 저비저항대도 삼차원 수직탐사자료 합성도 (그림 11)의 100m, 300m 층에서 그 양상이 잘 보이고 있다.

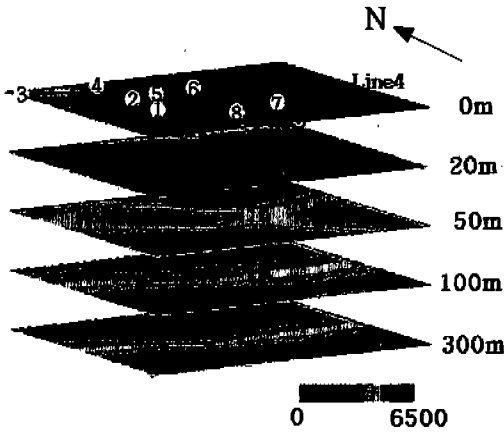


Fig. 11. Pseudosection constructed by inter- and extrapolation of vertical sounding data for the Samuri area. Dipole- and -dipole lines are shown for the reference with respect to the sounding points. (Unit : $ohm - m$).

화천리층 물성대비

월악산화강암체의 비저항값분포를 다른 지질환경에서 얻어진 자료와 비교·해석하기 위해 관입화강암체와 남서방향으로 인접한 화천리층을 대상으로 탐사를 수행하였다. 이 지역은 오도비스기 후기의 석회질 규산암이 전반적으로 분포하고 있으며 중생대 백악기에 불국사동의 월악산흑운모화강암으로 관입당하여 이 층에는 많은 대·소습곡이 형성되어 있으며 소규모의 단층도 존재하는 편이다. 따라서 그에 대한 전기비저항값도 월악산화강암체에 비하여 현저하게 낮을 것으로 예상되었다.

세 측선에 대한 쌍극자 배열 전기비저항 탐사는 모두 측정간격은 $a=50m$ 으로 하여 가탐심도를 250m가 되도록 하였다. 투입전류량은 100mA까지 가능하여 전극전개수를 $n=11$ 로 확대하여 측정하였다. 탐사측선은 측선전개가 용이한 지역을 고려하여 LINE 1, LINE 3는 남서-북동 및 북방향으로 설계하였고 LINE 2는 남서-북동 방향으로 전개하였으며 세 측선 모두 중앙부에서는 측선전개의 어려움 때문에 전개방향이 약간 수정되었다(그림 12a).

합성 단면도(그림 12b)에서 보면 대체로 중앙부에 저비저항대, 양단에 고비저항대가 분포한다. 기반암으로 추정되는 고비저항대는 공통적으로 심도 약 50m에서 나타나고 있으며 최고 비저항값도 $1,500 ohm - m$ 으로서 월악산화강암체의 $6,500 ohm - m$ 에 비해 상당히 낮게 나타나고 있다. 이는 일차적으로 본 지역의 지질·암석환경이 사문리의 흑운모화강암체에 비해 비저항값이 상대적으로 낮은 석회규산염암이라는 것에 기인하며 이차적으로는 화강암체의 관입등으로 인하여 본 지역에 많이 발달된 소규모의 단층·습곡의 영향으로 생각할 수 있다.

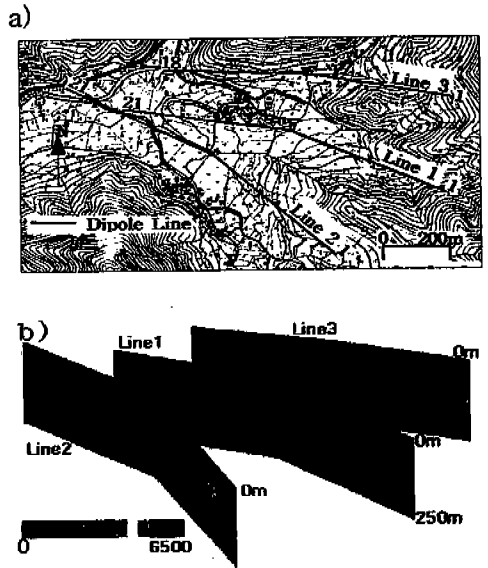


Fig. 12. (a) Survey lines for the Hwachunri formation and (b) resistivity fence - diagram (Unit : $ohm - m$).

영상단면도의 통계적 분석

비저항 단면도에 나타난 파쇄대는 주로 고비저항대와 저비저항대의 경계에 분포하는 점을 고려하여, 그 윤곽을 명확히 파악하고자 단면도 영상으로부터 세가지의 대표적인 통계 모멘트(moment), 즉 표준편차(standard deviation), 비대칭도(skewness), 첨도(kurtosis)분석을 시도하였다(Davis, 1986). 여기서는 해석단면도를 적합한 셀 크기로 나누어 셀

단위의 dots 분포에 대한 통계모멘트를 구하여 크기 별로 각 모멘트를 채색하였다.

통계 모멘트는 표준편차(standard deviation), $\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2 \right]^{1/2}$; 비대칭도(skewness), $\gamma = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)/\sigma \right]^3$; 첨도(kurtosis),

$$\beta = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)/\sigma \right]^4 \quad (\text{Mood et al., 1974})$$

의 관계식을 사용했으며 여기서 N 은 각 셀의 표본 크기, X_m 은 평균값이다.

비저항 단면도의 통계분석에서 한 지역의 영상 자료는 프로그램의 검증테스트를 거쳐 500*200 픽셀로 규격화하였으며 가로 25, 세로 10, 총 250개의 cell로 분할하였다. 따라서 각 모멘트 분석에 사용된 dots는 1 cell당 20*20 픽셀로 구성되어 있다. 통계분석에 입력된 비저항값은 절대 수치가 아니고 칼라영상 단위 (16 칼라 : 범위 0 - 15) 기준이다.

표준편차도(그림 13)에서 균질한 부분은 편차가 작은 청색으로 보이며 불균질한 부분은 표준편차가 큰 적색으로 나타나는데 이 적색띠는 흑운모화강암과 파쇄대의 비저항값의 큰 대비로 해석된다. 한편 화천리층의 석회규산염 자료(그림 14)는 상대적으

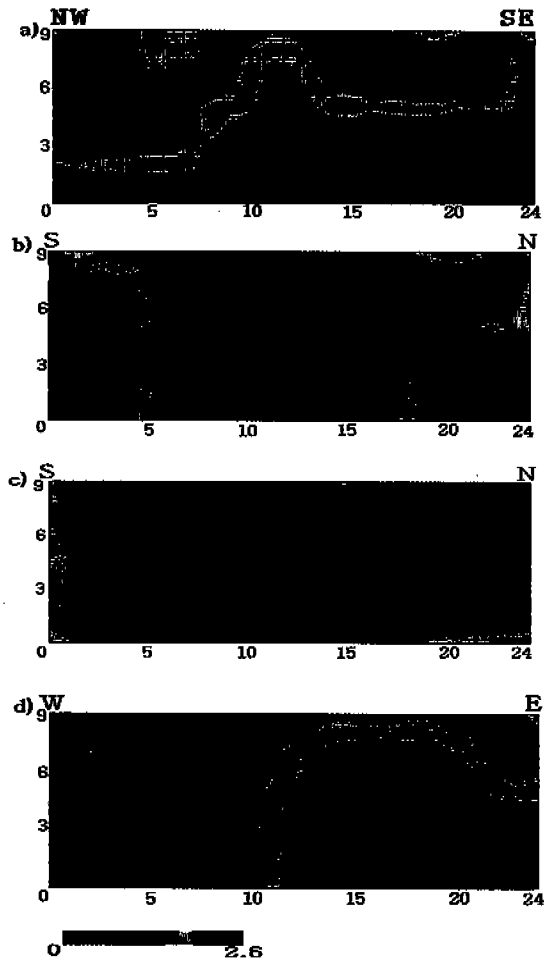


Fig. 13. Standard deviation plots for the Samunri lines; (a) LINE 1, (b) LINE 2, (c) LINE 3, and (d) LINE 4. These plots are well correlated to the resistivity structures (Figs. 5c, 6a, 7a,b). Each resistivity structure was gridded into 25 x 10 cells on which statistical analysis was performed.

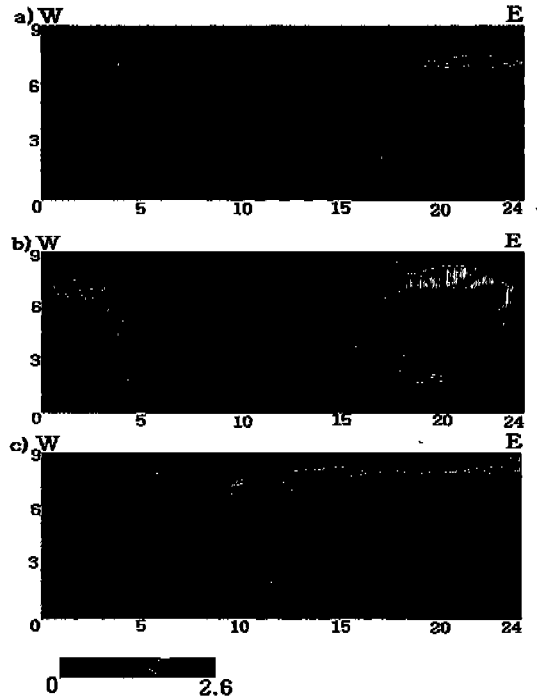


Fig. 14. Standard deviation plot for the Hwachunri lines; (a) LINE 1, (b) LINE 2, and (c) LINE 3. The plots are well correlated to the resistivity structures (Fig 12b).

로 그 경계면이 황색으로 분해능이 낮게 나타나는 데 이는 파쇄대의 비저항값 대비가 월악산화강암체에 비해 상대적으로 낮은 것에 기인한다. 비대칭도와 첨도의 영상 (그림 15)에서의 파쇄대는 표준

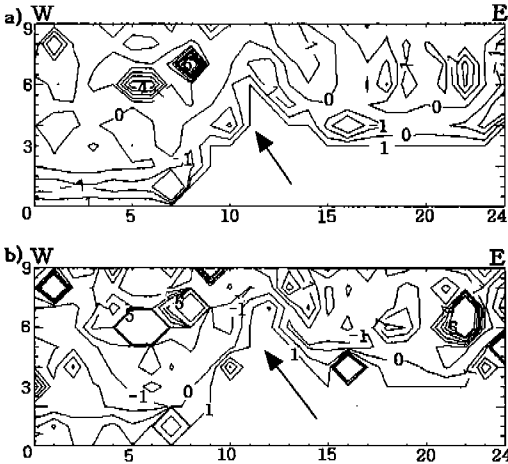


Fig. 15. Contour map of (a) skewness and (b) kurtosis for the LINE 1 of Samunri area.

Table 1. Statistical analysis on the Woraksan granite and Hwachunri limesilicate. (Unit : $ohm-m$). The values of skewness and kurtosis are calculated by the color image ranging from 0 to 15.

(사문리)	측선	평균	표준 편차	비대칭도	첨도
월악산 흑운모화강암	Line 1	4301	2355	-0.5	-1.4
		4952	1326	-0.1	-1.7
	Line 2	4807	1723	-0.3	-1.7
		4825	1524	-0.4	-1.2
	Line 3	4148	1605	0.1	-1.2
		5021	1048	-0.3	-0.8
	Line 4	3361	2666	0.1	-1.8
2843		2160	0.7	-1.0	
	평균	4282	1800		
(화천리)	Line 1	958	446	-0.2	-1.5
		561	336	0.7	-0.2
	Line 2	710	477	0.7	-1.1
		712	454	0.6	-1.0
	Line 3	699	416	0.6	-0.6
		407	317	0.4	-0.4
	평균	674	407		

편차도에 비해 분해능은 낮으나 그 경계면은 충실 히 그려지고 있다.

파쇄대를 중심으로 설정한 일정한 크기의 셀을 축선당 2개씩 설정하여 비저항값을 통계분석한 내용 (표 1)을 보면 월악산화강암체의 평균값은 4,282 $ohm-m$, 표준편차는 1,800 $ohm-m$ 이며 화천리층의 평균값은 674 $ohm-m$, 표준편차는 407 $ohm-m$ 으로 나타나 월악산화강암체와 파쇄대의 큰 대비현상이 통계분석에서 확인되고 있다. 비대칭도와 첨도는 암석환경에 관계없이 불규칙하게 나타나 그 특성을 구분하기 어려운데 이는 각 셀 안의 비저항값 분포가 대칭성이 없고 정규분포를 이루지 못하고 있음을 설명해준다.

결론

월악산화강암체와 그와 접촉하고 있는 화천리층에서 전기비저항탐사와 극저주파 전자탐사를 수행하여 얻은 결과와 자료처리·해석과정에서 얻은 점들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 월악산화강암체내에 국부적으로 발달한 파쇄대는 전기비저항 쌍극자탐사로서 규명이 잘 되었고 그 천부의 경계선은 극저주파 전자탐사자료와 잘 상관되었다.
- 2) 충북 충주시 상모면 사문리일대에 분포하는 월악산 흑운모화강암체의 고비저항값은 6,500 $ohm-m$ 에 이를 정도로 매우 높게 나타난 반면 관입화강암의 접촉부인 화천리의 석회규산염 암환경 자료에서 얻은 고비저항값은 약 1,500 $ohm-m$ 이다. 이 차이는 일차적으로 두 지역에 분포하는 암석의 종류에 기인하지만 화강암의 관입작용과 관련되어 화천리층에 많이 발달된 소규모의 습곡·단층의 영향으로 해석된다.
- 3) 전기비저항 쌍극자탐사자료에서 화강암체의 값에 비해 4-5배 정도 작은 저비저항대들의 영상이 작은 폭으로 100-125 여 m 깊이까지 연장된 점으로 볼 때 저반을 이루는 비교적 균질하고 치밀한 화강암체라 하여도 파쇄대 등의 불균질대가 심부까지 발달되어 있다고 생각한다.
- 4) 쌍극자비저항단면도의 해석에서 파쇄가 심한 부분은 저비저항대보다는 전기전도성이 급히 변화

하는 고비저항대와 저비저항대의 경계가 되는 선으로서 이는 극저주파 전자탐사자료의 영점 통과점과 잘 부합된다.

- 5) 불규칙한 파쇄대의 발달양상은 한 개의 축선에서 얻은 단면도로는 해석할 때 어려운 점이 많다. 따라서 합성단면도에서 투사각 변화를 주어 가며 파쇄대 및 고비저항대의 삼차원적 정보를 얻어 비저항값의 공간적인 분포양상을 효율적으로 해석할 수 있었다.
- 6) 수직탐사자료는 자료의 속성상 1차원자료의 한계성으로 해석에 무리가 따르므로 여러 수직탐사자료를 서로 내·외삽시켜 2차원의 층, 3차원적인 입체도를 재건하여 기존의 쌍극자탐사자료와 상관·비교하였다. 두 자료는 정량적으로는 차이가 있었으나 심도 및 위치에 따르는 비저항 변화의 양상은 대략 일치하였다.
- 7) 통계분석 영상에서 파쇄대는 큰 표준편차의 띠로 잘 나타났으며 옥운도화강암내의 파쇄대는 화천리층에 발달한 파쇄대보다 시각적으로 잘 나타났다. 반면 비대칭도와 침도 영상도에서 고·저비저항대는 명확히 구분되지 않지만 그 경계면은 상대적으로 잘 규명되어, 탄성파반사법에서 지층반사면이 영상화되는 효과가 비저항탐사 자료인 경우 통계분석으로 접근됨을 알 수 있었다.
- 8) 자료처리·해석과정중에 연구·개발된 참 비저항 단면도 (쌍극자탐사단면도, 수직탐사단면도)의 삼차원적 도시법을 더욱 확장하여 임의 경사방향의 조각면 (Slice)을 얻는다면 파쇄대 등에 대한 방향성을 시각적으로 파악할 수 있을 것으로 보인다.
- 9) 전기탐사, 극저주파 전자탐사로서 개괄적으로 규명된 화강암체내의 균열대는 고분해능 탄성파반사법으로 더욱 정밀 탐지될 것으로 보인다. 여기에서 추가적으로 얻어지는 밀도, 속도 등의 물성 정보는 옥천누층군과 대석회암층을 관입한 월악산화강암체의 접촉면성작용의 특성을 연구하는데 기본적인 자료가 될 것으로 보인다.

감 사

이 연구는 1995년 학술진흥재단 지원 자유공모

과제에 의해 수행되었으며 이에 감사드린다. 이 논문의 미흡한 점들을 자세히 지적하여 개선될 수 있도록 도움을 주신 김형수 박사께 감사드린다. 특히 탐사와 자료준비에 열심히 참여해 준 한수형군에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 김정호, 1987, 이차원 전기비저항 탐사자료의 역산, 공학박사 학위논문, 서울대학교.
- 김정호, 정승환, 조인기, 1989, 전기비저항 탐사자료의 평활화 제한을 한 2차원 자동역산, 한국자원연구소.
- 김형수, 이기화, 한정상, 1995, 난지도일대의 침출수 양태 조사를 위한 전기비저항탐사, 지질공학회지, 5, 259 - 276.
- 김호영, 박연준, 한공창, 박의섭, 1997, 천심도 질리암반 중에 굴착된 지하 냉장저장 공동의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 58 - 64.
- 나기창, 1986, 충북의 자연, 충청북도교육위원회.
- 송무영, 경제복, 1996, 울산단층 중부일대의 지구물리탐사 및 단층특성, 한국지구과학회, 205 - 212.
- 송영수, 오세영, 송승엽, 이상규, 1996, 제주도 서남부지역에서의 지열적 구조선파악을 위한 전기 및 전자탐사, 학술발표논문집, 한국자원공학회, 163 - 168.
- 이기화, 김형수, 1994, 제주도 해안지역의 전기비저항탐사, 지하수환경, 1, 51 - 58.
- 이상규, 이희순, 이태섭, 정호준, 1995, 누출 폐유로 인한 지하오염영역 탐지, 대한환경지질학회 제 28차 학술발표회 논문집, 대한환경지질학회.
- 주식회사 회송, 1996, Dipro 및 Soundpro 설명서.
- 한국지질도, 문경도폭, 1967, 국립지질조사소.
- 한국지질도, 황강리도폭, 1965, 국립지질조사소.
- Atlas Copco, 1992, ABEM WADI Manual.
- Almen, K - E., and Zellman, O., 1991, Aspo Hard Rock Laboratory. Field investigation methodology and instruments used in the pre - investigation phase : SKB Technical Report.
- Backblom, G., 1991, The Aspo HRL - a step

toward the Swedish final repository for high-level radioactive waste : Tunnel and Deep Space Tech., 6, 463 - 467.

Brown, A., Soonawala, N.M., 1989, Geology and geophysics of the Underground Research Laboratory site, Lac Du Bonet Batholith, Manitoba, Can. J. Earth Sci., 26, 404 - 425.

Davis, J.C., 1986, Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons.

IDL, 1996, Research Systems Inc.

Kim, J.S., Moon, W.M., Lohda, G., Serzu, M., 1994, Imaging of reflection seismic energy for mapping shallow fracture zones in crystalline rocks, Geophysics, 59, 5, 753 - 765.

Lee, I. H., 1994, Mesozoic granitic rocks in South Korea, especially on the Wolagsan granitic mass in the Ogcheon zone, Ph.D. thesis, Kumamoto Univ.

Mair, J.A., and Green, A.G., 1981, High resolution seismic reflection profiles reveal fracture zones within a homogeneous granite batholith : Nature, 294, 439 - 442.

Mood, A. M., Graybill, F.A., and Boes, D.C., 1974, Introduction to the theory of statistics, McGraw - Hill International.

Reedman, A.J., Fletcher, C.J.W., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., 1973, Geological, geophysical and geochemical investigation in the Hwangangni area, 1 - 118, 국립지질광물조사연구보고서, 국립지질광물연구소.

Ross, H.P., Mackelrang, C.E., and Wright, P.M., 1990, Dipole - dipole electrical resistivity surveys at waste disposal sites, in geotechnical and environmental geophysics, ed. by Ward, S.H., SEG, Vol. 2, 145 - 152.

Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, 2ed., Cambridge Univ. Press, New York.

김지수, 권일룡

충북대학교 지구환경과학과

361 - 763 충북 청주시 개신동 산48

Email : geop22 @cbucc. chungbuk. ac. kr

TEL : 0431)61 - 3201

0431)276 - 9645