

## 경상남도 언양 및 봉계리 지역에서의 전기, 전자탐사에 의한 양산단층의 심부구조 연구

손호웅\* · 윤혜수\*\* · 오진용\*\*\*

### A Study on the Deep Structure of Yangsan Fault by Electric and Electromagnetic Surveys in Unyang and Bong-gye Areas, Kyeongnam Province, Korea

Howoong Shon\*, Hyesu Yun\*\* and Jinyong Oh\*\*\*

**ABSTRACT:** Electromagnetic and electric surveys were performed to reveal the deep structure of the Yangsan fault in the Bong-gye and Unyang areas, Kyeongnam Province, Korea. Especially, high-frequency magnetotelluric (HFMT) method of EM survey was mainly employed to study the deep subsurface configuration of Yangsan fault. HFMT survey was performed at 25 points of spacing 50 m, making 1.3 km survey line in Unyang area and 13 points of spacing 50 m, making 0.6 km survey line in Bong-gye area. Two 2-D cross-sections (Unyang and Bong-gye areas) were achieved as results. Electric survey by dipole-dipole array was performed to study the structure of shallow subsurface and compare the results with HFMT surveys. The results of HFMT and electric surveys show that Yangsan fault is a geologic boundary. It is very narrow and steep (about 80°), and extends to 1~1.5 km depth.

**Key words:** Yangsang Fault, electric survey, electromagnetic survey, HFMT survey, deep structure

**주요어:** 양산단층, 전기탐사, 전자탐사, 고주파 대역 자기지전류탐사, 심부구조

## 서론

한국 동남부의 제3기 분지는 울산단층과 양산단층을 경계로 동쪽에만 분포하고 있어, 이 두 단층은 제3기 분지의 성인과 관계가 있음을 시사하여주고 있다. 특히 제3기분지 중 포항분지와 양산단층과의 관계에 대해서 많이 언급되어 있으며 양산단층의 수평주향운동 (dextral strike-slip movement)이 포항분지 형성의 동인이 되었다는 설이 주류를 이루고 있다 (한중환 등, 1986,

1987, 1988, 1989; 김인수, 1985a, 1985b, 1992). 포항 분지의 형성에 관한 또 하나의 이론은 수평운동보다는 동해 수직침강운동의 일환으로 포항분지 역시 침강으로 인하여 형성된 분지라는 것이다 (Yoon and Kim, 1990). 그러나 이 역시 침강 경계선을 양산 단층으로 하는데는 의견을 같이하고 있어 포항분지 형성에서 양산단층의 관련성을 인정하고 있다. 포항분지 형성을 설명하는 어떤 이론이든 양산단층의 영향을 중요시하고는 있으나, 이 두 지질사건의 연계성 연구는 아직 시작 단계에 있다.

이 두 지질사건의 밀접한 관계로 보아 지금까지 제시되어 있는 포항분지의 형성이론의 진위나 포항분지에 대한 보다 나은 지질학적 이해를 위해서는 양산단층의 발달사 측면에서 포항분지를 조명하여보는 것이 필요하고, 역으로 양산단층의 실제규명을 위하여서도 포항분지 형성사 측면에서 양산단층을 생각해 보는 것이 필요하다. 이는 양산단층과 포항분지가 마이오세 동

\* 배재대학교 공과대학 토목환경공학과 (Department of Civil and Geotechnical Engineering, Paichai University, Daejeon, 302-735, Korea), E-mail: hshon@mail.paichai.ac.kr

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

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

안 일정기간 지사를 공유하였다면 상호영향을 미쳤을 것이고 이들 흔적은 양쪽에 남아 있을 것이기 때문이다.

본 논문은 한국의 제3기분지의 형성과 발달사 규명을 하고자 하는 목적아래, 울산단층에 이어 (손호용, 1999), 양산단층의 특성을 규명하고자 한다. 양산단층은 북북동-남남서 방향으로 발달한 양산단층의 외형적, 지구조적 특성은 지역에 따라 다양하게 나타난다. 단층 폭과 구조적인 특성에 의해 안강읍 단구리와, 울주군 봉계리를 경계로 북에서 남으로 북부, 중부, 남부 3 부분으로 나눌 수 있다. 안강 북쪽지역은 폭이 좁고, 안강에서 경주 사이는 넓으며, 그리고 봉계리에서 부산까지 다시 좁아진다. 이는 제3기와 접촉하고 있는 단층대는 넓고 그 이외의 부분은 좁다는 것으로 해석할 수 있어, 제3기층과 단층과의 관련성을 다시 한번 확인시켜주는 것으로 생각한다. 또한 단층의 지역에 따른 다양성은 양산단층의 역사가 비교적 복잡하고 한번의 단층운동에 의해 생긴 것이 아니라 몇 번의 운동이 겹쳐져 완성된 것이라고 볼 수 있다. 후속 단층운동의 강약과 종류는 지역에 따라 달라 질 수 있으므로, 최종 단층양상은 하나의 큰 골격 위에 세부적으로 다양한 모습으로 보일 수 있다. 따라서 지역에 따라 다양하며 지질시대에 따라 여러 겹으로 각인된 양산단층의 실제파악을 위하여서는 각 지역을 조사하여 서로 비교, 검토하여 가능한 시대별 단층운동을 밝혀야 한다. 그러나 현재의 지식수준은 단층의 파쇄대 진행 방향, 발달위치, 발달범위 (넓이 및 깊이), 발달양상, 단층면의 기하학적 모습 (geometry) 등과 같은 기본적인 사항에 대해서도 논란이 분분하다. 본 논문에서는 기본적인 것부터 확실히 하고자, 양산단층의 발달 양상과 특징에 따라 제3기분지와 접촉부분인 중앙부를 중부, 그 남쪽과 북쪽을 남부, 북부로 나누고 우선적으로 남부를 조사하기로 하였다. 이를 위하여 경상남도 안양과 봉계리를 대표지역으로 선정, 조사하여 (Figs. 1, 2, 3) 단층의 기본적인 모습을 밝혀 단층의 특징과 발달사 및 제3기분지와와의 관계를 규명하는데 일조하고자 한다.

지금까지 양산단층을 비롯한 여러 단층의 구조 및 파쇄대의 지구물리학적 연구에서는 주로 전기탐사 방법이 이용되었는데 (김영화, 1982, 1987; 김인수 등, 1983; 김종열, 1983; Kim and Lee, 1987, 1988; Lee *et al.*, 1984, 1985, 1992a, 1992b, 1997), 약 150 m 깊이까지의 제한된 해석심도로서는 지하 수 km까지 이르는 구조선의 전반적인 특성파악에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서 지구조 해석의 주요 수단으로 깊은

심도의 구조선 해석이 가능한 고주파대역 자기 지전류 (high-frequency magnetotellurics; HFMT)방법을 이용하여 지표에 국한된 구조선 조사의 영역을 방법론적으로 개선해보고자 하였다.

## 이전 연구

양산단층은 이민성 등 (1964)에 의해서 최초로 명명되었는데 이들은 양산도폭 작성시 지질분포를 근거로 N15°E 방향의 큰 구조선을 단층으로 추정하였다. 이 단층은 안양도폭을 위한 지질조사에서 지형적인 특징, 지질분포 및 단층각력 등으로 인하여, 이윤종 등 (1972)에 의해서도 인지되었는데, 이들은 이를 안양단층으로 명명하였으며 조사도폭 남북으로 연장된다고 하였다. 1980년대에 접어들면서 양산단층 주변의 지진활동을 근거로 일부 학자들 사이에 단층의 활성여부가 문제가 되었다 (김성균 등, 1984a, 1984b; 김옥준 등, 1980; 이기화, 1985; 전명순 등, 1996; Lee *et al.*, 1983, 1986, 1991). 지금까지 양산단층에 대한 연구들은 주로 단층종류, 어긋난 간격 (fault displacement), 연장길이, 단층구조, 활동성, 운동특성 및 분절화 등 현상적인 문제에 집중되어 있으며 형성시기, 단층발달사 및 지구조적 영향 등의 성인적 측면에서의 양산단층 연구는 비교적 미미한 편이다.

양산단층의 길이는 동해까지 연장되는 광역적인 선구조의 일부로서, 그 연장성이 매우 좋다는 견해 (Lee *et al.*, 1984; 김종환 등, 1976; 원종관 등 1978; Kang 1979a, b; 최현일 등, 1980)가 주를 이루고 있으며, 실제 야외관찰에 의하면 그 발달상태가 북으로 가면서 단층대 폭과 함께 점차 소멸한다는 견해 (채병곤 등, 1994)가 있다. 이러한 연장성의 조사는 위성사진 판독, 해양 탄성파탐사, 육상 물리탐사 및 지질조사에 의한 단층파쇄대 조사로 확인될 수 있는데 실제 이러한 목적으로 다수의 전기탐사가 수행되었다 (Lee *et al.*, 1985, 1999; 김영화, 1987; Kim and Lee, 1988; 김인수 등, 1983). 특히, Kim and Lee (1988)는 안양지역 전기비저항탐사를 근거로 양산단층이 고각도 서쪽경사를 가진다고 하였다. 이들 연구의 대부분은 전기비저항탐사에 의한 파쇄대의 수직, 수평발달상황을 통한 단층의 윤곽 파악인데 여기에서 고려되어야 할 사항은 연구방법의 제한성이다. 상기한 연구에서의 전기비저항탐사의 해석심도가 대개 100 m 내외인 점을 감안하면, 넓은 지형적 단층대 내부에 특징적으로 발달하는 고하천수류 (paleochannel), 풍화깊이, 제4기

소단층 및 제4기 층의 교란 (예 : 슬라이딩) 등의 낮은 전기비저항대를 단층 파쇄대와 결부시킬 가능성이 있다.

양산단층의 운동에 관한 견해로서는 주향이동단층 (엄상호 등, 1983; Lee *et al.*, 1984, 1985, 1986; 장기홍, 1990), 경사단층 (이민성과 강필중, 1964; 이윤종과 이인기, 1972; 손치무 등, 1978) 및 회전단층 (Pivotal fault; 최현일 등, 1980) 등이 있는데 대체적으로 주로 지질분포해석에 바탕을 둔 우수향주향이동 견해가 우세하다. 이들 결과는 최근 경상분지 혹은 양산단층을 대상으로 한 지구조 응력장 해석이나 양산단층 운동시의 응력복원을 통한 연구결과에서도 확인된 것으로 나타났다 (Hwang and Angelier, 1992; 황재하, 1994; 이준동 등, 1993; 채병근 등, 1994). 그러나 지금까지의 연구들은 선택된 지역, 자료 및 방법론에 근거를 두고 있어 단순 우수향이동이란 견해에 의의가 있을 수 있는데, 실제로 세부적으로는 다중변형작용 (multiple deformation)에 의한 것이라는 견해가 최근 제기되었다 (Lee and Jin, 1991; 장태우 등, 1993). 양산단층의 분절 (segmentation)도 이러한 측면에서 논의되었는데 실제로 다양한 양산단층의 모습은 시대차와 다양한 작용 메커니즘에 따른 다중변형작용에 의한 것이라는 것을 시사한다.

양산단층의 운동시기는 지질분포와 암체의 절단관계로부터 백악기 이후 (김종환 등, 1976; 원종관 등, 1978)부터 시작하여古 제3기초 (원종관 등, 1978) 혹은 新 제3기 (Choi and Park, 1985)까지도 보았다. 장기홍 등 (1990)은 양산단층이 불국사 관입암 및 곡강동 유문암류를 절단하고 있으므로 화성암의 관입시기 (44.7 ma)인 에오신 중기 직후로 보았다. 최근 양산단층운동과 맥을 같이 하는 광화작용과 그 절대 연령 측정치를 근거로 김상중 등 (1996)은 양산단층의 최소나이를 45 ma로 추정하였다. 그러나 이와 같은 결과는 양산단층이 시차 다중변형작용에 의한 것일 때, 최후의 운동시기만을 제시하여 최소나이 (minimum geologic age)를 의미하므로, 최초의 운동시기는 여전히 미정으로 남는다.

**야외조사와 지역지질**

저자들의 야외조사와 언양 도폭조사 (이윤종 등, 1972)에 의하면 언양, 봉계리 지역은 주로 백악기 경상계의 퇴적암인 대구층과 역시 백악기의 화성암인 주산 안산암질 화산암, 그리고 이를 관입하는 언양 화강암

으로 구성되어 있다. 퇴적암과 화성암은 북북동-남남서 방향의 양산단층으로 일직선으로 절단되어 전자는 단층의 동쪽에, 후자는 서쪽에 분포하고 있다.

양산단층에 의하여 경상계 불국사통의 언양화강암이 절단된 것으로 보아 단층의 나이는 화강암 관입시기 이후인 것으로 간주된다. 특이한 사실은 화강암보다 하부이며 이에 의해 관입당한 안산암중 일부가 오히려 단층에 의해 절단되지 않은 채 언양면 방곡리에 노출되어 논란이 되고 있다. 여기에서 추정해볼 수 있는 것은 안산암이나 화강암 모두 층서적으로 단일한 것이 아니라 형성시기를 달리하는 여러 시대의 암체로 구성되었다는 것이다

본 연구에서는 지질조사 결과 양산단층선 상에 있는 경상남도 언양 및 봉계리의 두 지역에서 양산단층의 심부 지질구조 조사를 위한 물리탐사를 실시하였다. Fig. 1의 언양지역은 Fig. 2에 지질도 및 탐사축선을 함께 표시하였다. 언양지역의 행정구역은 경상남도 울주군 두서면 인보리, 두동면 삼정리에 위치하고 있다. 또한, Fig. 1의 봉계리 지역으로 표시된 연구지역은

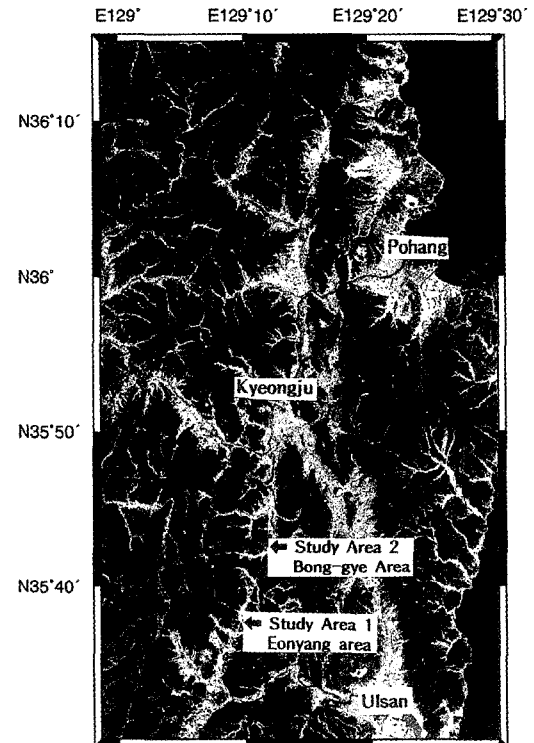


Fig. 1. Remote sensing image in study areas.

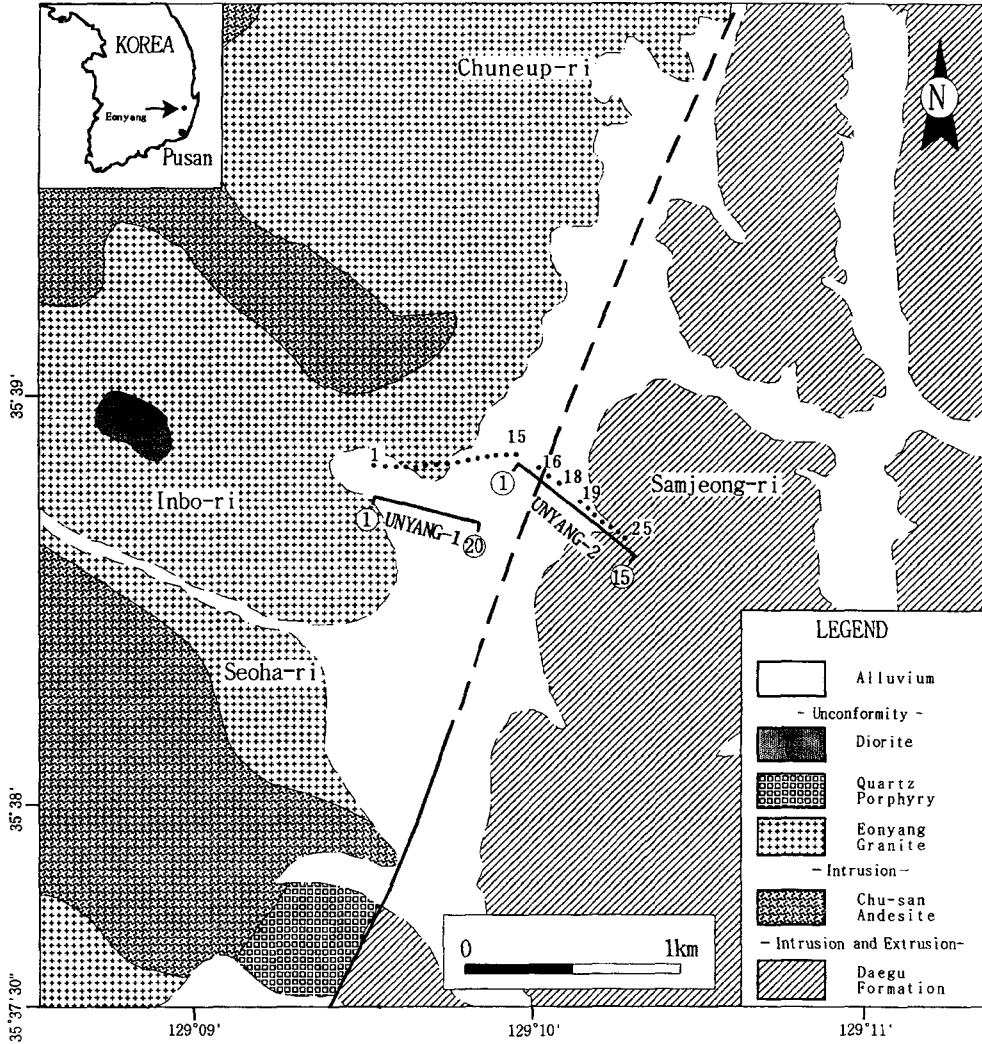


Fig. 2. Geological map in Unyang area with geophysical survey lines of HFMT (closed circles) and DC electric resistivity (bold lines; UNYANG-1, UNYANG-2).

Fig. 3에 지질도 및 탐사측선을 함께 표시하였다. 봉계리 지역은 언양지역에서 북으로 약 7.5 km떨어진 곳에 위치하고 있으며, 행정구역은 경상남도 울주군 두서면 활천리에 위치하고 있다.

야외조사 (Figs. 2, 3)와 위성사진 (Fig. 1)에서 확인된 날카롭고 좁은 단층면과 파쇄대, 직선상의 단층발달, 긴 구간에 걸쳐 나타나는 단층발달상황, 단층 좌우의 급격한 암상 변화 같은 지질 및 지질구조는 전형적인 수직 또는 고각도 단층면을 가진 수평이동단층 (Figs. 8, 12)특징이며, 이것은 물리탐사 결과와도 잘 일치한다.

### 연구방법

양산단층 중 남부를 우선 조사하기 위하여 경상남도 언양과 봉계리를 대표지역으로 선정, 조사하여 (Figs. 1, 2, 3) 단층의 기본적인 모습을 밝혀 단층의 특징과 발달사 및 제3기분지의 형성사 및 그 관계를 규명하는데 일조하고자 하였다. 본 연구에서는 지질조사 결과 양산단층선 상에 있는 경상남도 언양지역 및 봉계리 지역의 두 곳에서 양산단층의 지하심부 지질구조 탐사를 목적으로 전자 (電磁; Electromagnetic; EM) 탐사 중의 하나인 고주파대역 자기 지전류탐사 (高周波帶域

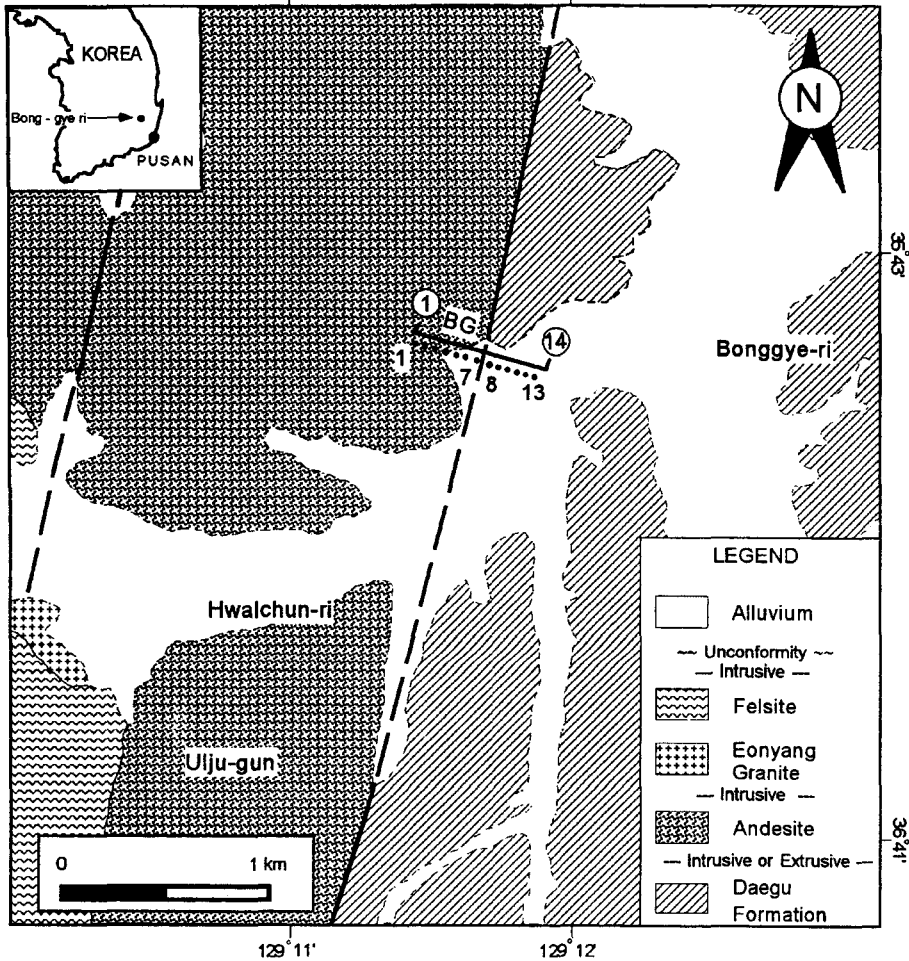


Fig. 3. Geological map in Bong-gye area with geophysical survey lines of HFMT (closed circles) and DC electric resistivity (bold lines; BG).

磁氣地電流; high frequency magnetotellurics; HFMT)를 주요 탐사방법으로 활용하였으며, 쌍극자배열 전기 비저항탐사를 별도로 수행하여 상대적으로 천부의 지질구조 조사 및 HFMT탐사와의 결과비교와 지구구조 해석에 보조적으로 활용하였다.

본 연구에서는 주파수 대역이 0.001 Hz~수십 kHz인 기존의 자기 지전류탐사와는 달리 10~100,000 Hz의 상대적으로 높은 주파수대역의 지하정보를 취득하는 방법을 통하여 지하 2 km 내외의 심부 지질구조를 파악하고자 하였다.

전자 (電磁) 탐사

본 연구에서는 심부 지질구조를 밝히기 위하여 전자

탐사 방법중의 하나인 HFMT탐사방법을 적용하였다. 자기 지전류 (MT) 탐사방법은 자연 전자장 변동을 에너지 원(源)으로 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 전기전도도 분포를 조사하는 주파수대역 전자탐사법의 일종으로서, 사용 주파수대역은 0.001 Hz에서 수 십 kHz에 이르는 심부 탐사방법 중의 하나이다 (손호웅 등, 1999, 2000a, 2000b; Hermance, 1989; Telford *et al.*, 1976; Vozoff, 1991).

본 연구에서는 지형의 기복이 심한 한반도 지형에서

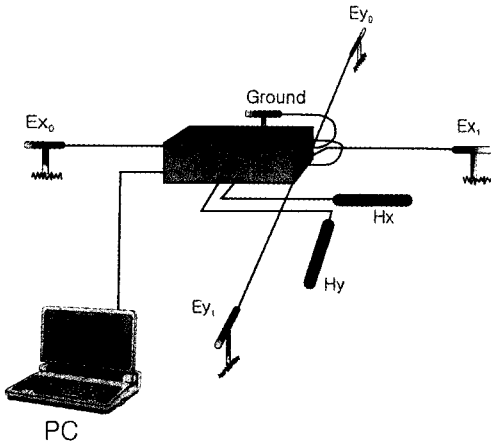


Fig. 4. Configuration of HFMT field set-up. AFE (analog front end) is for amplifying, filtering and A/D converting. The electric fields are detected by measuring the differential voltage between two electrodes; between Ex0 and Ex1 for the x-direction electric field. The magnetic fields are detected with 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.

이동성이 용이하며, 높은 전기비저항값을 갖는 한반도 지질조건하에서 (Placky, 1987; Takakuru *et al.*, 1996; 조인기 등, 1993) 탐사여건에 적합한 미국 Electro-magnetic Instruments, Inc.의 IMAGEM 탐사장비를 사용하였으며 (Nichols *et al.*, 1994), 주파수대역은 10 Hz 100 kHz 으로서 기존의 일반 MT탐사장비보다 상대적으로 높은 주파수대역을 갖는 탐사장비이며 측정 방법은 MT와 거의 동일하다. 즉, 서로 직교하는 전기장 및 자기장 (( $E_y$ ,  $H_x$ ) 및 ( $E_x$ ,  $H_y$ ))을 측정하여 (Fig. 4), 이로부터 임피던스 ( $Z=E/H$ )를 계산하게 되는데, 측정하부의 전기비저항은 다음의 식과 같이 임피던스와 주파수의 함수가 된다. 즉,

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \tag{2}$$

이며, 여기서  $\omega$ 는 각주파수 (angular frequency),  $\mu$ 는 투자율 (magnetic permeability)이다. 한편, 전자파는 주파수에 따라 침투할 수 있는 심도, 즉 표피심도 (skin depth)가 달라진다. 표피심도는

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \tag{3}$$

의 식으로 주어지며,  $\sigma$ 는 전기전도도 (electric con-

ductivity),  $\rho$ 는 전기비저항 (resistivity),  $f$ 는 사용 주파수 (frequency)이다. 따라서 광대역 주파수에 대한 자료를 이용하여 측정 하부의 전기비저항분포를 해석하게 된다 (손호용 등, 1999, 2000a, 2000b; Hermance, 1989; Ryang *et al.*, 1999; Vozoff, 1991; Wait, 1962).

본 연구지역에서 HFMT탐사를 두 지역에서 실시하였다. 언양지역에서는 25개의 측정에서 약 50 m간격으로 탐사를 실시하여, 총 1,300 m에 대하여 탐사를 실시하였다 (Fig. 2). 봉계리 지역에서는 13개의 측정에서 측정을 하였다 (Fig. 3). 측정간격은 50 m로서 총 측선길이는 600 m가 된다. 측선은 지질조사에 의하여 단층선에 수직하게 하여 물리탐사를 수행하였다.

### 쌍극자배열 전기비저항탐사

쌍극자배열 전기비저항탐사는 본 연구에서 전자탐사에 비하여 상대적으로 천부의 2차원 지질구조 조사 및 전자탐사와의 결과비교를 위하여 실시하였다. 지하의 2차원 전기비저항 분포를 파악하기 위하여 언양지역에서는 두 개의 측선 (UNYANG-1, UNYANG-2)에서 실시하였다 (Fig. 2). UNYANG-1측선은 양산단층 서쪽의 언양화강암층에서 실시하였으며, UNYANG-2측선은 양산단층에 직교하도록 측선을 설치하여 측정하였다. UNYANG-1은 측정간격이 25 m로서 측선길이가 500 m이며, UNYANG-2의 측정간격은 50 m이며 측선 길이는 700 m이다. 봉계리 지역에서는 1개의 측선 (BG)에서 실시하였으며 (Fig. 3), 이 측선은 HFMT 탐사측선과 일치한다. BG측선의 측선길이는 650 m이다.

### 탐사결과

#### 언양지역

언양의 연구지역은 양산단층대로서 좁은 단층폭을 가지고 있는 지역이다 (Figs. 1, 2). 이 지역 단층의 특징은 주 단층이 단층대의 가운데 발달하고 거의 수직에 가까운 동측 경사를 갖고 있으며 (Fig. 8), 이 단층선은 지질경계면이기도 하다 (Figs. 2, 8). 이로 미루어 이 단층은 수평이동으로 생긴 것으로 판단된다.

#### ① HFMT 탐사결과

약 50 m간격으로 HFMT 탐사를 실시하였다 (Fig. 2). Fig. 5(a)는 단층선의 좌측에서의 탐사결과와 한 예로서 4번 측정의 취득결과이며, Fig. 5(b)는 단층선의

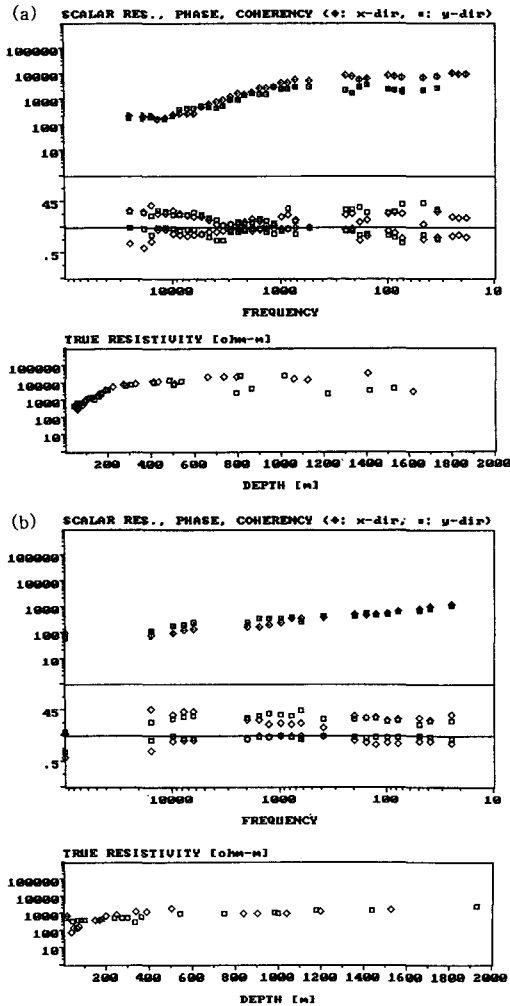


Fig. 5. 1-D analysis of apparent resistivity, phase, coherency and true resistivity from the above. ◆ and ■ represent TE and TM, respectively: (a) 1-D data of measuring point #4, and (b) 1-D data of measuring point #22 of HFMT survey line in Eonyang area.

우측에서의 탐사결과에 한 예로서 22번 측정점의 취득결과이다. Fig. 5의 그림은 4개로 구성되어 있으며, 위로부터 겹보기 비저항값, 위상차, 상관계수값 및 진비저항값을 보여주고 있다. Fig. 5의 (a)와 (b)의 결과는 단층선을 중심으로 비저항값의 차이를 보여주고 있다. 즉, 단층선의 우측에서 보다 낮은 비저항값을 보여주고 있다. 한편, 단층선을 중심으로 TM과 TE의 역전을 관찰할 수 있으며, 이는 단층선 우측이 보다 전기전도도가 높은 매질임을 보여준다(p. 271, Vozoff, 1991). Fig. 6은 TM자료의 2차원 탐사단면으로서 양산단층에

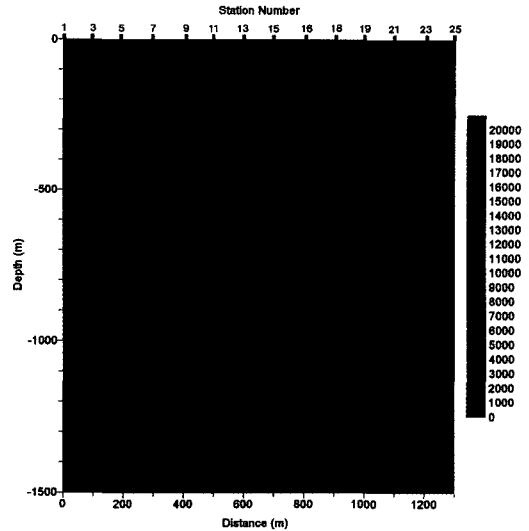


Fig. 6. 2-D Results of HFMT survey based on TM mode in Unyang area. Color scale is represented the resistivity values between 100 and 1,000  $\Omega\text{m}$ , which represents resistivity values below 100  $\Omega\text{m}$  are adjusted to 100  $\Omega\text{m}$  and over 1,000  $\Omega\text{m}$  to 1,000  $\Omega\text{m}$

의한 지질경계면 및 단층선을 직접적으로 보여주고 있는데, 양산단층과 관련된 파쇄대가 크게 발달하고 있지 않음을 보여주고 있다. 단층선은 고각도 (약 80°)의 동측경사를 보여주고 있으며, 지하 약 1500 m까지 연장되어 있음을 볼 수 있다. 단층선의 서쪽은 화강암에 의한 고비저항분포를, 동쪽은 대구층의 낮은 비저항분포를 보여주고 있다. 200 m의 심도까지 약 1,000  $\Omega\text{m}$  이하의 값을 갖는데, 이것은 충적층, 퇴적층, 풍화대에 의한 결과로 판단된다. 탐사결과로부터 Fig. 8의 2차원 지하단면 해석도를 구성하였다.

### ② 전기비저항 탐사결과

UNYANG-1 측선 (Fig. 2)은 양산단층 서쪽의 언양 화강암층에서 실시하였으며, 측정간격은 25m로서 측선 길이가 500 m이다. UNYANG-2 측선 (Fig. 2)은 양산단층에 수직하도록 측선을 설치하여 측정하였으며, 측정간격은 50 m이며 측선길이는 700 m이다.

UNYANG-1 측선은 양산단층에 가까워지면서 파쇄대의 영향으로 비저항값이 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 하부에 화강암에 의한 고비저항분포를 보이고 있다 (Fig. 7a). UNYANG-2 측선 양산단층의 영향을 직접적으로 보여주고 있으며 고각도의 동측경사를 보여주고 있다. 단층선의 서쪽은 화강암에 의한 고비저항분포를, 동쪽은 대구층의 낮은 비저항분포를

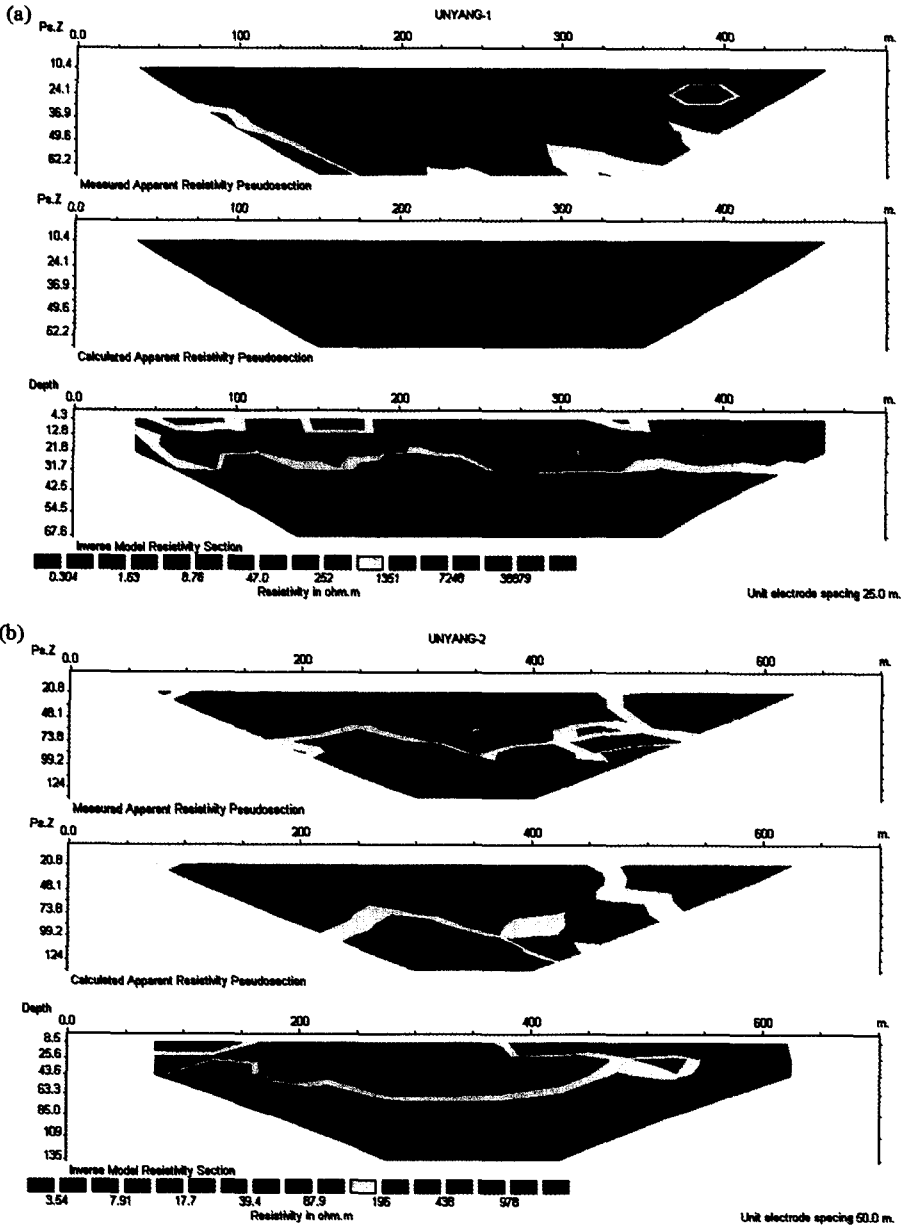


Fig. 7. 2-D DC resistivity sections in Unyang area: (a) UNYANG-1 line, (b) UNYANG-2 line.

보여주고 있다 (Fig. 7b).

**봉계리 지역**

봉계리 지역은 상기한 언양의 연구지역으로부터 약 7.5 km 북쪽에 위치하며 언양지역과 같이 양산단층대로서 좁은 단층폭을 가지고 있다 (Figs. 1, 3). 주 단

층이 단층대의 가운데 발달하고 급한 동측경사를 갖으며 (Fig. 12), 이 단층선은 곧 지질경계면이므로 (Fig. 3), 수평이동으로 생긴 것으로 판단된다.

① HFMT 탐사결과

약 50 m간격으로 HFMT 탐사를 실시하였다 (Fig. 3). Fig. 9(a)는 단층선의 좌측에서의 탐사결과



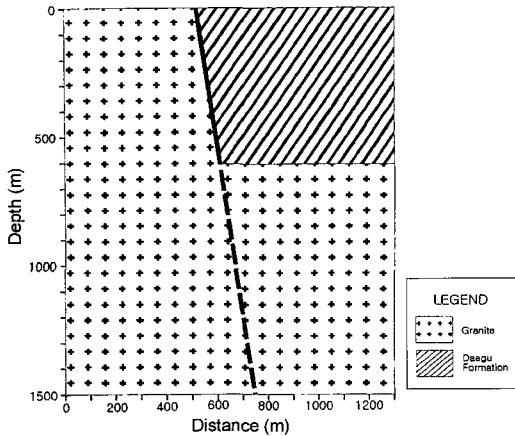


Fig. 8. 2-D subsurface interpretation based on HFMT survey in Unyang area.

의 한 예로서 5번 측정점의 취득결과이며, Fig. 9(b)는 단층선의 우측에서의 탐사결과와 한 예로서 12번 측정점의 취득결과이다. Fig. 9의 (a)와 (b)의 결과는 단층선을 중심으로 비저항값의 차이를 보여주고 있다. 즉, 단층선의 우측에서 보다 낮은 비저항값을 보여주고 있다. 한편, 단층선을 중심으로 언양지역과 같은 TM과 TE의 역전을 관찰할 수 있으며, 이는 단층선 우측의 매질이 보다 높은 전기전도도를 가짐을 보여준다 (Vozoff, 1991). Fig. 10은 TM자료의 2차원 탐사단면으로서 봉계리 지역에서도 언양지역의 HFMT 탐사결과와 같은 양상의 양산단층에 의한 지질경계면 및 단층선을 직접적으로 보여주고 있다. 양산단층과 관련된 파쇄대는 발달하지 않았으며, 단층선은 언양지역과 거의 같은 고각도의 동측경사 (약 80°)를 보여주고 있으며, 지하 약 1000 m까지 연장되어 있음을 볼 수 있다. 단층선의 서쪽은 화산암과 화강암에 의한 고비저항분포를, 동쪽은 대구층의 낮은 비저항분포를 보여주고 있다. 약 200 m의 심도까지 약 2,000 Ωm 이하의 비교적 낮은 비저항값을 갖는데, 이것은 충적층, 퇴적층, 풍화대에 의한 결과로 해석된다. 탐사결과로부터 Fig. 12의 2차원 지하단면 해석도를 구성하였다.

② 전기비저항 탐사결과

BG 측선은 양산단층에 직교하도록 측선을 설치하였으며 (Fig. 3), 측정간격은 50 m이며 측선길이는 650 m이다. 언양지역의 UNYANG-2 측선과 마찬가지로 양산단층의 영향을 직접적으로 보여주고 있다.

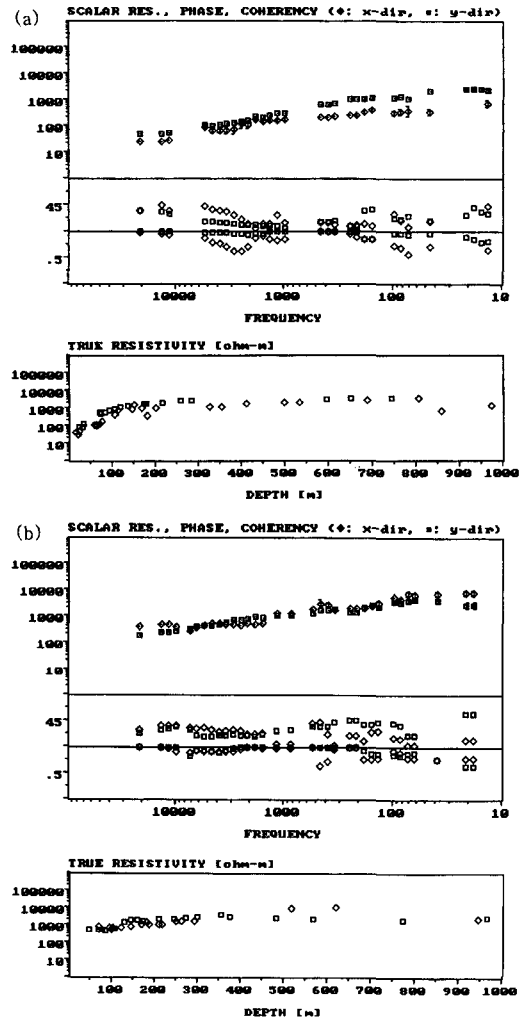


Fig. 9. 1-D analysis of apparent resistivity, phase, coherency and true resistivity from the above. ◆ and ■ represent TE and TM, respectively: (a) 1-D data of measuring point #5, and (b) 1-D data of measuring point #12 of HFMT survey line in Bong-gye area.

언양지역과 같이 고각도의 동측경사를 보여주고 있다. 단층선의 서쪽은 화산암과 화강암에 의한 고비저항분포를, 동쪽은 대구층의 낮은 비저항분포를 보여주고 있다 (Fig. 11).

결 론

양산단층 중에서 경주 남쪽 측 제3기 분지와 접하는 부분의 남쪽 부분중 경상남도 언양과 봉계리를 선정하여 야외지질조사와 물리탐사를 시행하여 단층의 특징

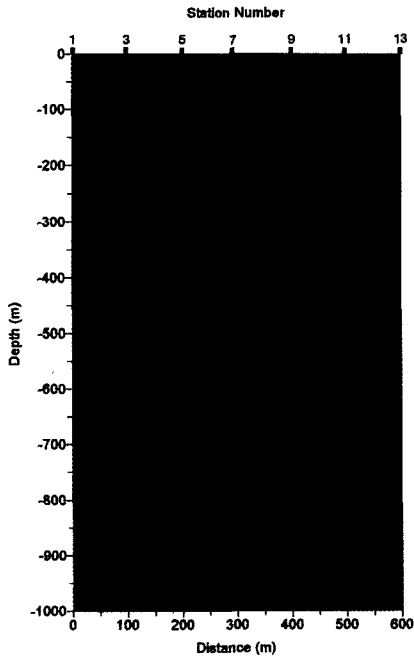


Fig. 10. 2-D Results of HFMT survey based on TM mode in Bong-gye area. Color scale is represented the resistivity values between 100 and 1,000  $\Omega\text{m}$ , which represents resistivity values below 100  $\Omega\text{m}$  are adjusted to 100  $\Omega\text{m}$  and over 1,000  $\Omega\text{m}$  to 1,000  $\Omega\text{m}$

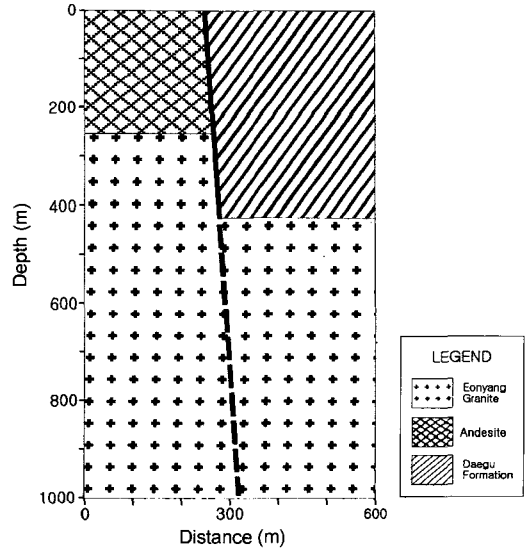


Fig. 12. 2-D subsurface interpretation based on HFMT in Bong-gye area.

을 파악하였는데 각 조사의 결과가 서로 잘 일치하였다. HFMT탐사와 쌍극자배열의 전기탐사의 종합결과에 의하면 언양 및 봉계리 지역의 양산단층대는 지하 심부까지 좁은 단층폭을 가지고 있는 지역이며, 주 단

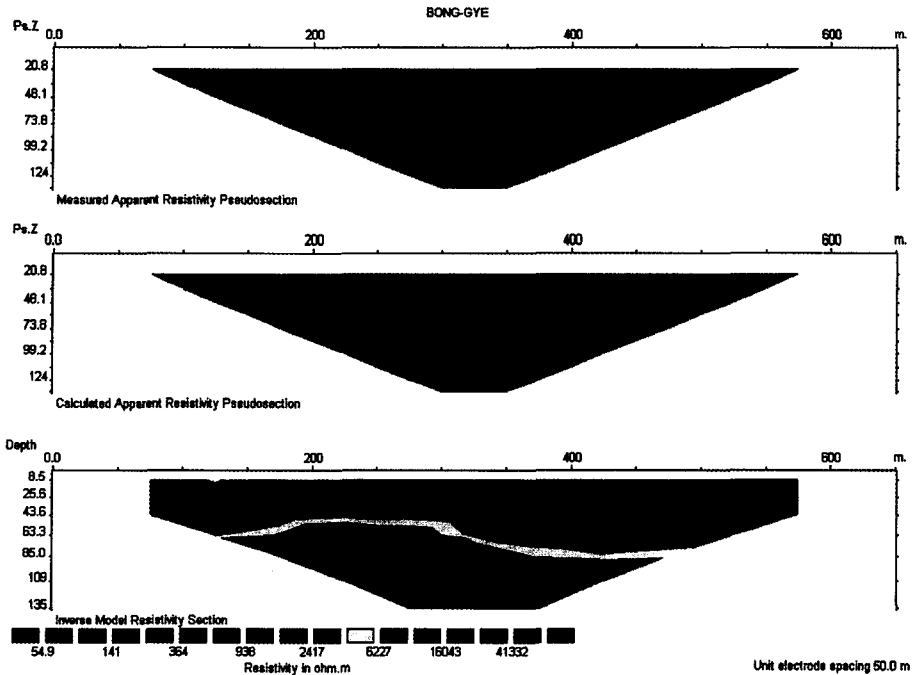


Fig. 11. 2-D DC resistivity section in Bong-gye area: BG line.

층이 단층대의 가운데 발달하고 거의 수직에 가까운 동측 경사를 갖고 있다 (Figs. 8, 12). 이들의 확인된 연장은 지하 1~1.5 km까지이나 보다 심부까지 연장될 수 있다. 물리탐사의 결과와 야외조사에서 확인된 좁은 단층폭과 지형과 관계없이 일직선으로 되어있는 지표면 단층진행양상은 단층면의 수직적인 발달을 시사하고 있다. 이러한 단층면의 수직 발달과 지표 및 심부에서 확인된 단층면을 경계로 급변하는 암상은 양산단층의 수평이동을 지시한다. 양산단층의 수평이동 증거가 지하 심부까지 교란없이 잘 보존되었다는 것은 양산단층의 남부가 재활성화 되지 않아 단층생성 후기의 구조운동이 중첩되지 않았던 것으로 보인다. 따라서 제3기 퇴적분지로부터 비교적 멀리 떨어진 곳의 양산단층은 제3기 분지형성동안에 영향을 미쳤던 구조운동의 영향을 받지 않았다고 해석할 수 있다. 이는 제3기 분지와 접촉하고 있는 지역의 양산단층의 특성과 잘 대비되어 제3기 동안 구조운동의 영향범위 및 운동 특성을 결정하는 간접적인 자료가 된다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단의 연구지원 (98-0703-02-01-3) 및 학술진흥재단의 기초과학연구지원 (DP-0434)에 의해 이루어졌다. 본 연구의 자료해석에 많은 도움을 준 미국 Electromagnetic Instruments, Inc.의 이승희 박사과 야외 지질조사에 도움을 준 한국석유공사의 이성숙박사 및 현장 물리탐사에 도움을 준 배재대학교 대학원의 이대근군에게 감사를 표한다. 한편, 훌륭한 지적사항을 제시하여 저자가 간과하였던 내용을 수정, 보완하여 보다 향상된 논문이 될 수 있도록 하여 주신 익명의 논문심사위원께 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 김성규, 조동행 (1984a) 경상분지의 미소지진에 관한 연구. 한국동력자원연구소 단지소식, 84/1, 70호.
- 김성규, 조동행, 전명순, 정부흥 (1984b) 내진연구. 한국동력자원연구소, 83-국토기분지질-5-08.
- 김상중, 이현구 (1996) 경상분지 북부에 배태된 금속광상 및 화성암체의 K-Ar 연대측정을 통한 NW계 및 NE계 단층운동의 시기추정. 양산 단층대 심포지움 및 학술답사 가이드, 한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관, 88-90.
- 김영화 (1982) 구조선 예산지역에 있어서의 물리탐사 적용에. 지질학회지, 18권, p. 73-82.
- 김영화 (1987) 양산단층의 구조에 관한 지전기학적 연구. 서울대학교 박사학위논문, 107p.
- 김유준, 정봉일, 엄상호, 장기홍, 박봉순, 강필중 (1980) 한반도의 지진지체 구조분석에 관한 연구. 과학기술처 연구보고서, 159p.
- 김인수, 김종열 (1983) 경상분지 언양단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구. 광산지질, 16권, p. 79-89.
- 김인수 (1985a) 한반도 및 동아시아의 지질구조 발달과 판구조 이론 (1): 동아시아의 지체구조와 단층계. 부산대학교 자연과학논문집, 40권, p. 297-310.
- 김인수 (1985b) 한반도 및 동아시아의 지질구조 발달과 판구조 이론 (2): 동아시아의 지체구조와 단층계. 부산대학교 자연과학논문집, 40권, p. 311-325.
- 김인수 (1992) 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 25권, p. 84-109.
- 김종열 (1983) 언양단층지역에 대한 전기비저항 탐사연구. 부산대학교 석사학위논문.
- 김종열 (1988) 양산단층의 산상 및 운동사에 관한 연구. 부산대학교 박사학위논문, 97p.
- 김종환, 강필중, 임정웅 (1976) Landsat-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계연구. 지질학회지, 12권, p. 79-89.
- 손 문 (1998) 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달. 부산대학교 박사학위논문, 233p.
- 손치무, 이상만, 김형기, 김상만, 김형식 (1978) 동래, 월래 지질도폭 설명서. 자원개발연구소, 27p.
- 손호웅, 윤혜수, 오진웅 (1999) 전기, 전자탐사에 의한 경주남부 (일실지역)의 울산단층 심부구조. 자원환경지질학회지, 32권, p. 161-167.
- 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, (2000a) 지반환경물리탐사. 시그마프레스, 716p.
- 손호웅, 정교철 (2000b) 지반조사 및 토질시험의 결과해석과 적용. 엔지니어즈, 716p.
- 엄상호, 양승진, 전명순, 김정호 (1983) 한반도의 지진위험도, 한국동력 자원연구소 연구보고서, 295p.
- 원종관, 강필중, 이상현 (1978) 경상분지 구조해석과 Igneous Pluton에 관한 연구. 지질학회지, 14권, p. 79-92.
- 이기화 (1985) 양산단층의 활성문제에 관하여. 지질학회지, 21권, p. 38-44.
- 이동영 외 19인 (1997) 한반도 지진활동 및 지각변형 연구 (양산단층 지역대). 한국자원연구소 연구보고서 KR-97-(B)-1, 230p.
- 이민성, 강필중 (1964) 한국지질도 (1:50,000), 양산 도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
- 이병주, 황재하, 박기화, 송교영, 최위찬 (1996) 양산단층의 특성에 관하여. 양산단층대 심포지움 및 학술답사 가이드, 한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관, 29-34.
- 이봉주, 최위찬 (1996) 한반도 동남부지역의 선구조선 분포특성연구. 양산단층대 심포지움 및 학술답사 가이드, 한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관, 15-28.
- 이윤중, 이인기 (1972) 한국지질도 (1:50,000), 언양 도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
- 이준동, 김인수, 윤선, 상기봉, 김영화 (1993) 언양지역을 중심으로한 양산단층에 관한 연구. 특히 파쇄작용과 자기 비등방성 고찰을 중심으로. 지질학회지, 29권, p. 128-144.
- 장기홍, 우병길, 이진형, 박순옥, Akira Yao (1990) 경상분지 동부의 백악기 및 전기 신생대 층서 및 지사. 지질학회지, 26권, p. 471-487.
- 장태우, 장천중, 김영기 (1993) 언양지역 양산단층 부근 단열의 기하분석. 광산지질, 26권, p. 227-236.
- 전명순, 지현철, 전정수 (1996) 지역관측망에 의한 최근 경상분지의 지진활동. 양산단층대 심포지움 및 학술답사

- 가이드, 한국자원연구소, 대한지질학회 공동주관, 35-48.  
 조인기, 송윤호, 정승환, 김정호, 전정수 (1993) 원거리 기  
 준점 MT탐사: 전기, 전자탐사 연구. 한국자원연구소,  
 KR-93-1G-7, 5-34.
- 채병곤, 장태우 (1994) 청하-영덕지역 양산단층의 운동사  
 및 관련 단열발달상태. 지질학회지, 30권, p. 379-394.
- 최현일, 오재호, 신성천, 양문필 (1980) 울산지역 경상계지  
 층의 지질 및 지화학적 연구. 자원개발연구소 연구특  
 보, 20권, p. 5-33.
- 한중환, 광영훈, 손진담 (1986) 한국동남부지역 제3기 퇴  
 적분지내의 지체 구조발달 및 퇴적환경연구 (I). 한국  
 동력자원연구소, KR-86-(B)-8, 76p.
- 한중환, 광영훈, 손진담, 손병국 (1987) 한국동남부지역 제  
 3기 퇴적분지 내의 지체구조발달 및 퇴적환경연구 (II).  
 한국동력자원연구소, KR-86-2-(B)-4, 109p.
- 한중환, 광영훈, 손진담, 정태진, 손병국 (1988) 한국동남  
 부지역 제3기 퇴적분지내의 지체구조발달 및 퇴적환경  
 연구 (III). 한국동력자원연구소, KR-87-(B)-4, 75p.
- 한중환, 김홍열, 손병국, 이호석 등 (1989) 한국동남부지역  
 제3기 퇴적분지내의 지체구조발달 및 퇴적환경연구  
 (IV). 한국동력자원연구소, KT-88-(B)-8, 107p.
- 황재하 (1994) 백악기초 이후 한반도 남동부에 작용한 고  
 응력 복원, 지질학회지, 30권, p. 27-34.
- Choi, H.I. and Park, K.S. (1985) Cretaceous/Neogene  
 stratigraphic transition and post-Kyongsang tectonic  
 evolution along and off the southern coast, Korea. J.  
 Geol. Soc. Korea, v. 21, p. 281-296.
- Hermance, J.F. (1989) Magnetotelluric Method. in James,  
 D.E., The encyclopedia of solid earth geophysics, Van  
 Nostrand Reinhold, p. 746-770.
- Hwang, J.H. and Angelier, J. (1992) Paleostress recon-  
 structions and the tectonic evolution of the Kyung-  
 sang Basin: a case example near Goryeong-eup, J.  
 Geol. Soc. Korea, v. 28, p. 471-482.
- Kang, P.C. (1979a) Geologu analysis of Landsat imagery  
 of South Korea (I), J. Geol. Soc. Korea, v. 15, p. 109-  
 126.
- Kang, P.C. (1979b) Geologu analysis of Landsat imagery of  
 South Korea (I), J. Geol. Soc. Korea, v. 15, p. 181-191.
- Kim, Y. and Lee, K. (1987) A study on the structure of  
 Yongsan fault in the southern part of the Kyeongju. J.  
 Geol. Korean Min. Geol., v. 20, p. 247-260.
- Kim, Y. and Lee, K. (1988) A geoelectric study on the  
 structure of the Yongsan fault in the south of the  
 Kyeongju. J. Geol. Soc. Korea, v. 24, p. 47-61.
- Lee, K. and Na, S.H. (1983) A study of micro-earthquake  
 activity of of the Yongsan fault. J. Geol. Soc. Korea, v.  
 19, p. 127-135.
- Lee, K., Jeong, B. I., Kim, Y. and Yang, S. J. (1984) A geo-  
 physical study of the Yongsan fault area (I). J. Geol.  
 Soc. Korea, v. 20, p. 222-240.
- Lee, K., Jeong, B. I. and Kim, Y. (1985) A geophysical  
 study of the Yongsan fault area (II). J. Geol. Soc.  
 Korea, v. 21, p. 79-89.
- Lee, K., Kim, K.H. and Chang, T.W. (1986) Seismicity of  
 the Korean peninsula (II): Seismicity of the northern  
 part of the Yongsan fault. J. Geol. Soc. Korea, v. 22, p.  
 347-365.
- Lee, K. and Jin, Y.G. (1991) Segmentation of the Yongsan  
 fault system: Geophysical studies on major faults in the  
 Gyeongsang Basin. J. Geol. Soc. Korea, v. 27, p. 439-449.
- Lee, K., Cheon, K. and Um, C.R. (1992a) Geoelectric  
 surveys of the Dongrae fault, the Eonyang fault and  
 the Ilkwang fault: Geophysical studies on major faults  
 in the Gyeongsang Basin. J. Geol. Soc. Korea, v. 28, p.  
 218-226.
- Lee, K. and Um, C.R. (1992b) Geoelectric survey of the  
 Ulsan fault: Geophysical studies on major faults in the  
 Gyeongsang Basin. J. Geol. Soc. Korea, v. 28, p. 32-39.
- Lee, K. and 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, p. 32-39.
- Lee, K. and Lee, J. H. (1997) Geoelectric study on the  
 probable seismic segment boundaries of Yongsan fault  
 zone, Geoscience J., v. 1, p. 16-25.
- Lee, K. and Han, W.S. (1999) Geoelectric surveys in the  
 southern part of the Yongsan Fault, J. Korean Geoph.  
 Soc., 2, v. 2, p. 111-122.
- Nichols, E.A., Morrison, H.F. and Lee, S., 1994. Con-  
 trolled-source magnetotellurics for groundwater.  
 Abstracts of the 64th Annual Meeting, Soc. Explor.  
 Geophys. pp. 553-554.
- Placky, G.J. (1987) Resistivity characteristics of geologic  
 tagets. in Nabighian, M.N., ed., Electromagnetic meth-  
 ods in applied geophysics, Tulsa, Oklahoma, Soc.  
 Expl. Geophys., v. 1, p. 53-129.
- Ryang, W.H., Chough, S.K., Kim, J.S., and Shon, H.  
 (1999) Three-dimensional configuration of a pull-apart  
 basin from high-resolution magnetotelluric profiling:  
 Eumsung Basin (Cretaceous), Korea, Sedimentary  
 Geology, accepted in July 1999.
- 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. But-  
 suri-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 Nabig-  
 hian, 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, p. 509-541.
- Yoon, S. and Kim, J.Y. (1990) Tectonic history of the  
 Yongsan fault, Southeastern part of the Korean pen-  
 insula. Proc. Intern. Symp., IGCP-246, Univ. of Tokyo  
 Press.