

전기, 전자탐사에 의한 경주남부 (입실지역)의 울산단층 심부구조

손호웅* · 윤혜수** · 오진용***

Deep Structure of Ulsan Fault by Electric and EM Surveys in Ipsil Area, South of Kyeongju

Howoong Shon*, Hyesu Yun** and JinYong Oh***

ABSTRACT : Electric and electromagnetic surveys were conducted to investigate the deep structure of the Ulsan fault in Ipsil area, south of Kyeongju. On this study, especially high-frequency magnetotelluric (MT) method of electromagnetic survey in the frequency range of 10~100,000 Hz was mainly employed to study the deep subsurface configuration. High-frequency MT survey was performed at 70 points of spacing 30~50 m, making 3.8 km survey line. As a survey result, a 2-km-depth 2-D cross-section was achieved. It shows vertical and horizontal subsurface variations of resistivity values. Near-surface layer having low resistivity value becomes thicker eastward up to 800 m. There is a steep low resistivity zone in the west side of survey line, and there exists two low resistivity zones dipping west in the east side of survey line (malbang-ri and ipsil-ri). Two low resistivity zones are interpreted to be related to major movement pattern of the Ulsan fault. This suggests that major fault lines are developed on both peripheral sides of the broad fault zone.

서 언

한국 동남부의 제3기 분지는 서쪽으로 울산단층과 양산단층을 경계로 구분되어 있기 때문에 이들 구조선과 제3기 분지의 형성은 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다 (손문, 1998; 이동영 등, 1996; 이병주 등, 1996; 이봉주 등, 1996; 한중환 등, 1986, 1987, 1988, 1989). 지금까지 제3기 분지 자체에 관한 연구를 통하여 제3기 분지의 성인이나 모델에 관한 이론들은 다수 제기된 바 있다. 앞으로 제3기 분지의 보다 나은 이해를 위하여서는 제3기 분지 형성에 영향을 미친 분지외적 요인을 연구할 필요가 있으며, 이들 외부 요인 중 가장 중요한 대상은 울산단층

과 양산단층을 포함한 큰 구조선이다. 이들 구조선에 대한 연구는 지금까지 지질 구조적 관점에서 많이 시도되었으나 제3기 분지와와의 관계규명을 위한 자료축적은 미흡한 실정이다. 따라서 제3기 분지의 형성과 진화해석을 위하여서는 첫째는 두 단층에 대한 확실하고도 근원적인 자료가 필요하고 둘째는 이러한 관점을 가지고 이들 단층을 새로이 조명하는 것이 필수적이다.

포항에서 경주 울산지역에 분포하고있는 제3기 분지 지역과 이 부근 구조선에서 빈번한 지진활동이 보고되었다. 울산단층대에서는 지금까지의 이 지역의 지진 중에서 비교적 규모가 큰 지진 (M: 4.3; 97/06/26 03:50:23.19; 진앙지: 35°48.09', 129°14.20' <경주 동남부 5 Km>)이 기록되기도 하였다 (지헌철 등, 1997). 지진발생대는 이 지역의 구조운동을 이해하는데 중요한 뿐만 아니라 제3기 분지의 모델이나 형성 메커니즘 규명에 중요한 단초를 제공하며 (전명순 등, 1996), 역으로 제3기 분지의 구조운동 해석이나 구조선의 연구는 지진의 특성을 연구하는데 중요한 정보를 제공한다.

현재 지진의 발생지역은 제3기 분지 (양남분지)에 밀집되어 있는데 이는 제3기 분지의 구조운동과 지진활동은

* 배재대학교 토목건축공학부 토목환경공학전공 (Major of Geotechnical and Environmental Engineering, Division of Geotechnical and Architectural Engineering, Paichai University, Taejon, 302-735, Korea), E-mail: hshon@woonam.paichai.ac.kr

** 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea)

*** 충남대학교 기초과학연구소 (Research Institute of Basic Sciences, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea)

관련이 있다는 것을 시사하며, 이들 운동의 결과로서 울산 및 양산단층을 포함한 많은 구조선이 생겨났다고 판단한다. 따라서 이들 중요한 단층의 특성 규명은 제3기 분지에서 구조운동과 지진활동의 성질을 밝혀줄 것으로 기대되며, 나아가 분지형성 메커니즘과 모델설정에 도움을 줄 것으로 생각한다.

지금까지 이 지역의 구조선 연구에서는 주로 전기탐사 방법이 이용되었으나 (송무영 등, 1996; Lee, Um, 1992) 150여 m 깊이까지의 제한된 해석 심도로서는 지하 수 km까지 이르는 구조선의 전반적인 특성파악에는 한계가 있으며, 전기비저항탐사의 해석심도가 100 m 내외인 점을 감안하면, 넓은 지형적 단층대 내부에 특징적으로 발달하는 고하천수류 (paleochannel), 풍화대, 제4기 소단층 및 제4기층의 교란 (예: 슬라이딩) 등의 낮은 전기비저항대를 단층 파쇄대와 결부시킬 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 깊은 심도의 구조해석이 가능한 고주파수대역 자기지전류 (high-frequency Magnetotelluric) 탐사방법을 이용하여 지표에 국한된 구조선 조사의 영역을 방법론적으로 개선해보고자 하였다. 동일한 단층일지라도 그 특성은 지역적으로도 달라질 수 있기 때문에 대표적인 특성 파악을 위하여서는 지역적으로 다양한 지역을 선택하여 단층개관을 확보할 필요가 있다. 이러한 목적 아래 일차적으로 입실지역에서 울산단층의 양상을 연구하였으며, 이를 퇴적분지 형성사 및 지진활동을 이해하는데 기초자료로 제공하고자 한다.

이전 연구

울산단층은 한반도의 지진지체 구조분석에 관한 연구 (김옥준 등, 1980)에서 최초로 언급되었으며, 한국 남동부의 제3기 분포지역을 하나의 구조구로 보면서 제3기 구조의 서쪽 경계를 양산단층과 울산단층으로 하여 이들 두 개의 단층과 제3기 분지와와의 연관성을 간접적으로 시사하였다. 울산단층이 정식으로 정의, 명명, 보고된 된 것은 최현일 등 (1980)에 의하여 이루어졌는데, 울산단층은 양산단층 이전에 형성되었으며 단층의 수평이동은 단층대 양안의 지질로 보아 미미한 것으로 생각하였다. 그러나 김인수 등 (1992, 1997)은 울산단층을 백악기 중엽 Kula plate의 침하와 그 압축력에 의해 야기된 우향 주향 단층이며 북북동 방향 단층 (양산단층)의 conjugate fault로 간주하였다. 단층운동방향에 대한 논란은 지금까지 계속되고 있는데 대체로 동남 아시아 지역의 판구조운동의 결과로 나타난 우향 주향단층이라는 가설이 우세하나 수평이동을 지시하는 야외지질학적 증거는 없다.

울산단층의 연장 및 범위에 관한 연구는 주로 위성사진을 이용하고 있으며 구조적 연구는 야외 지질조사와 물리탐사에 의존하고 있다. 전기 및 항공자력 탐사자료 등 물리탐사자료에 근거한 울산단층 파쇄대의 깊이는 30~100여 m (Lee, Um, 1992)에서 최대깊이 1 km, 폭 3 km (Baag, Kang, 1994)로 해석되고 있다.

지질개요

한국 동남부의 제3기 분지는 서쪽으로 양산단층과 울산단층과 접하고 있다. 따라서 제3기 지층은 단층의 동쪽에만 분포하고 있는데 주로 육성 퇴적층, 화산암 및 해성 퇴적층으로 구성되어 있다. 제3기 지층들은 퇴적운동 전후, 또는 퇴적 동시성 구조운동으로 상당히 교란되어 지층분포와 연장이 제한적이거나 불연속적이다. 울산단층이 발달하고 있는 지역은 경상계의 신라통과 이를 관입하는 불국사 화강암류와 유천화산암 복합체로 구성되어 있다 (Fig. 1). 울산단층대의 동쪽에는 이들을 부정합으로 피복하는 제3기 화산암류와 퇴적암류가 넓게 분포하고 있다. 백악기 퇴적암류는 모량도폭 (김남장 등, 1971)에서는 대구층으로 울산도폭 (박양대 등, 1968)에서는 울산층으로 분류되어 있다. 유천화산암 복합체는 주로 결정질 응회암, 응결 응회암, 유문암 그리고 라필리 응회암으로 구성되어 있다. 화강암류들은 지금까지 대부분 백악기로 조사되었으나 최근의 K-Ar, Rb-Sr, Fission track 등의 방법에 의하여 제3기의 것도 상당수 차지하는 것으로 밝혀졌다. 토

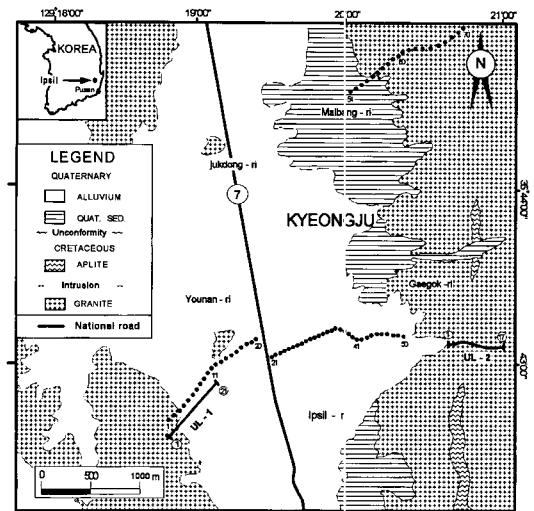


Fig. 1. Geological map with geophysical survey lines of high-frequency MT (closed circles) and dipole-dipole array electric resistivity (bold lines; UL-1, UL-2).

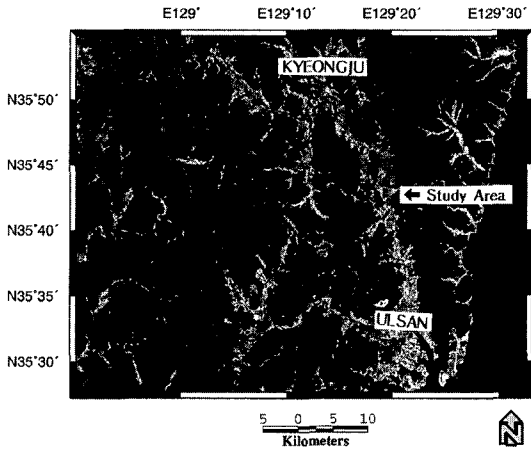


Fig. 2. Remote sensing image in study area.

합산 화강암의 나이를 47.6 Ma~50.0 Ma (이미정 등, 1995), 52.9~53.6 Ma (진명식 등, 1990)로, 양북면 효동리에 분포하는 화강암의 나이를 41.8 Ma와 42.1 Ma로 (진명식 등, 1991), 감포에 분포하는 것을 42 Ma 및 39 Ma (김근수 등, 1995)로 보고하고 있다. 울산단층대 직상부 (울산 화봉리지역의 울산분지)와 동부에는 이들 기저암을 제3기 화산암류와 퇴적암류가 덮고 있는데 화산암류는 주로 범곡리층군의 응회암으로 구성되어 있고 퇴적암류는 장기층군의 육성 쇄설성 퇴적암류로 구성되어 있다. 단층대 위에 발달하고 있는 울산분지의 퇴적층은 단층에 의해 교란되지 않아 적어도 이들 퇴적층 형성 이후에는 울산단층의 수평이동이 없었다는 것을 시사한다.

Fig. 2는 본 연구지역의 Landsat 인공위성 사진으로서, 단층에 의한 선구조 양상을 잘 보여주고 있으며, 흰 부분이 기존 연구에 의하여 정의된 울산단층대의 범위로서 (김옥준 등, 1980; 최현일 등, 1980), 단층에 의하여 지형적으로 풍화되고 침강된 부분이다.

연구방법

본 연구에서는 경주남부 입실지역에서 울산단층의 지하 심부 지질구조 탐사를 목적으로 전자(電磁; Electromagnetic) 탐사중의 하나인 high-frequency MT(高周波數帶域 磁氣地電流) 탐사 및 쌍극자배열 전기비저항탐사 등을 수행하였다. 쌍극자배열 전기비저항탐사는 본 연구에서 상대적으로 천부의 지질구조 조사 및 high-frequency MT 탐사결과와 비교하기 위하여 적용하였다. 본 연구에서는 기존의 자기지전류 (MT) 탐사(0.001~수십 KHz) 방법과는 달리 10~100,000 Hz의 상대적으로 높은 주파수대역의

지하정보를 취득하는 방법을 통하여 지하 2~3 km 내외의 심부 지질구조를 파악하고자 하였다.

EM 탐사

본 연구에서는 심부 지질구조를 밝히기 위하여 전자탐사 방법중의 하나인 high-frequency MT 탐사방법을 적용하였다. MT 탐사방법은 자연의 전자기장 변동을 source로 하여 지구내부의 전기전도도 구조를 탐사하는 방법이다 (Hermance, 1989; Telford *et al.*, 1976; Vozoff, 1991; Wait, 1962). 즉, 태양의 흑점활동과 관련된 전리층의 교란 및 뇌우 등으로 지구상에 자연적으로 존재하는 전자기장 (Wait, 1962)을 평면파 송신원으로 이용하여 지하의 전기 전도도 분포를 조사하는 주파수영역 전자탐사법의 일종으로서, 사용 주파수대역은 0.001 Hz에서 수 십 kHz에 이르는 심부 탐사방법 중의 하나이다 (Hermance, 1989; Telford *et al.*, 1976; Vozoff, 1991).

본 연구에서는 지형의 기복이 심한 한반도 지형에서 이동이 용이하며, 타 대륙에 비하여 높은 전기비저항값을 갖는 한반도 지질조건하에서 (Placky, 1987; Takakuru *et al.*, 1996; 조인기 등, 1993) 국내 탐사여건에 적합한 미국 Electromagnetic Instruments, Inc의 IMAGEM탐사 장비를 사용하였다. 이 장비는 기존의 MT탐사장비보다

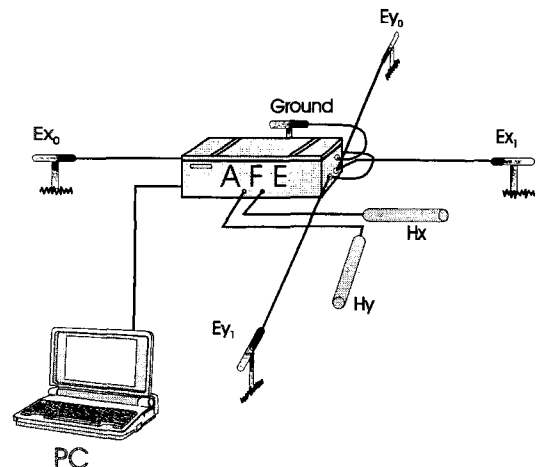


Fig. 3. Configuration of high-frequency MT field set-up. AFE (analog front end) is for amplifying, filtering and A/D converting. The electric fields are detected by measuring the differential voltage between two electrodes; between Exo and Ex1 for the x-direction electric field. The magnetic fields are detected with two perpendicular magnetic sensors; Hx is a magnetic sensor in the direction of x. PC is a notebook personal computer for data acquisition and digital signal processing.

주파수대역이 상대적으로 높은 10 Hz 100 kHz 대역의 탐사장비로서 측정방법은 MT와 거의 동일하다. 즉, 서로 직교하는 전기장 및 자기장 ((E_y, H_x) 및 (E_x, H_y))을 측정하여 (Fig. 3), 이로부터 임피던스(impedance; $Z=E/H$)를 계산하게 되는데, 측정하부의 전기비저항은 다음의 식과 같이 임피던스와 주파수의 함수가 된다. 즉,

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (2)$$

이며, 여기서 ω 는 각주파수(angular frequency), μ 는 투자율(magnetic permeability)이다. 한편, 전자파는 주파수에 따라 침투할 수 있는 심도, 즉 표피심도(表皮深度; skin depth)가 달라진다. 표피심도는

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \approx 500\sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m)} \quad (3)$$

의 식으로 주어지며, σ 는 전기전도도(electric conductivity), ρ 는 전기비저항(resistivity), f 는 사용 주파수(frequency)이다. 따라서 광대역 주파수에 대한 자료를 이용하여 측정 하부의 지하 전기비저항 분포를 해석하게 된다 (Hermance, 1989; Vozoff, 1991; Wait, 1962).

본 연구지역에서 high-frequency MT탐사를 위해 70개의 측정에서 측정을 하였다 (Fig. 1), 측정간격은 대체로 50 m가 되도록 하였고 경우에 따라 30 m간격도 있어 총 측정거리는 약 3.8 km가 된다. 측선은 크게 3부분으로 구성되어 있다. 경주-울산간 7번 국도를 중심으로 한 입실 서측부분 (측점 #1~#20)과 7번 국도 동측에서 입실리 지역까지의 중앙부(측점 #21~#50), 말방리에서 동쪽으로의 입실 동측부분(측점 #51~#70)으로 구성되어 있다. 이러한 측선의 구성은 주위의 전기적 잡음을 최소화하기 위해 설정되었으며, 특히 50번 측정 이후의 동쪽 측선은 주위의 전기고압선으로 연장이 불가능하여 현장의 지질 조사에 근거하여 측선연장의 시작을 말방리 지역에서 51번부터 시작하였다.

쌍극자 배열 전기비저항 탐사

쌍극자배열 전기비저항탐사는 본 연구에서 전자탐사에 비하여 상대적으로 천부의 지질구조 조사 및 전자탐사와의 결과비교를 위하여 적용하였다. 지하의 2차원 전기비저항 분포를 파악하기 위하여 본 연구 지역에서는 2개의 측선상에서 쌍극자배열을 이용한 전기비저항탐사를 실시하여, 자료처리를 하였다 (김정호, 1987; 손호웅 등, 1999). 측선은 전자탐사 측선의 서측부분 (UL-1)과 전자탐사에서 50번

측점 이후 탐사가 불가능하였던 동쪽으로의 연장선 (UL-2)에서 실시하였다. 두 측선모두 측정간격을 50 m로 하였으며, UL-1 측선은 측선길이가 1,000 m, UL-2 측선은 측선 길이가 800 m가 되도록 하였다 (Fig. 1).

탐사결과

High-frequency MT 탐사결과

본 연구지역인 입실지역의 high-frequency MT 탐사측선에서 얻어진 심도 2 km까지의 2차원 전기비저항치 분포는 Fig. 4a에서 볼 수 있듯이 수직적 변화 및 수평적 변화 모두를 보여 주고 있다. Fig. 4a는 탐사결과 얻어진 2차원 탐사단면도이며, 전기비저항치의 수평적, 수직적 분포상태를 용이하게 파악하기 위하여, Fig. 4b~Fig. 4d에서는 전기비저항치의 scale을 조절하였다. 즉, Fig. 4b에서는 최소값 100 ohm-m 이상, 최대값 1,000 ohm-m 이하로 scale을 조정하여 비저항값이 1,000 ohm-m 이하인 지역을 쉽게 확인하고자 하였다.

전기비저항치의 수평적 변화의 전반적인 특징은 측선의 서측지역에서는 상대적으로 높은 전기비저항치를 갖지만 측선의 동측인 말방리 지역에서는 낮은 전기비저항치를 보이고 있다 (Fig. 4a). 울산단층대에 해당하는 중앙부에서의 전기비저항치는 1000~5000 Ω m를 보인다. 이러한 수평변화의 경계는 측정 #12와 측정 #51 부근에서 현저하며, 대체로 전기비저항치 변화의 양상은 점진적이기보다는 다소 급격한 변화를 보이고 있다.

가장 뚜렷한 수직적인 변화는 <1000 Ω m의 낮은 전기비저항치의 천부층에서 관찰된다 (Fig. 4-C). 이 천부층의 두께는 측선의 동측에서는 <150 m이나 서쪽으로 갈수록 깊어지며 측선의 동측인 말방리 지역에서는 최대 800 m의 두께를 보인다. 그러나, 측정 #51~#60 부근의 200~500 m 깊이에는 소규모의 고비저항대가 분포한다.

낮은 전기비저항치의 천부층 하부에는 서쪽으로 경사진 2개의 저비저항대가 관찰된다 (Fig. 4a). 약 20°정도의 경사를 보이거나 천부 경사대보다는 심부경사대가 낮은 경사를 보인다. 이 경사 비저항대의 두께는 100 m (상부)~300 m (하부)를 갖는다.

쌍극자배열 전기비저항탐사 결과

2개의 쌍극자배열 전기비저항탐사 측선에 나타난 비저항치의 변화는 high-frequency MT탐사 결과와 유사하다. high-frequency MT 탐사측선의 서측 지역에 위치한

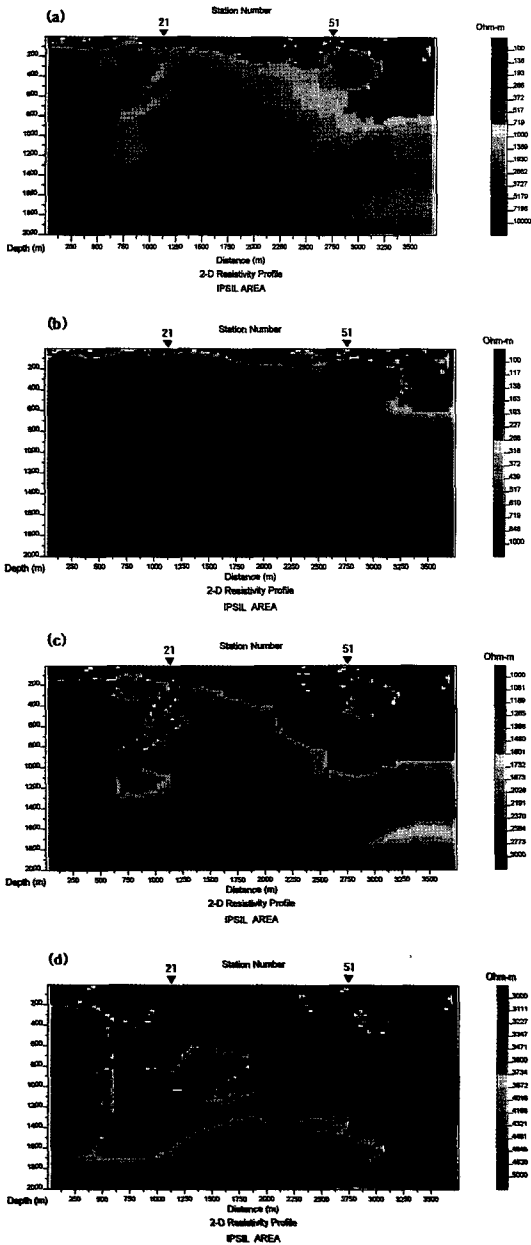


Fig. 4. Results of high-frequency MT prospecting with different color scales of resistivity value (a) original color scale between 100 and 10,000 Ωm , (b) color scale was adjusted between 100 and 1,000 Ωm which represents resistivity values below 100 Ωm are adjusted to 100 Ωm and over 1,000 Ωm to 1,000 Ωm ; color scale is represented the resistivity values between 100 and 1,000 Ωm , (c) color scale was adjusted between 1,000 and 3,000 Ωm , (d) color scale was adjusted between 3,000 and 5,000 Ωm .

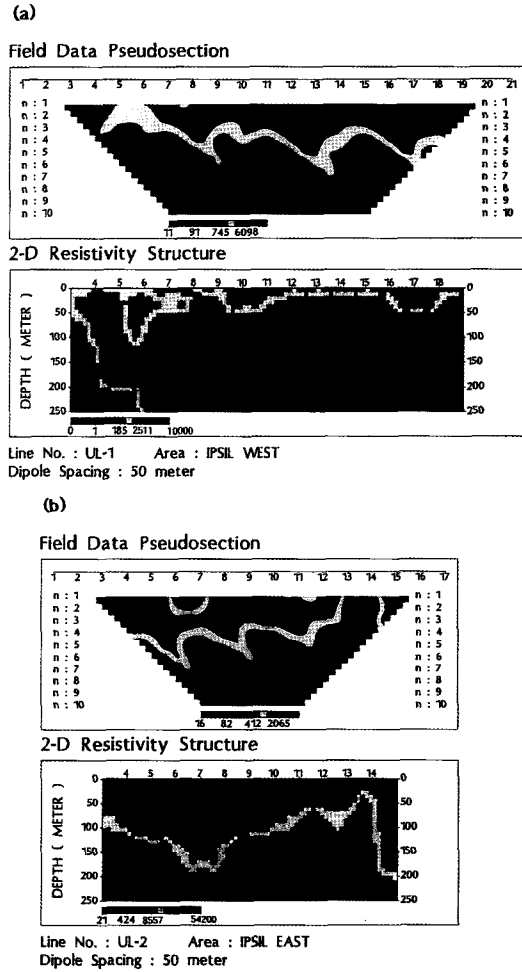


Fig. 5. Results of electric resistivity prospecting. (a) UL-1 line, (b) UL-2 line.

측선 UL-1에서는 high-frequency MT 탐사측선의 동측에 해당하는 측선 UL-2보다 전체적으로 높은 비저항치를 보이고 있다 (Fig. 5). 그리고, 낮은 비저항치를 보이는 천부층의 심도는 UL-1에서는 심도 약 50 m이나, UL-2에서는 약 100 m로서 동쪽으로 갈수록 깊어짐을 알 수 있다.

결과 및 해석

입실 high-frequency MT 측선에서 얻어진 결과에 근거한 개략적인 2차원 비저항 단면도 해석을 Fig. 6에 제시하였다. 가장 현저한 지하구조인 울산단층대, 측선 동측 (말방리 지역)의 저비저항대, 그리고 서쪽 경사의 저비저항대에 대한 해석을 제시한다.

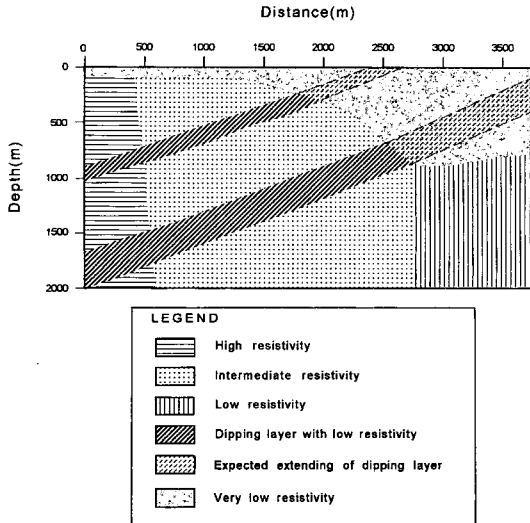


Fig. 6. 2-D subsurface interpretation based on high-frequency MT prospecting.

울산단층대

기존 연구에서 정의된 울산단층대는 본 연구지역인 입실지역 high-frequency MT측선의 측정점 #10~#48 사이에 해당한다 (김옥준 등, 1980; 최현일 등, 1980). 이 측선에서 나타난 울산단층대의 비저항치는 대체로 <5000 Ωm를 보인다. 울산단층대의 암상은 화강암으로 추정되며 국내 다른 화강암 지역과 비교할 때 이 전기비저항치는 비교적 낮은 값에 해당한다. 입실측선의 서단인 측정점 1~4 구간은 화강암 노두가 발달한 지역으로서, 그 심부는 >10000 Ωm의 고비저항치를 보인다 (Fig. 4).

울산단층대를 경계로 서측은 고비저항대, 동측은 저비저항대가 발달하고 있다. 이 경계는 전기비저항치의 급격한 수평적인 변화를 특징으로 한다. 울산단층대의 최상부는 <1000 Ωm의 저비저항치를 보이는데, 단층대의 서측에서는 <200 m의 두께를 보이나 단층대의 동측로 갈수록 그 심도가 깊어져 서쪽 경계에서는 약 800 m에 이른다. 따라서, 입실 지역의 기존 연구에 의해 정의된 울산단층대에서는 최상부의 낮은 전기비저항 (<1000 Ωm)층은 동쪽으로 갈수록 그 두께가 깊어지며, 2 km 심도까지 폭넓은 파쇄대가 발달되어 있다고 특징지을 수 있다.

측선 동측 파쇄대

입실 high-frequency MT측선의 동측, 즉 말방리 지역에 해당되는 부분으로서 전반적으로 1 km까지는 <1000 Ωm를 보이고 그 하부는 <3000 Ωm의 낮은 전기비저항

치를 갖는다. 이 지역은 제4기의 저각 역단층의 존재가 주장된 지역으로 여러 지구물리탐사가 이루어졌다 (송무영 등, 1996). 그러나, 기존의 물리탐사는 본 연구의 쌍극자 배열 전기비저항탐사 측선인 UL-2의 결과 (Fig. 5)에서와 같이 천부의 지질구조가 밝혀졌을 뿐이다. 동쪽 파쇄대의 존재는 인접한 울산단층대보다는 이 지역에서 새로운 단층활동이 활발했다는 증거로 생각한다. 입실 high-frequency MT측선의 동쪽 연장인 산사면에서의 야외 지질조사에서도 남북방향의 단층이 관찰되었는데, 이로부터 이 파쇄대의 동쪽방향으로의 연장 가능성이 제시된다.

서쪽경사의 저비저항대

입실 high-frequency MT 측선에서 관심을 끄는 결과는 서쪽으로 약 20°경사를 갖는 저비저항대의 존재이다 (Fig. 4a). 이 서경사의 낮은 전기비저항대는 high-frequency MT 측선의 서부인 높은 비저항치 구역에서 가장 뚜렷하게 관찰되며, 기존 정의의 울산단층대를 거쳐 동쪽 파쇄대와 연결된다고 해석한다. 구조적인 의미는 이들의 발달양상으로 보아 입실지역에서 가장 나중에 발달된 파쇄대로 판단한다. 따라서, 이 지역에서 알려진 소위 입실 단층과 관련된 단층활동은 이 서쪽경사의 저비저항대와 연계된다고 해석한다.

울산단층대 규모의 확대

기존 연구결과 정의된 울산단층대 (김옥준 등, 1980; 최현일 등, 1980)는 본 연구지역인 입실지역 high-frequency MT 측선의 측정점 #10~#48 사이에 해당하지만, 상기 연구결과 울산단층대는 이보다 동쪽 및 서쪽으로 확대되어야 되어야 하며, 울산단층대 양측에 주요 단층선 (서측의 거의 수직으로 발달한 파쇄대 와 측선 동측의 서쪽으로 경사하는 낮은 전기비저항대)이 발달하였음을 보여주고 있다. 한편, 측선 동측 (말방리 지역) 및 측선연장에 존재하는 거의 수직으로 발달한 파쇄대와 울산단층대와의 관계는 더욱 연구되어야 한다고 본다.

High-frequency MT와 전기탐사의 전기비저항치

High-frequency MT와 전기탐사 결과 나타난 전기비저항치는 동쪽지역은 낮고 서쪽지역은 높아 전체적으로는 비슷한 양상을 보이거나 그 절대값은 서로 다르다. 대체로 전기탐사에 의한 전기비저항치가 높게 나타난다. 이러한 이유는 역산(inversion) 방법의 차이 및 전기탐사의 역

산 깊이한계에 의한 것으로 판단된다 (Shima *et al.*, 1995, 손호웅 등, 1999).

사 사

본 연구는 학술진흥재단 기초과학연구소 연구지원 (BSRI-98-5419) 및 한국과학재단의 연구지원(98-0703-02-01-3)에 의해 이루어졌다. 본 연구를 위한 high-frequency MT 탐사장비인 IMAGEM의 유지 및 탐사자료 처리, 해석에 많은 도움을 준 미국 Electromagnetic Instruments, Inc.의 이송희 박사와 야의 지질조사에 많은 도움을 준 한국석유개발공사의 이성숙 박사 및 현장 물리 탐사에 도움을 준 배재대학교 대학원의 김태용 군에게 감사사를 표한다.

참고문헌

김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동 (1995) 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr연대. 지구과학회지, v. 16, p. 272-280.

김남장, 권영일, 진명식 (1971) 한국지질도 (1:50,000), 도량도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 19p.

김옥준, 정봉일, 엄상호, 장기홍, 박봉순, 강필중 (1980) 한반도의 지진지체 구조분석에 관한 연구. 과학기술처 연구보고서, 159p.

김인수 (1992) 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향 이동운동. 지질학회지, v. 25, p. 84-109.

김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김정진, 백인성 (1997) 경주-울산 일원에 대한 지역지질 특성연구: 울산단층주변 화강암류의 잔류자기와 대자율. 자원환경지질, v. 31, p. 31-43.

김정호 (1987) 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산. 서울대학교 박사학위 논문, 154p.

박양대, 윤형대 (1968) 한국지질도 (1:50,000), 울산 도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 20p.

손문 (1998) 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성 발달. 부산대학교 박사학위논문, 233p.

손호웅, 원경식, 이벽규, 송영수, 윤왕중 (1999) 전기비저항형상법. 시그마프레스 (in press).

송무영, 경재복 (1996) 울산단층 중부일대의 지구물리 탐사 및 단층특성. 한국지구과학회지, v. 17, no. 2, p. 205-212.

이동영의 19인 (1997) 한반도 지진활동 및 지각변형 연구 (양산단층지역대). 한국자원연구소 연구보고서 KR-97-(B)-1, 230p.

이미경, 이중익, 이민성 (1995) 경주지역의 A-형 알칼리장석 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, v. 31, p. 583-607.

이병주, 황재하, 박기화, 송교영, 최위찬 (1996) 양산단층의 특성에 관하여. 양산단층대 심포지움 및 학술답사 가이드 (한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관), p. 29-34.

이봉주, 최위찬 (1996) 한반도 동남부지역의 선구조선 분포 특성연구. 양산단층대 심포지움 및 학술답사 가이드 (한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관), p. 15-28.

전명순, 지현철, 전정수 (1996) 지역관측망에 의한 최근 경상분지의 지진활동. 양산단층대 심포지움 및 학술답사 가이드 (한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관), p. 35-48.

조인기, 송윤호, 정승환, 김정호, 전정수 (1993) 원거리 기준점 MT탐사: 전기, 전자탐사 연구. 한국자원연구소, KR-93-1G-7, p. 5-34.

지현철, 류창하, 신인철 (1997) 경상분지에서의 지진연구 (IV). 한국자원연구소 연구보고서, KR-97(C)-3.

진명식, 김성재, 신성천 (1990) K-Ar과 핏선트랙 연령측정에 의한 한국동남부지역 화강암류의 지열사와 냉각사연구. 한국동력자원연구소, KR-89-1C, p. 65-105.

진명식, 김성재, 신성천 (1991) 한국동남부지역 화강암류의 핏선트랙 및 K-Ar 연령: 화성활동사와 지체구조적 의의. 한국동력자원연구소, KR-90-1B-2, p. 57-98.

최현일, 오재호, 신성천, 양문렬 (1980) 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적 연구. 자원개발연구소 연구특보, v. 20, p. 5-33.

한중환, 광영훈, 손진담 (1986) 한국동남부지역 제3기 퇴적분지내의 지체 구조 발달 및 퇴적환경연구(I). 한국동력자원연구소, KR-86-(B)-8, 76p.

한중환, 광영훈, 손진담, 손병국 (1987) 한국동남부지역 제3기 퇴적분지내의 지체구조 발달 및 퇴적환경연구(II). 한국동력자원연구소, KR-86-2-(B)-4, 109p.

한중환, 광영훈, 손진담, 정대진, 손병국 (1988) 한국동남부지역 제3기 퇴적분지내의 지체구조 발달 및 퇴적환경연구(III). 한국동력자원연구소, KR-87-(B)-4, 75p.

한중환, 김홍열, 손병국, 이호석 등 (1989) 한국동남부지역 제3기 퇴적분지내의 지체구조 발달 및 퇴적환경연구(IV). 한국동력자원연구소, KT-88-(B)-8, 107p.

Baag, C.E., Kang, D.J. (1994) Geophysical studies on major faults in the Gyeongsang Basin: Aeromagnetic and radiometric data interpretation on the Ulsan fault. J. Geol. Soc. Korea, v.30, no. 2, p. 193-205.

Hermance, J.F. (1989) Magnetotelluric method. in James, D.E., The encyclopedia of solid earth geophysics, Van Nostrand Reinhold, p. 746-770.

Lee, K., Um, C.R. (1992) Geoelectric survey of the Ulsan fault: Geophysical studies on major faults in the Gyeongsang Basin. J. Geol. Soc. Korea, v.28, no. 1, p. 32-39.

Placky, G.J. (1987) Resistivity characteristics of geologic targets. in Nabighian, M.N., ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, Tulsa, Oklahoma, Soc. Expl. Geophys., v. 1, p. 53-129.

Shima, H., Kajima, J., Kamiya, H. (1995) Resistivity Image Profiling. 古今書院 (Japan), 206p.

Takakuru, S., Konishi, N., Nakamura, N., Takahashi, N., and Kikuchi, A. (1996) Helicopter electromagnetic and array CSAMT investigations of active faults in the northern region of the Awaji Island, Japan. Butsuri-Tansa, v. 49, p. 474-486.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A. (1976) Applied Geophysics. Cambridge Univ. Press.

Vozoff, K. (1991) The magnetotelluric method. in Nabighian, M.N., ed., Electromagnetic methods in applied geophysics, Tulsa, Oklahoma, Soc. Expl. Geophys., v. 2, p. 641-711.

Wait, J.R. (1962) Theory of magneto-telluric fields. J. Research, v. 66, no. 5, p. 509-541.