

언양 일대 양산단층에서의 지구물리학적 반응

권병두¹ · 이희순² · 이춘기¹ · 박계순^{1*} · 오석훈³ · 이덕기⁴

¹서울대학교 사범대학 지구과학교육과, 151-742, 서울특별시 관악구 신림동 산56-1

²강원교육대학교 과학교육과, 407-753, 인천광역시 계양구 계산동 산59-12

³한국수자원공사 수자원연구원 땀안전연구소, 306-711, 대전광역시 대덕구 인죽동 산6-2

⁴기상연구소 해양기상지진연구소, 156-720, 서울특별시 동작구 신대방동 기상청 460-18

Geophysical Responses of the Yangsan Fault Zone at Eonyang Area

Byung-Doo Kwon¹, Heuisoon Lee², Choon-Ki Lee¹, Gyesoon Park^{1*},
Seokhoon Oh³ and Duk kee Lee⁴

¹Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Department of Science Education, Gyeongin National University of Education, Incheon, 407-753 Korea

³Korea Institute of Water and Environment (KIWE), KOWACO, Daejeon 305-730, Korea

⁴Marine Meteorology & Earthquake Res. Lab., METRI, Seoul 156-720, Korea

Abstract: We have performed multiple geophysical surveys comprised of gravity, magnetic and resistivity methods at the Yangsan fault zone which runs through the Eonyang area, the eastern part of Kyeongsang in southeast Korea. The gravity and magnetic data provide information about geological structures. Furthermore, sections of electrical resistivity show the sharp contrast of electrical resistivity distribution across the fault zone. Since the fractured zone tends to be more conductive than fresh host rocks, the electrical resistivity survey is effective in determining the detailed structure of the fault zone. We have made gravity measurements at a total of 71 points alongside two profiles across the fault zone, and carried out an electrical resistivity survey with a dipole-dipole array at the same location using 40m dipole length. In addition, we have analyzed the aeromagnetic data on the corresponding area. The multiple geophysical properties appear to be abruptly changed in electrical resistivity, gravity and aeromagnetic clearly show the different appearance across the fault zone. The fault is identified by its sub vertical attitude which is well known in the Yangsan fault zone. We have also confirmed that the magnitude of the response of the fault is much larger in the southern part of the survey area than the northern area. These results most likely to provide basic information for the further studies about the physical properties and the structures at the Yangsan fault.

Keywords: Yangsan fault, Gravity, Aeromagnetic, Resistivity

요약: 한반도 남동부 경상분지의 동부에 위치한 언양 지역 일대에서 양산 단층대에 대한 물리 탐사를 수행하였다. 본 연구에 사용된 물리 탐사의 종류는 중력과 전기비저항 탐사이며 한국지질자원연구원에서 수행된 항공사력탐사 자료를 분석하였다. 양산 단층대 중 언양 지역을 가로지르는 2개의 축선을 따라 총 71개 측정점에서 중력을 측정하였으며, 동일한 위치에서 쌍극자배열을 이용한 전기비저항 탐사를 수행하였다. 또한, 이 지역의 광역적인 지질구조를 살펴보기 위하여 항공 사력 탐사 자료를 분석하였다. 탐사 결과는 예상 단층선을 따라 동서지역의 전기 비저항, 밀도 및 사력의 분포가 서로 다른 양상으로 발달하여 있음을 보여주고 있다. 탐사 지역을 가로지르는 단층의 모습은 수직으로 잘 발달되어 있으며, 단층선을 따라 파쇄대가 사력 값이 높고 있음을 알 수 있는데 이는 선행 연구의 결과와 일치하고 있다. 또한 중력 자료의 경우 탐사지역의 북쪽에 비해 남쪽에서 단층 반응의 크기가 커짐을 확인할 수 있다. 본 연구의 성과는 앞으로 양산단층의 특성을 연구하는 다른 연구들의 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

주요어: 양산단층, 중력, 항공사력, 전기비저항

*Corresponding author: pgs@mantle.snu.ac.kr

Tel: 82-2-880-7784

Fax: 82-2-874-3289

서론

본 연구의 대상지역인 양산단층은 미소지진과 역사 지진 자료로부터 지진 활동성이 처음 제기된 이후, 인근에 위치한 주요 시설물의 안전과 연관되어 사회적 관심이 집중되었던 지역으로, 본 단층이 위치한 경상분지는 국내 최대의 육상퇴적분지로 동해의 기원 및 동북아 지체구조를 이해하는데 중요한 단서로서 지속적인 연구가 이루어지고 있다. 양산 단층의 단층 운동에 관해서는 주황이동(김인수, 1992; 이준동 외, 1993), 주황이동과 경사이동의 복합운동(채병곤과 장대우, 1994; 김영화 외, 1996) 등 여러 견해들이 제시되고 있으며, 세부 구조 해석을 위한 지구물리학적 연구가 1980년대 초부터 꾸준히 수행되고 있다. 양산 단층에서 이루어진 선행 연구의 결과를 살펴보면, Lee and Na(1983)는 양산단층의 미소지진 및 역사지진으로부터 양산단층을 활성단층이라고 보고하였으며, Lee et al.(1986)은 양산단층 북부 지역에서의 연구를 통해 양산단층이 안강지역을 북북동 방향으로 통과하는 연구 자료를 제시하였고, 안강지역에서의 중력과 총지자기 측정을 통해 기반암의 분포, 지표 근처 단층과 파쇄대 위치 및 규모 등에 관한 연구가 이루어졌다. Kim et al.(1997)은 고해상도 탄성파 반사법을 이용하여 언양부근 양산단층이 속도 600 m/s 이내의 비고결층을 단절하고 있음을 영상화 하였다. 양산단층은 제4기 충적층이 채우고 있는 골짜기를 따라 위치하고 있어 여러 지구물리학적 조사방법으로 단층의 위치 및 단층 파쇄대의 폭 및 깊이를 추정하고 있는데 지역에 따라 큰 변화를 보이는 것으로 알려져 있다. 김인수와 김종렬(1983)은 양산-언양 사이의 언양 단층 지역에서 실시한 지전기 조사 자료로부터 충적층 및 풍화대층의 두께가 최대 20 m 정도이며 단층 파쇄대는 300-1000 m 정도의 폭을 갖고 있는 것으로 해석하였다. Kim and Lee(1988)는 경주 남쪽 양산단층이 수직단층에 가까우며 북이 남쪽으로 향할수록 증가한다고 하였다.

본 연구는 언양 부근 단층대의 전기기적 반응 특성을 확인하기 위하여 실시되었고, 이를 위하여 전기비저항 탐사와 중력탐사를 병행하여 수행하였으며, 항공 자력 자료를 해석하여 사용하였다. 전기비저항 탐사기법은 단층대에서 나타나는 낮은 전기비저항대인 파쇄대의 정밀한 해석에 적합하며, 중력 탐사와 자력 탐사는 저비용으로 단층대 주변의 광역적인 지

질 구조 해석에 효과적이다.

특히 본 연구가 수행된 양산 단층 지역은 미소지진과 역사지진 자료로부터 지진 활동성이 제기된 지역이며, 파쇄대의 전기적 특성과 구조는 단층의 운동성에 의해서 민감하게 반응하기 때문에 본 연구의 결과는 향후 이루어질 한국의 지진 연구에도 유용한 기초 정보를 제공할 것이다.

탐사지역의 지질개요

탐사 지역인 언양을 북부 부근의 지질은 중생대 백악기에 생성된 녹회색 사암과 실트스톤, 셰일 등의 암석을 포함하는 경상계 신라봉 대구층과 주산안산암 절암 각력질안산반암, 안산반암 및 안산암 규용회질암으로 구성된 주산안산암절층이 Fig. 1과 같이 단층을 중심으로 동쪽과 서쪽에 분포하고 있다. 또한, 백악기 말에 관입한 경상계 불국사봉 언양화강암이 단층대의 서쪽으로 일부 분포하고 있으며, 단층대를 따라 역암, 사암, 점토를 포함하는 충적층이 넓게 자리 잡고 있다(이윤종과 이인기, 1972).

자료 획득

연구 지역은 울산광역시 울주군 언양읍 일대 지역으로 두 개의 축선에서 중력탐사와 전기비저항탐사를 수행하였다. Line I은 위도 35° 38' 16.4", 경도 129° 9' 52.9" 지점을 중심으로 양산단층을 가로지르는 약 2.5 km 길이의 축선이다. 중력 탐사의 경우 축점 1에서 6사이는 100-200 m 간격으로, 축점 7에서 축점 35 사이는 50 m 간격으로 중력을 측정하였다. Line II는 Line I에서 약 5 km 남쪽에 위치하며 총 36개의 축점에서 중력을 측정하였으며, Line II의 축점 간격은 축점 1에서 축점 7까지는 100 m, 그 외의 모든

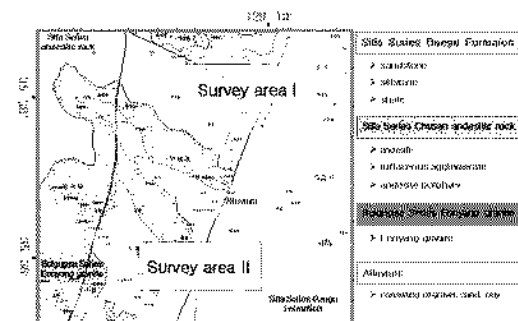


Fig. 1. Geology map of Eonyang area.

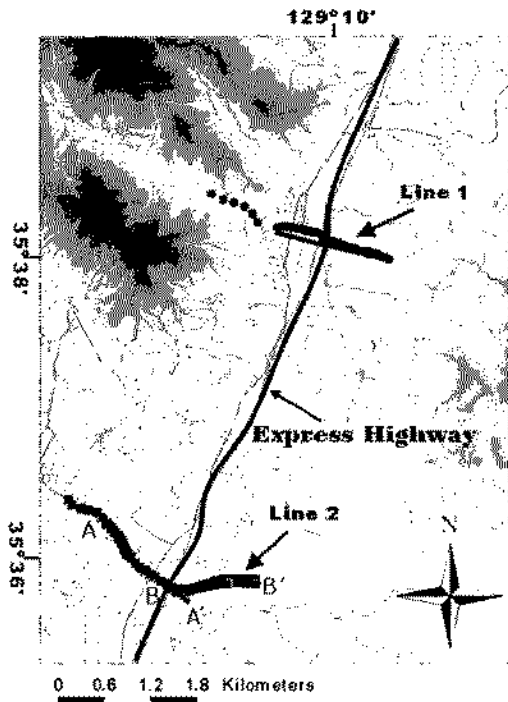


Fig. 2. Location map with sites of gravity survey survey (point) and lines of DC resistivity survey (Line).

측점은 80 m이다. 중력계는 상대중력계인 LaCoste & Romberg G type을 사용하였으며, 중력 보정에 필요한 측정의 위치 측정은 RED2A 광파측정기와 테오도라이트를 이용하였다.

Fig. 2에서 나타나고 있는 것은 두 축선이 포함된 지형도이고, 단층선은 경부 고속도로 근처에 위치하고 있으며 단층을 경계로 실트스톤과 화강암, 실트스톤과 안산반암의 암상 변화를 보이고 있다.

전기비저항 탐사 축선은 중력 축선과 동일하며, 표준의 전기전도도를 정밀하게 측정하기 위하여 단층을 가로지르는 축선 상에서 각각 쌍극자 간격을 Line I에서는 30 m, Line II에서는 40 m로 하였다.

자료 처리

중력 탐사

현장에서 측정된 중력자료로부터 계기, 조석, 위도, 프리에어, 부계, 지형 보정 및 광역 보정의 순차적인 보정과정을 거쳐 잔여 중력 이상을 구하였다. 두 축선에서의 고도 변화, 계기보정 및 조석 보정 후

의 중력값, 프리에어 이상, 부계 이상을 Fig. 3에 도시하였다. 거리는 경부 고속도로를 기준으로 동쪽을 양의 값, 서쪽을 음의 값으로 표시하였다. 모든 중력값은 거리 기준점의 중력값을 0으로 하는 상대 중력값으로 표시하였다. 축선에서의 고도는 동쪽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 부계 이상에서 보는 바와 같이 예상 단층선 부근에서 급한 중력값의 변화 양상을 나타내고 있으며, 전반적으로 동쪽으로 갈수록 증가하는 광역 중력 이상이 나타난다. 이는 우리나라의 전반적인 부계 이상의 분포와 일치하는 것으로 광역적인 지각 심부 구조의 영향으로 생각된다.

국부적인 지하 구조를 해석하기 위해서는 일반적으로 광역 중력 이상을 제거한 잔여 중력 이상을 이용하여 된다. Fig. 3의 부계 이상과 다항식 적합법을 이용하여 구한 광역 중력 이상으로부터 잔여 중력 이상을 계산하였다(Fig. 4). 잔여 중력 이상을 보면 예상 단층선 지역에서 단층구조의 영향으로 추정되는 급격한 중력값의 변화 양상이 나타나고 있어 고속도로 부근에서 단층선이 지나가고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, Line I의 중력 변화양상은 단층선 부근에서 Line II보다 뚜렷한 양상을 보이나, 변화 폭은 Line II 지역보다 작게 나타나고 있다. 이러한 차이는 각 축선에서의 지형, 충적층의 분포, 파쇄대 쪽, 지하의 지질구조 등에 그 원인이 있을 것으로 추정된다.

Line II 지역은 Line I 지역에 비하여 넓은 충적층이 존재하는 지역에 위치하기 때문에 충적층의 두께 역시 Line I에 비해 두꺼울 것으로 생각되며 기반암과의 밀도차가 크기 때문에 Line II에서 더욱 큰 중력 변화 폭을 나타내며, Line II의 완만한 중력변화는 풍화와 파쇄의 영향이 Line I에 비하여 심하기 때문인 것으로 추정된다.

잔여 중력이상으로부터 지질구조를 추정하기 위하여 Marquardt-Levenberg's Method를 이용하여 2차원 중력 역산을 수행하였고, Line I과 Line II에서 해석된 밀도 모델을 잔여중력이상도와 함께 Fig. 4에 도시하였다. 잔여중력이상도의 해석과 같이 역산 결과에서도 단층선의 구조가 뚜렷이 나타나고, 파쇄대로 예상되는 밀도 전이대가 Line II에서 더 넓게 분포하며, 이 지역에서 단층구조의 심도가 더 깊은 것으로 나타난다. 또한, 단층대 동쪽의 실트스톤이 서쪽의 화강암보다 0.1-0.2 g/cm³ 정도 밀도가 크며, Line II 지역에 일부 존재하는 안산반암은 중력이상을 고려할

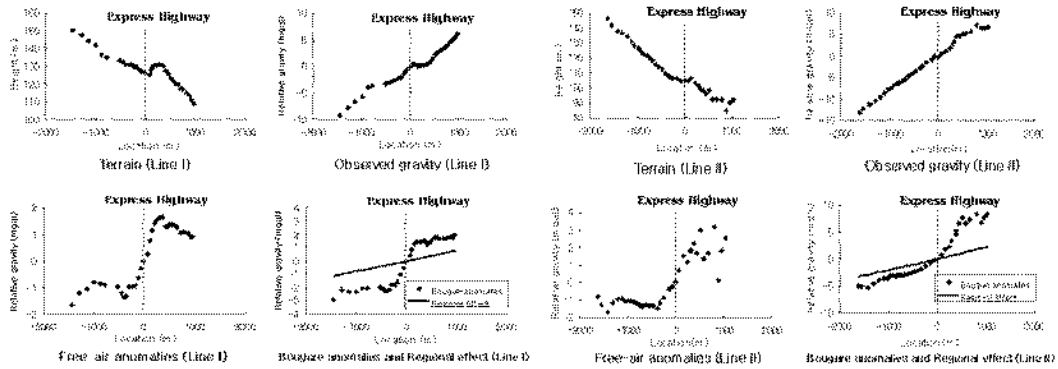


Fig. 3. Results of gravity anomalies.

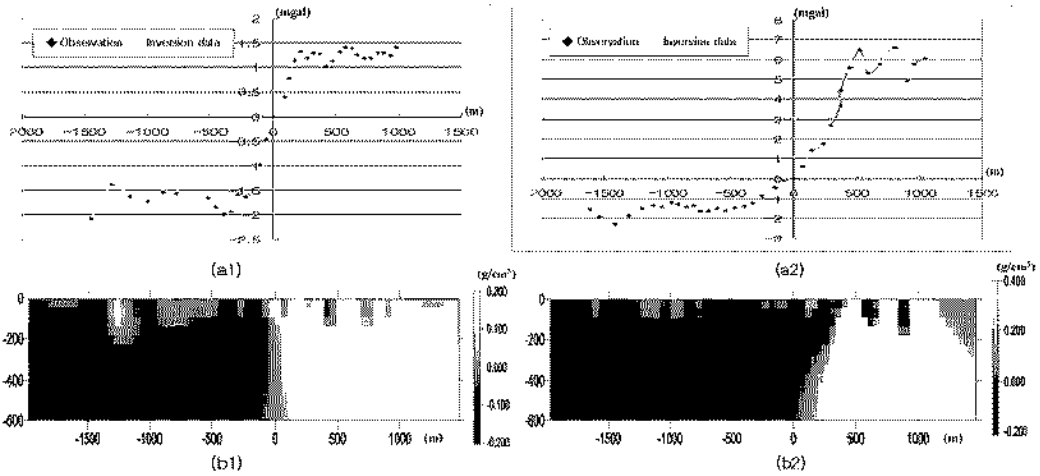


Fig. 4. Results of gravity inversion analysis. (a1) Local gravity anomalies (Line I) (a2) Local gravity anomalies (Line II). (b1) Results of gravity inversion (Line I) (b2) Results of gravity inversion (Line II).

때 실트스톤과 화강암보다 낮은 밀도를 갖는 것으로 추정된다.

항공 자력 탐사

자력 자료는 한국동력자원연구소(1989)에서 수행한 광역탐사연구(KR-88-2D-1)의 항공 탐사 자료를 사용하였다. 획득된 자력 자료는 자력화 변환(RTP: Reduction to the magnetic pole)을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 항공자력 이상도는 양산단층대의 광역적인 경계위치를 잘 보여주고 있으며, 화성암이 주를 이루는 단층의 서쪽에 분포하는 연암화강암 및 주산안산암질암층과 퇴적암층이 주를 이루는 단층선의 동쪽에 위치하는 대구층의 분포를 반영하고 있어, 단층대의 위치 파악에 많은 정보를 제공해 주고 있다.

전기비저항 탐사

전기비저항 탐사 자료의 겉보기 비저항은 약 30-2,500 ohm-m 범위에 분포한다. 단층선을 중심으로 뚜렷한 전기비저항의 변화 양상이 나타나며, 예상단층선 주위에는 대체대로 추정되는 저비저항대가 나타나고 있다. 본 연구에서는 전기비저항 탐사 해석 프로그램인 DIPRO를 이용하여 유한요소법과 ACB(Active Constraint Balancing) 방법(Yi and Kim, 1998)으로 역산을 수행하였다.

역산 결과, Line I의 경우 예상 단층선의 서쪽부근에서는 100 ohm-m 미만의 비저항 분포를 나타내며, 동쪽 하부로 갈수록 비저항값이 점점 커지는 양상을 나타내고 있으나, 예상단층선에서 동쪽으로 400 m 정도 치우친 위치에서 급격한 변화 양상이 보이고 있다. 이는 이 부근까지 파쇄대가 발달하고 있기 때문

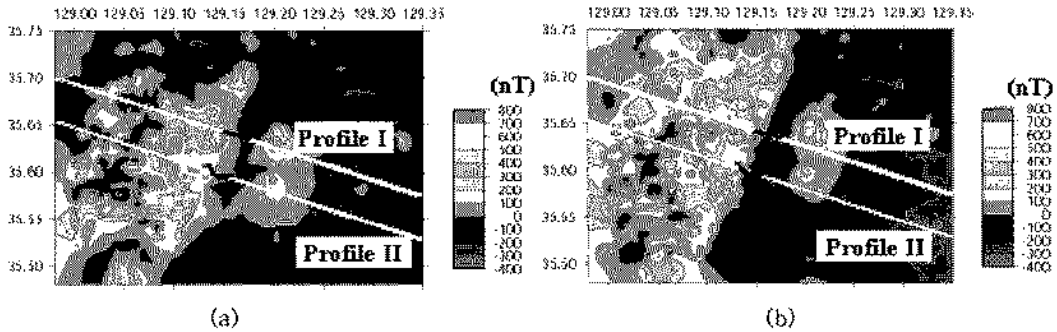


Fig. 5. Map of magnetic anomalies at Eonyang area. Black curved lines represent survey lines, and white straight lines represent profile lines in Figure 6. (a) Observed magnetic data (b) RTP magnetic data

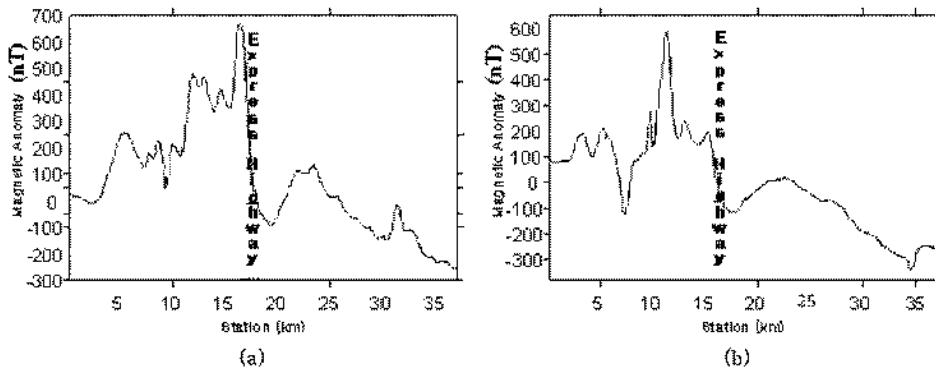


Fig. 6. Map of magnetic anomaly profiles at Eonyang area. (a) RTP data along profile I (b) RTP data along profile II.

인 것으로 예상된다. 또한, 표층과 하부의 비저항 변화는 거의 없이 수평적인 변화가 강하게 나타나고 있어, 이 지역의 단층이 수직 하부로 발달하고 있는 모습을 확인 할 수 있었다. Line II의 경우는 30-2,500 ohm-m의 범위로 Line I 지역보다 고비저항의 값이 나타나고는 있으나 전반적인 형태는 수평적인 전기비저항의 변화가 강하고 예상 단층선 위치에서 급격한 전기전도도의 변화를 나타내는 등 수직적으로 발달한 단층의 모습이 Line I 지역과 유사한 경향성을 가지고 있다. 다만, Line I에서는 예상 단층선 위치의 동쪽과 서쪽 모두에서 저비저항대가 나타나고 있는 것과는 달리 Line II에서는 단층선의 동쪽으로만 저비저항대가 강하게 나타나고 있는 모습을 나타내고 있다. Line I과 Line II에서 나타나는 저비저항대의 분포가 서로 다른 양상을 나타내고 있어 두 지역의 단층 발달 관계와 정밀한 지질 구조의 차이를 파악하기 위해서는 보다 정밀한 추가 탐사가 필요한 것이다.

복합 자료 해석

본 연구에서 수행한 복합 지구물리 탐사 결과는 탐사 기법들이 반영하는 암석의 물성이 서로 다르기 때문에 동일한 결과의 획득을 기대하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나 지구물리 탐사의 특성상 암석의 물성이 변화하는 경계위치가 모든 탐사 기법의 결과에 반영되어 있기 때문에 서로 다른 물성들의 효과를 복합적으로 이용하여 경계위치를 결정할 수 있어 지하의 지질 구조를 파악하는 데는 보다 타당한 결과를 획득할 수 있는 장점을 가지고 있다.

중력 탐사와 전기비저항 탐사 모두 동일한 두께의 측선에서 탐사가 이루어졌으며, 항공 자력 자료는 탐사 지역을 포함하는 넓은 지역의 자료를 사용하였다. Figures 3-8에서 볼 수 있듯이 복합 지구물리 자료 처리 결과, 중·자력 탐사와 전기비저항 탐사에서 동일하게 고속도로와 나란하게 단층대가 발달하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 단층의 모습은 수직에 가

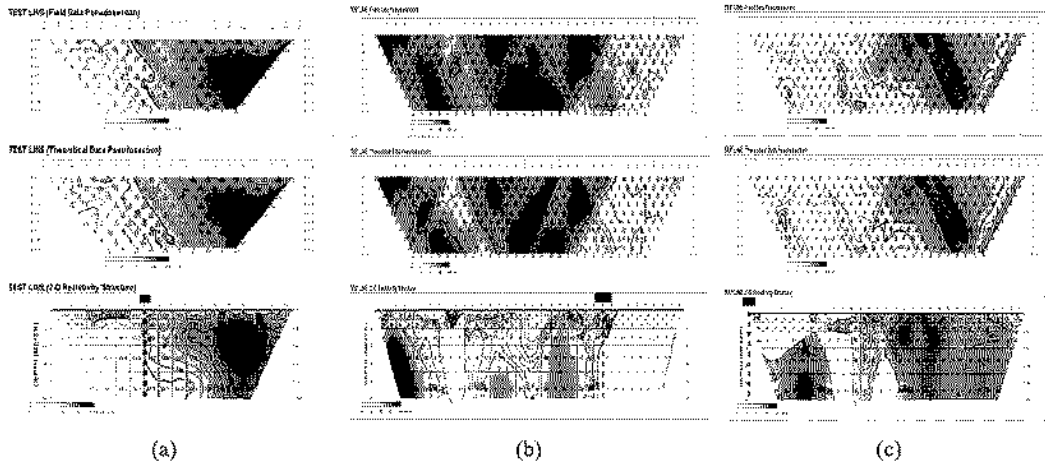


Fig. 7. The results of DC resistivity survey. (a) Line I (b) Line II AA' (c) Line II BB'. ■: Express Highway

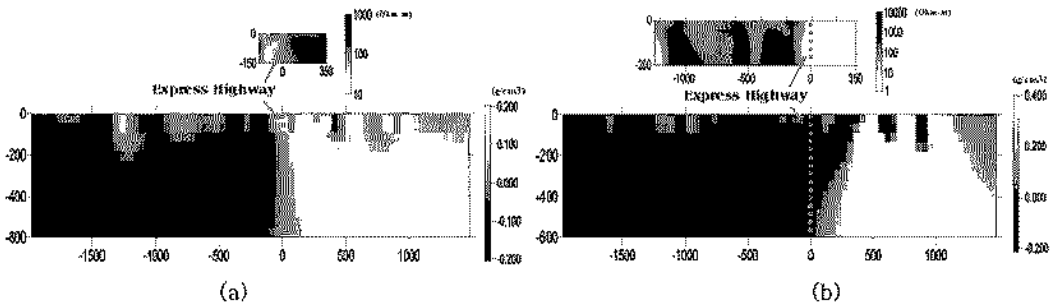


Fig. 8. Results of DC resistivity and gravity inversion. (a) Line I: Distributions of resistivity (Up) and density (Down) (b) Line II: Distributions of resistivity (Up) and density (Down)

함께 하부로 연속되어 있는 것으로 추측된다.
 Line I과 Line II의 결과를 비교해 볼 때, 전체적으로 Line II 지역이 단층대의 동쪽으로 충격층이 넓게 발달하고 있기 때문에 단층의 효과가 Line I에 비하여 흐려져 나타나고 있으나, 중력과 자력 자료를 통하여 세상 단층선의 위치를 파악할 수 있으며, 전기 비저항의 차이를 나타내는 파쇄대의 분포를 전기비저항 탐사 결과를 통하여 효과적으로 확인 할 수 있었다. 다만 Line I 지역과 Line II 지역에서 나타나는 구조의 차이점을 보다 명확하게 해석하기 위해서는 정밀한 추가 탐사가 필요할 것으로 판단된다.

결 론

한반도는 유라시아판 내부에 위치하며, 지진활동의 특성은 매우 불규칙한 형태로 나타나고 있다. 근래들

어 한반도 근해의 바다에서 일정규모 이상의 지진이 발생하고 있으며, 내륙에서도 큰 지진은 아니지만 소규모와 중규모 지진들은 간혹 발생하고 있는 실정이다. 지진의 특성상 한번 발생하면 그 피해규모가 상당히 클 뿐만 아니라 인명피해의 위험성도 크다. 따라서 지진의 피해를 최소화 할 수 있는 노력이 절실히 필요한 때이다.

지진 피해를 최소화 할수 있는 최선의 방법은 지진예지 시스템을 구축하는 것이나, 지진의 메커니즘이 복잡하고 지질의 특성을 많이 반영하기 때문에 지진 발생 가능성이 있는 지역에서 전기, 전자적 특성을 모니터링 하는 것이 가장 효과적인 방법일 것이다.

우리나라의 경우 지진예지를 위하여 모니터링이 이루어지고 있지 않으며, 아직 지진예지에 대한 정보의 누적이 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 모니터

량이 실시될 때 중요한 기초 정보로 활용될 수 있는 단층대의 전기, 전자적 특성을 연구하였다.

이번 연구의 관심지역은 미소지진과 역사지진 자료로부터 지진 활동성이 저운 제기된 이후, 인근에 위치한 주요 시설물의 안전과 연관되어 사회적 관심도가 높은 울주군 안양읍 일대에 위치한 양산단층으로, 이 지역에서는 정밀한 단층 해석을 위하여 단층대와 화쇄대 등의 인약지반을 확인하기 위하여 널리 사용되고 있는 전기비저항 탐사뿐만 아니라 광역적인 형태를 효과적으로 파악할 수 있는 중·자력 탐사를 병행하여 수행하였다.

해석 결과 중·자력 자료를 통하여 지질 구조 변화의 경계인 단층대의 개략적인 위치를 효과적으로 파악할 수 있었으며, 전기비저항 탐사를 통하여 정밀한 화쇄대의 형태 및 위치를 확인 할 수 있었다. 양산단층대에서는 단층대를 따라 저비저항대의 화쇄대가 잘 발달하고 있었으며, 이러한 화쇄대는 단층의 운동에 의하여 발생하는 미소한 균열을 통하여 유체의 흐름이 발생하기 때문에 이로부터 잘 발달한 저비저항대가 존재하게 될 수 있는 것이라 생각된다.

본 연구를 통해 밝혀진 안양지역 일대의 양산단층의 중·자력 및 전기적 특성은 그 자체적인 연구성과로서뿐만 아니라 향후 지진의 발생 메커니즘이 보다 정밀하게 확립되고, 지진의 예지로서의 인구 활동이 이루어질 때 단층의 기초 물성 정보로써 중요하게 이용될 수 있을 것이다. 또한 향후 한반도의 중요한 단층대에서도 지구물리학적 탐사가 수행되어 한반도의 지진과 관련된 단층대의 물성 및 지질 특성에 대한 폭넓은 데이터베이스가 구축되기를 기대한다.

사 사

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 지진예지 및 지진해일 예측기술개발과제에서 수행된 것입니다. 연구비를 지원해 주신 기상청에 감사드립니다. 또한 탐사를 함께 수행한 박상

표, 양준모, 최수영, 방선택, 이영균, 류희영, 전소희, 김수경, 김정은 님에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김영화, 장보인, 박상우, 1996, 양산단층 지역의 화강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고응력장, 지질학회지 32 (5), 367-378
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동, 지질학회지, 28 (1), 84-109
- 김인수, 김종렬, 1983, 경상분지 안양단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질학회지, 16 (1), 11-18.
- 이윤중, 이인기, 1972, 한국지질도 1:50,000 연양도폭, 국립지질조사소.
- 이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화, 1993, 안양지역을 중심으로한 양산단층에 관한 연구: 특히 화쇄작용과 자기비등방성고찰을 중심으로, 지질학회지, 29 (2), 128-144
- 채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련 단열 발달상태, 지질학회지 30 (4), 379-394
- 한국동력자원연구소, 1989, 평역탐사연구, KR-88-2D-1, 105 p.
- Kim, K. Y., Woo, N. C., Kim, H. K. and Jung, M. S., 1997, Seismic reflection studies near Lonyang in the Yangsan Fault System of Korea; in Lee Y., and Kim, J. H., Eds., Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent, GSK 50th Anniversary International Symposium, Geological Society of Korea, 28-32.
- Kim, Y. and Lee, K., 1988, Ageoelectric study on the Structure of the Yangsan Fault in the south of Kyongju, Journal of the Geological Society of Korea, 24 (1), 47-61.
- Lee, K. and Na, S. H., 1983, A study of microearthquake activity along the Yangsan Fault, Journal of the Geological Society of Korea, 19 (3), 127-135.
- Lee, K., Kim, K. H. and Chang, T. W., 1986, Seismicity of the Korea Peninsula (II): seismicity of th northern part of the Yangsan Fault, Journal of the Geological Society of Korea, 22 (4), 347-365.
- Yi, M. J., Kim, J. H., 1998, Enhancing resolving power of the least-squares inversion with active constraint balancing: 68th SEG Annual meeting (USA).

2005년 1월 12일 원고 접수
2005년 5월 20일 수정원고 접수
2005년 5월 21일 원고 채택