지구물리 제 2권 제 4호, p. 259-268, (1999년 12월)

# 경주 부근 양산단층 지역에서의 전기비저항 탐사

이기화 · 한원석
서울대학교 지질과학과

## 요 약

양산단층 북부 지역의 지전기학적 구조를 밝히기 위하여 경주시 부지리와 서악동, 나원리와 양동리 사이 지역에서 전기비저항 탐사를 수행하였다. 경주 남부 지역인 부지리와 서악동 사이에서는 예상 단층선 동쪽에 위치한 파쇄대가 서쪽보다 심부까지 연장되며 남북 방향의 변화는 관찰되지 않는다. 경주 북부 지역인 나원리와 양동리 사이에서는 형산강을 따라 단층파쇄대가 발달하고 있으며, 형산강 서쪽의 비저항구조가 동쪽보다 파쇄대의 영향을 많이 받는 것으로 해석되었다. 호명리에서 수행된 쌍극자-쌍극자 탐사의 영상 단면에서는 양산단층이 수직 운동을 한 단층임을 시사하는 구조가 관찰된다. 경주 남부 및 북부 지역에서의 비저항 구조가 크게 변하지 않는 것으로 미루어 양산단층의 북부구역과 중앙구역의 경계는 본 연구지역의 북부에 위치할 것이라 판단된다.

**주요어**: 양산단층, 전기비저항 탐사, 파쇄대, 수직단층

**Lee, Kiehwa and Han, Won-Seok, 1999, Electrical Resistivity Surveys in Yangsan Fault Area near Kyongju, Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 4, p. 259-268.**

**ABSTRACT:** Electrical resistivity surveys were conducted in the areas between Buji-ri and Seoak-dong, and between Nawon-ri and Yangdong-ri, Kyongju in order to investigate the geoelectric structure of the nothren part of the Yangsan Fault. In the area between Buji-ri and Seoak-dong south of Kyongju, the fracture zone east of the inferred fault develops more deeply, without significant north-south variation in depth, than west. In the area between Nawon-ri and Yangdong-ri north of Kyongju, the fault zone seems to be developed along the Hyungsan-river, and the resistivity structure west of the river is more affected by the fracture zone than east. Interpreted section of dipole-dipole survey conducted in Homyung-ri shows vertical contact of the Yangsan Fault. It appears that the boundary between the northern and central segment of the Yangsan Fault is located in the north of study areas since there is no significant variation in electrical resistivity structure near Kyongju.

**Key words:** Yangsan Fault, electrical resistivity survey, fracture zone, vertical fault

*(Lee, Kiehwa and Han, Won-Seok, Department of Geological Sciences, Seoul National University, San 56-1, Shillim dong, Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea. email: kihwalee@plaza.snu.ac.kr)*

## 1. 서 론

한반도 남동부 경상분지의 동부에 위치한 양산단층은 한반도 내에서 가장 최근에 활동한 구조에 해당되며, 부근에 원자력발전소 등의 중요 시설물이 위치하여 양산단층에 대한 여러 방향의 연구가 진행되어 왔다. 양산단층의 단층 운동에 대해 근래에 많은 연구 결과들이 발표되고 있는데, 김인수(1992)는 동해의 성인 모델을 제시하면서 양산단층계가 우수향주향이동단층으로 재활되었다고 하였고, 이준동 외(1993)는 양산단층계에서 수평좌수향주향운동이 일어났다고 하였다. 채병곤 · 장태우(1994)는 양산단층이 적어도 세 번의 주향이동 운동과 두 번의 경사이동 운동을 복합적으로 겪었다고 하였으며, 김영화 외(1996)는 양산단층의 고응력장이 부분적으로 경사이동단층을 지시하며 주로 주향이동단

층을 유발하는 것과 일치한다고 보고한 바 있다.

양산단층 지역에 대한 지구물리학적 연구는 1980년대 초부터 계속 수행되고 있는데, Lee · Na (1983)는 양산단층의 미진활동을 연구하여 최초로 양산단층을 활성이라 보고하였다. Kim (1982), 김인수 · 김종렬(1983)은 단층의 파악에 전기비저항 탐사를 적용할 수 있음을 보여주었고, Lee *et al.* (1984, 1985)은 여러 지구물리 탐사 방법을 이용하여 양산단층이 각 탐사 방법에 의해 명백히 표현됨을 보인 바 있다. 또한 Lee *et al.* (1986)은 양산단층 북부 지역에서의 연구를 통해 양산단층이 안강 지역을 북북동 방향으로 통과하는 증거를 제시하였다. Kim · Lee (1987)는 경주 남쪽 양산단층 지역을 연구하여 양산단층이 수직단층에 가까우며 폭이 남쪽을 향할수록 증가한다고 하였고, 파쇄대의 규모와 단층면의 위치에 대한 지질 및 지전기학적 연구결과가 일치됨을 보고하였다(Kim · Lee, 1988). 김영화 외(1990)는 경주 북쪽에서 행해진 연구에서 경주 남쪽에서와 마찬가지로 양산단층이 북북동 방향의 주향을 갖는다고 하였다. Lee · Jin (1991)은 역사지진과 계기지진 자료를 분석하여 양산단층이 세 개의 구역(segment)으로 나뉠 가능성을 제시하였고, Kim *et al.* (1997)은 고해상도 탄성파 탐사를 통해 양산단층이 미고결층을 단절함을 보이며 양산단층이 활성단층일 가능성을 제시하였다. Lee · Lee (1997)는 Lee · Jin (1991)에 의해 제기된 구역의 경계 부근에서의 전기비저항 탐사를 통해 북부구역과 중앙구역의 경계와, 중앙구역과 남부구역의 경계의 존재 가능성을 높인 바 있다. 김기영 · 이광자(1998)는 안강 부근에서 중력과 지자기 연구를 통해 양산단층 파쇄대의 특성을 연구하였다. 경재복 외(1999a)는 양산단층 남부 일부 지역에 대한 트렌치 조사를 통해 제4기 후기까지 활동한 가능성을 제시하였고, 또한 비저항 경계부가 제4기 단층운동 추정선과 거의 일치하며 양산단층이 고각의 경사를 가질 것이라 추정한 바 있다(경재복 외, 1999b).

본 연구에서는 경주 남부의 내남면 부지리와 서악동 사이 지역, 경주 북부의 견곡면 나원리와 강동면 양동리 사이 지역에서 전기비저항 탐사를 수행하였다(Fig. 1, 2, 3). 이 지역은 Lee *et al.* (1986)의 연구와 김기영 · 이광자(1998)가 안강 부근의 두 측선에서 중력 및 지자기 연구를 수행한 것 외에는 기존에 행해진 연구에서 다루어지지 않은 지역이다. 본 연구에서는 Lee · Jin (1991)에 의해 중앙 구역으로 추정된 경주 남부 및 북부 지역에서 일련의 전기비저항 탐사를 통해 이 지역 천부 단층파쇄대의 지역적인 변화 양상과 비저항 구조를

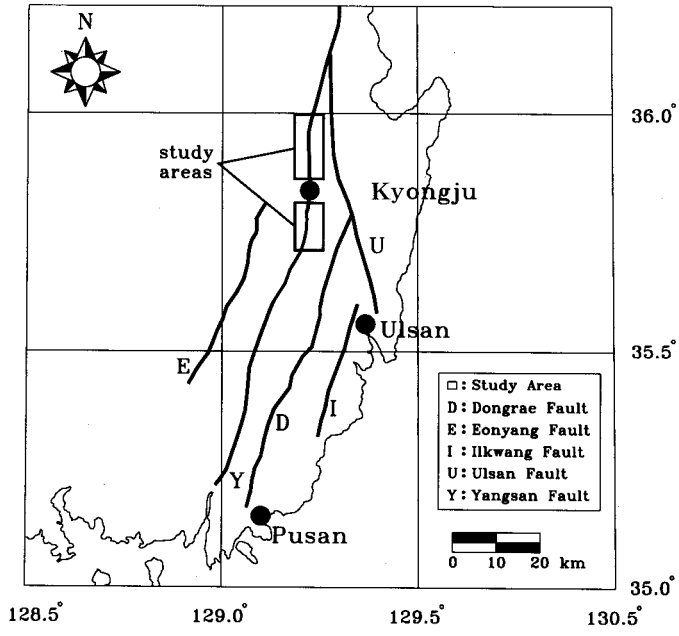


**Fig. 1.** Map showing locations of the study areas and major faults of the Yangsan Fault System.

규명하고자 하였다.

## 2. 지질 개요

이번 연구지인 경주 남부 및 북부 지역 모두 한반도 남동부에 위치한 경상퇴적분지에 위치하며 Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 하양층군의 퇴적암과 불국사 화강암류, 제4기 충적층이 주로 분포한다. 경주 남부 지역은 모량도폭(김남장 외, 1971)의 북동부 지역에 위치하며 전기비저항 탐사가 수행된 제4기 충적층은 남북으로 흐르는 형산강 주위에 분포한다. 형산강의 동서쪽에 부분적으로 호온펠스화된 대구층이 위치하고, 형산강 동쪽의 대구층은 불국사 화강암류에 의해 관입당하여 있다(Fig. 2). 경주 북부 지역은 경주도폭(Tateiwa, 1928)의 동부에 속하는데, 이 도폭은 1928년 일제에 의해 발간된 것이고 그후 새로이 발간되지 않았다. 조사 지역의 서부와 남부 지역에는 대구층이 위치하고 중앙부와 동부에는 불국사 화강암류가 관입하였다(Fig. 3). 이 지역에서도 형산강 주변에 발달하고 있는 제4기 충적층에서 전기비저항 탐사가 수행되었다.

## 3. 전기비저항 탐사와 해석

양산단층 북부 경주 부근의 지전기학적 구조를 조사하기 위하여 양산단층의 북부 지역인 경주시 내남면, 탑정동, 서악동, 견곡면, 천북면, 안강읍, 강동면 등지에서 슐럼버져 수직 탐사 19점, 베너 수평 탐사 6측선, 쌍극자-쌍극자 탐사 4측선이 수행되었다(Fig. 2, 3). 모든 탐사 자료는 ABEM Terrameter SAS 300B를 통해 얻어졌으며 수직 탐사에서의 전류 전극 사이의 최대 거리는 430 m, 수평 탐사에서의 전극 간격은 30 m로 하였다. 수평 탐사와 쌍극자-쌍극자 탐사는 모두 서쪽에서 동쪽 방향으로 진행되었다. 쌍극자-쌍극자 탐사의 전극 간격은 30 m이고 전극전개수는 8로 하였으

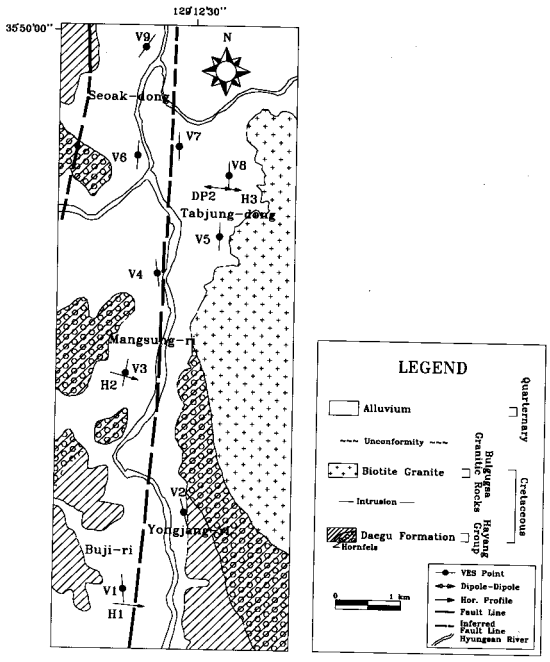


**Fig. 2.** Geological map showing locations of VES, horizontal mappings, and dipole-dipole survey in the southern part of Kyongju.

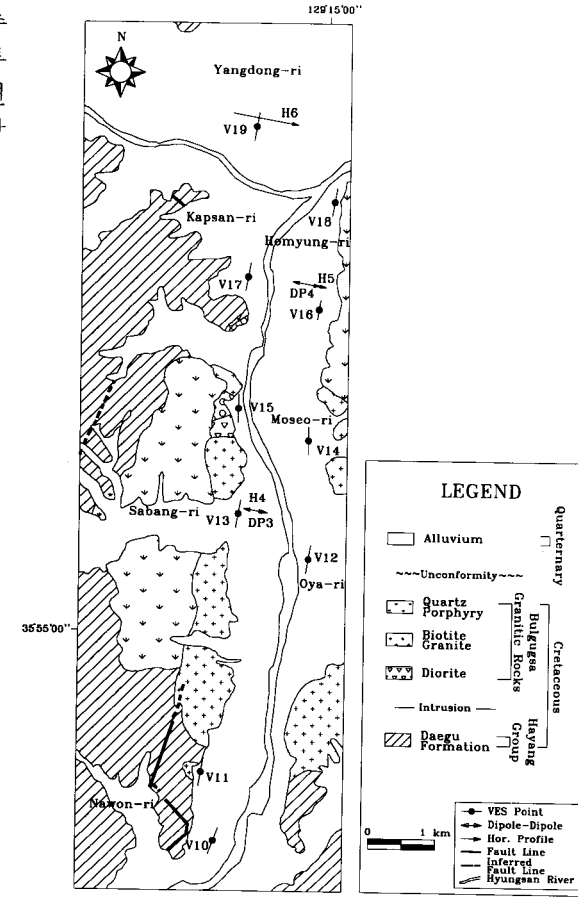


**Fig. 3.** Geological map showing locations of VES, horizontal mappings, and dipole-dipole surveys in the northern part of Kyongju.

며, 탐사 측선을 수평 탐사의 측선과 거의 동일하게 하여 이들을 비교 · 분석할 수 있도록 하였다.

양산단층과 같은 수직단층에서의 슐럼버져 수직 탐사는 측선의 방향이 단층과 평행할 때 실제의 구조를 더 잘 반영하므로(Lee · Han, 1999) 모든 수직 탐사의 측선 방향을 단층과 평행하도록 하였다. 그렇지만 수평 탐사에서는 측선이 단층을 수직으로 횡단해야 더욱 확실한 층의 불연속면을 얻을 수 있고, 쌍극자-쌍극자 탐사에서도 단층과 수직한 방향의 측선이 2차원의 가정에 잘 부합하므로 이들 탐사는 단층과 수직한 방향으로 수행되었다.

수직 탐사 자료는 겉보기비저항 곡선으로부터 지하의 비저항구조를 자동적으로 계산하는 Zohdy (1989)의 방법에 의해 해석되었다. Zohdy의 방법에 의하면 해석된 층의 개수는 측점의 개수와 동일하게 된다. 그렇지만 이렇게 계산된 층들이 모두 층상 구조로 해석되지는 않고, 인접해 있는 비슷한 비저항의 층들이 한 개의 층으로 간주되어 몇 개의 층상구조로 해석되는 것이 일반적이다. 파쇄대와 풍화되지 않은 기반암의 경계는 비저항값이 깊이에 따라 변화하는 점이대의 형태를 가질 가능성이 높으므로 Zohdy의 방법을 이용하여 수직 탐사 자료를 해석하였다. 본 연구에서는 깊게는 지하 약 100 m 이상까지 나타나는 저비저항대를 파쇄대로 보았고, 이렇듯 심부까지 나타나는 파쇄대의 지역에 따른 깊이 변화는 단층과 밀접하게 연관되어 있을 것이라 판단하였다.

Ward (1990)에 따르면, 신선한 화강암의 전기비저항값은 약 300에서 30,000 ohm-m 정도이고 충적층과 풍화된 화강암의 전기비저항값은 약 1에서 100 ohm-m의 값을 갖는다. 본 지역이 대부분 흑운모 화강암으로 이루어져 있음을 감안하여, 신선한 화강암의 최소 비저항값인 대략 300 ohm-m까지의 깊이를 파쇄대로 간주하였다. 암상을 비저항값에만 의존하여 결정하는 데에는 많은 무리가 따르지만, 이 값은 비저항 자료만으로 파쇄대의 깊이를 추정하고자 할 때 파쇄대로 간주될 수 있는 최고 비저항값으로서의 의미를 갖는다. 그리고 풍화되지 않은 기반암에서는 심부로 갈수록 비저항값이 적어도 감소하지 않을 것이므로 이 값은 각 측점에서의 기반암의 비저항값을 고려하여 융통성 있게 적용되었다.

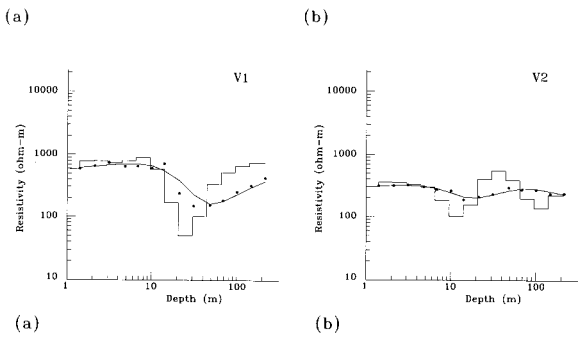


**Fig. 4.** Interpretations of Schlumberger VES V1 and V2. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V1, (b) V2.

단층파쇄대의 수평적 변화의 고찰을 목적으로 획득된 수평 탐사 자료는 실제의 겉보기비저항 곡선과 5점 동평균을 통해 평활화된 곡선에 의해 해석되었고, 이들은 수직 탐사와 쌍극자-쌍극자 탐사의 보조 해석 자료로서 이용되었다.

쌍극자-쌍극자 탐사 자료는 Loke (1995)에 의해 개발된 RES2DINV 소프트웨어에 의해 해석되었다. 이 방법은 지하 매질의 비저항이 급격히 변화하지 않도록 2차원 겉보기비저항 자료에 평활화 제한 최소자승 방법(smoothness-constrained least-squares method, deGroot-Hedlin · Constable, 1990; Sasaki, 1992)을 가하여 역산을 수행한다.

### 3.1. 경주 남부 지역

경주 남부 지역에서는 슐럼버져 수직 탐사 9점, 베너 수평 탐사 3측선, 쌍극자-쌍극자 탐사 2측선이 수행되었다(Fig. 2). 수직 탐사의 경우에는 예측 단층선과 평행하게, 그 외의 경우에는 수직하게 배열되었다. 수평 탐사 H1과 동일한 측선을 따라 쌍극자-쌍극자 탐사(DP 1)가 실시되었으나 측정 불가능한 측점이 많기 때문에 자료의 신뢰도가 떨어지므로 Fig. 2에서 제외하였다.

Fig. 4에는 예측단층선 서쪽에 위치한 내남면 부지리와 동쪽에 위치한 용장리에서 수행된 측점 V1과 V2의 해석 결과가 도시되어 있다. 예측 단층선에서 가까운 곳에 위치한 V1 파쇄대의 비저항값이 V2의 값보다 더 낮은 값을 갖지만, V2의 파쇄대가 심부까지 연장되는 것이 관찰된다. 한편, 수평 탐사 H1에서는 측선의 약 450 m 지점에서 겉보기비저항값이 증가하는 것이 관찰되는데(Fig. 5), 이 지점은 예측 단층선의 위치와 거의 일치한

다(Fig. 2). 또한 H1 서쪽 끝 부분에서의 겉보기비저항값이 동쪽에서의 그것과 비슷하고 그 사이에 낮은 겉보기비저항값을 갖는 구간이 관찰되므로 이 저비저항 구간이 파쇄대의 중심부를 반영하는 것으로 보인다. 이것으로 미루어 고비저항의 기반암 상부에 위치한 낮은 비저항의 파쇄대 중심부가 H1의 저비저항구간에 위치하고 전체적인 파쇄대는 예측 단층선의 동쪽에서 더 심부까지 연장되는 것으로 생각할 수 있다. 그렇지만 V1 파쇄대 직하부에 존재하는 고비저항의 기반암은 V1의 저비저항대가 파쇄대와 연관되어 있지 않을 가능성을 제시하므로 이 지역의 정확한 비저항 구조 규명에는 더 많은 조사와 연구가 필요하다고 판단된다.

내남면 망성리에서는 V3, V4의 수직 탐사 두 점과 한 측선의 수평 탐사가 수행되었다. 단층선과 가까운 곳에 위치한 V4에서는 파쇄대가 약 100 m 정도까지 발달하고 있는 것이 관찰되지만, V3에서는 파쇄대의 영향이 관찰되지 않는다. 수평탐사 H2에서는 단층선에 접근할수록 겉보기비저항값이 감소하는 전형적인 형태를 보여주며(Fig. 7) 측선의 동쪽에서 얻어진 겉보기비저항값은 H1의 중앙부에서 얻어진 값과 비슷한 값을 갖는다. 이것

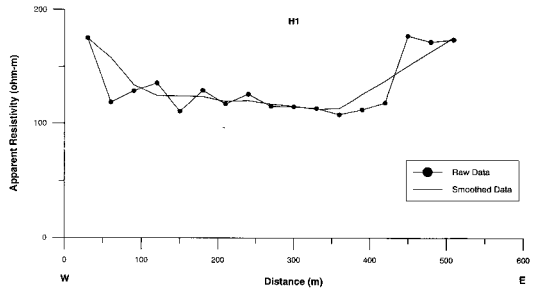


**Fig. 5.** Apparent resistivities of profile H1 obtained by Wenner array with 30 m electrode separation.

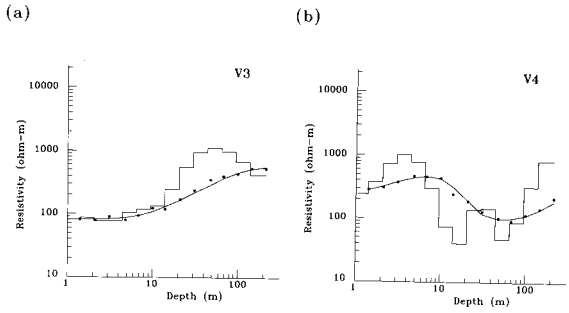


**Fig. 6.** Interpretations of Schlumberger VES V3 and V4. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V3, (b) V4.

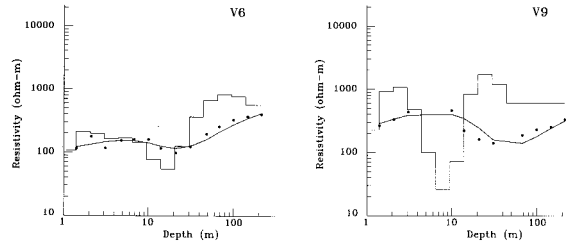


**Fig. 8.** Interpretations of Schlumberger VES V6 and V9. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V6, (b) V9.

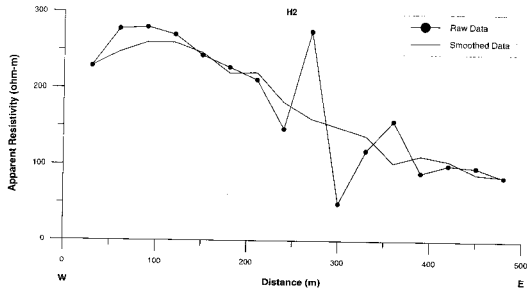


**Fig. 7.** Apparent resistivities of profile H2 obtained by Wenner array with 30 m electrode separation.

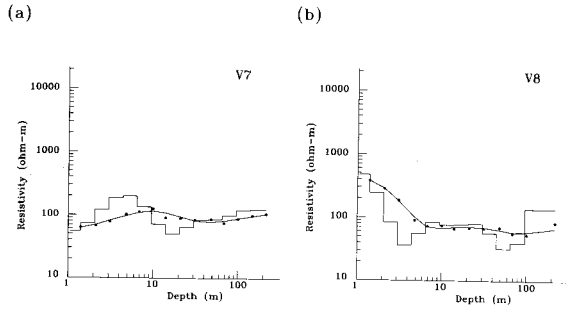


**Fig. 9.** Interpretations of Schlumberger VES V7 and V8. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V7, (b) V8.

은 이 지역의 지전기학적 특성이 단층선을 무한한 축으로 하는 대략적인 2차원 구조에 가까울 것임을 시사하며, 단층선과 수직으로 행해진 2차원 쌍극자-쌍극자 탐사의 신뢰도를 높여준다고 할 수 있다.

탑정동과 서악동에서는 V5-9의 수직 탐사 5점과 한 측선씩의 수평 탐사와 쌍극자-쌍극자 탐사가 수행되었다. V5에는 많은 잡음이 섞여 있어서 해석이 곤란하였다. 단층선의 서쪽에 위치한 V6과 V9에서는 심부 약 20-30 m 정도까지 분포하는 파쇄대가 동쪽에 위치한 V7과 V8에서는 심부 약 100 m까지 연장되는 것이 관찰된다. 이들의 해석 결과는 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 도시되어 있다. 수직 탐사 V1-V9의 해석 결과를 통해 예측 단층선 동쪽의 파쇄대가 서쪽의 파쇄대보다 더욱 심부까지 연장되어 있음을 알 수 있고 이것은 이 지역과 인접한 남쪽 지역에서 행해진 Lee · Han (1999)의 결과와 일치한다. 수평 탐사 H3 (Fig. 10)에서는 겉보기비저항값이 H1의 중앙부에서 얻어진 값과 비슷한 값을 가지면서 동쪽으로 미약하게 감소하는 것이 관찰되므로 단층파쇄대의 폭이 H3의 측선 길이인 600 m를 넘을 것이라 추정된다.

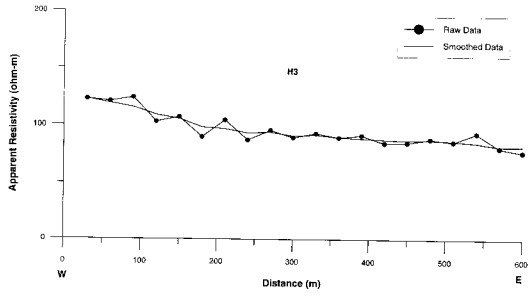


**Fig. 10.** Apparent resistivities of profile H3 obtained by Wenner array with 30 m electrode separation.

쌍극자-쌍극자 탐사 DP2는 H3가 수행된 측선의 일부에서 획득되었고, 두 측선의 서쪽 시작점이 동일하다. Fig. 11은 DP2의 획득 자료 및 해석 결과를 보여준다. 파쇄대의 형태가 뚜렷이 드러나며 가장 낮은 비저항값은 중앙부에서 얻어졌고 단층선쪽(서쪽)을 향할수록 파쇄대의 심도가 깊어지는 형태가 관찰된다.

### 3.2. 경주 북부 지역

슐럼버져 수직 탐사 10점, 베너 수평 탐사 3측선, 그리고 쌍극자-쌍극자 탐사 2측선이 경주 북부 지역에서 수행되었으며(Fig. 3), 각 측선의 방향은 경주 남부 지역과 일관성을 갖도록 하였다.

견곡면 나원리에서 수직 탐사 V10-11이 수행되었고 Fig. 12는 이들의 해석결과를 보여준다. 수직 탐사 V11에서는 지하 약 40-50 m 부근까지 나타나는 파쇄대가 수직 탐사 V10에서는 거의 관찰되지 않는다. V10에서도 저비저항대가 나타나지만 지표 하 10 m 부근에 위치하므로 낮은 심도 때문에 파쇄대라고 단정하기에는 어려움이 있다.

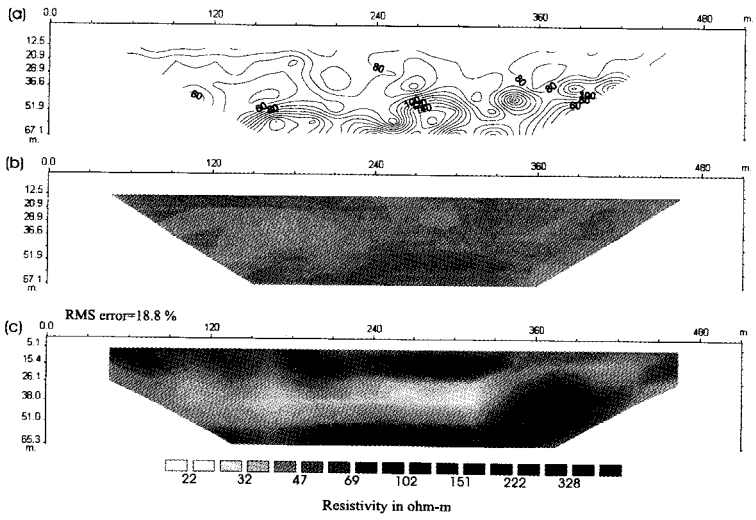


**Fig. 11.** Interpretation of dipole-dipole survey of DP2: (a) pseudosection of observed apparent resistivity, (b) pseudosection of calculated apparent resistivity, and (c) inverted model.

천북면 오야리에서는 수직 탐사 V12가, 안강읍 사방리에서는 수직 탐사 V13과 수평 탐사 H4와 쌍극자-쌍극자 탐사 DP3이, 강동면 모서리에서는 수직 탐사 V14-15가 수행되었다(Fig. 3). 또한 강동면 호명리에서는 수직 탐사 V16, V18과 수평 탐사 H5, 쌍극자-쌍극자 탐사 DP4가 수행되었고, 안강읍 갑산리에서는 수직 탐사 V17, 강동면 양동리에서는 수직 탐사 V19와 수평 탐사 H6이 수행되었다(Fig. 3).

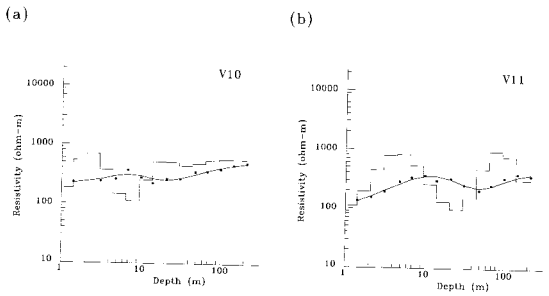


**Fig. 12.** Interpretations of Schlumberger VES V10 and V11. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V10, (b) V11.

형산강의 서쪽에서 행해진 수직 탐사 V13, V15, V17, 그리고 V19에서는 측점마다 어느 정도의 차이는 있지만 지하 약 70-100 m 이상까지 발달하는 파쇄대가 관찰되고(Fig. 13), 동쪽에서 행해진 V14에서도 약 100 m까지 파쇄대가 존재한다(Fig. 14b). 이렇듯 심부까지 연장되는 파쇄대는, V19에서 북쪽으로 약 7 km 정도 거리인 안강리에서는 심부 약 20-50 m까지 발달한다(Lee · Lee, 1997). 이들의 결과와 본 지역에서의 전기비저항 탐사 결과는, 역사지진과 계기지진 자료를 분석하여 북위 36.2도 안강리 부근에 양산단층 북쪽구역과 중앙구역의 경계를 결정한 Lee · Jin (1991)의 결과를 간접적으로 뒷받침한다. 한편, V12, V16, 그리고 V18에서 얻어진 자료들은 대략적인 4층 구조가 나타나는 타 측점들의 결과와 다른 형태를 갖는데 (Fig. 14a, 14c, 14d), 파쇄대에서 나타나는 저비저항대가 나타나지 않고 심부로 들어갈수록 비저항이 낮은 값을 유지하면서 서서히 증가하는 것으로 미루어 오야리와 호명리에서는 다른 지역과 달리 비저항 구조가 파쇄대의 영향보다 지하수 등 다른 영향에 지배받는 것으로 판단된다.

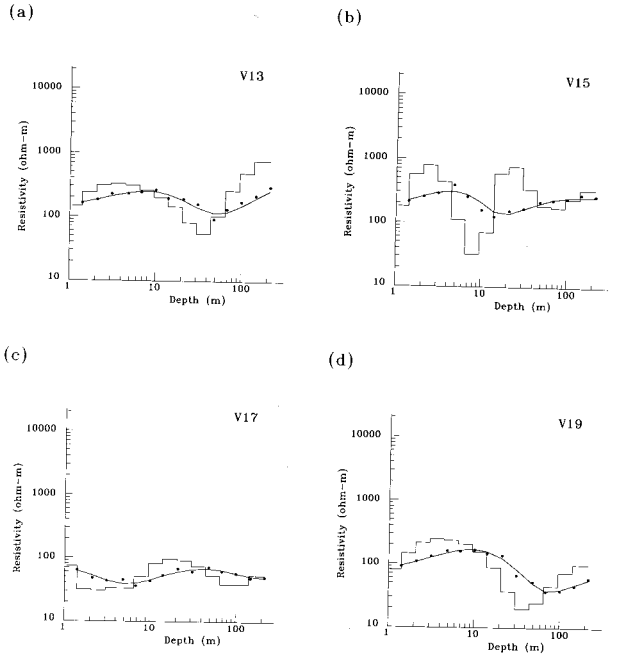


**Fig. 13.** Interpretations of Schlumberger VES V13, V15, V17, and V19. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V13, (b) V15, (c) V17, and (d) V19.

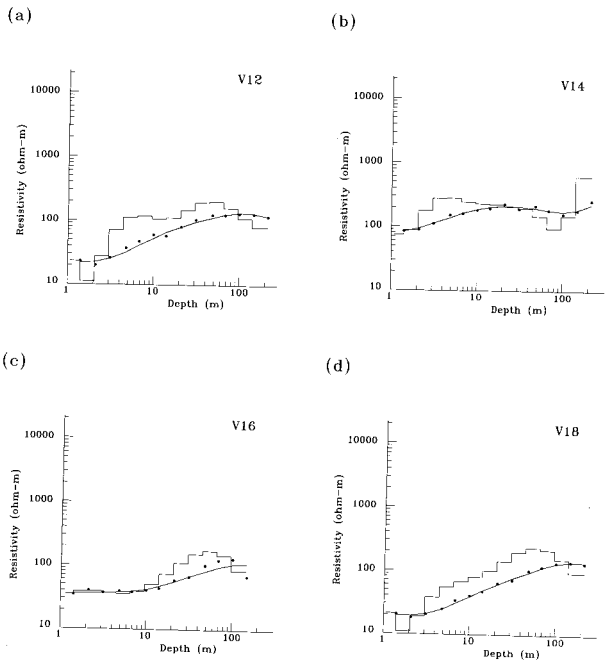


**Fig. 14.** Interpretations of Schlumberger VES V12, V14, V16, and V18. Dots, curves, and jagged lines denote field data, calculated apparent resistivities, and interpreted models, respectively: (a) V12, (b) V14, (c) V16, and (d) V18.

쌍극자-쌍극자 탐사 DP3의 해석 결과는 수평거리 약 200 m 지점을 기준으로 동쪽(형산강쪽)의 저비저항체가 서쪽의 저비저항체보다 약간 낮은 비저항값을 갖는 것을 보여주며, 형산강쪽으로 향하면서 저비저항체가 심부까지 연장된다(Fig. 15c). 수평거리 약 200 m 지점 하부에서 저비저항체의 절단으로 보이는 영상이 관찰되지만 그 하부 고비저항체의 절단은 관찰되지 않으므로 이 지점을 단층으로 해석하기는 어려울 것으로 보인다. DP4의 해석결과는 측선 거리 약 300 m 부근에서 수직 단층으로 보이는 구조를 보여주며, 이 지점 서쪽(형산강쪽)의 저비저항대가 동쪽의 그것에 비해 깊게 발달하고 낮은 비저항값을 갖는다(Fig. 16c). 이것은 이 지점을 기준으로 형산강쪽의 파쇄대가 잘 발달하였음을 시사하며, 김기영 · 이광자(1998)도 중력 및 지자기 방법으로 DP4 측선에 인접한 지역에서 행한 연구에서 이 지점 서쪽의 기반암이 심하게 파쇄되어 있다고 보고한 바 있으며 이는 DP4의 영상 단면에 거의 일치한다. 형산강을 향할수록 파쇄대가 잘 발달되어 있는 DP3 · 4의 해석결과로 미루어 단층이 형산강을 따라 발달한 것으로 판단된다.

수평 탐사 H4 (Fig. 17a)는 동일한 측선에서 얻어진 쌍극자-쌍극자 탐사 DP3의 비저항 해석 구조를 잘 반영한다. 즉, DP3의 수평거리 약 180-270

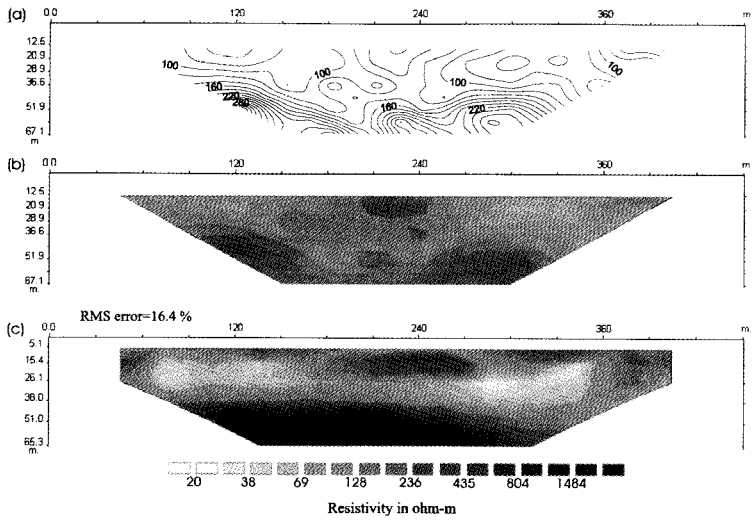


**Fig. 15.** Interpretation of dipole-dipole survey of DP3: (a) pseudosection of observed apparent resistivity, (b) pseudosection of calculated apparent resistivity, and (c) inverted model.

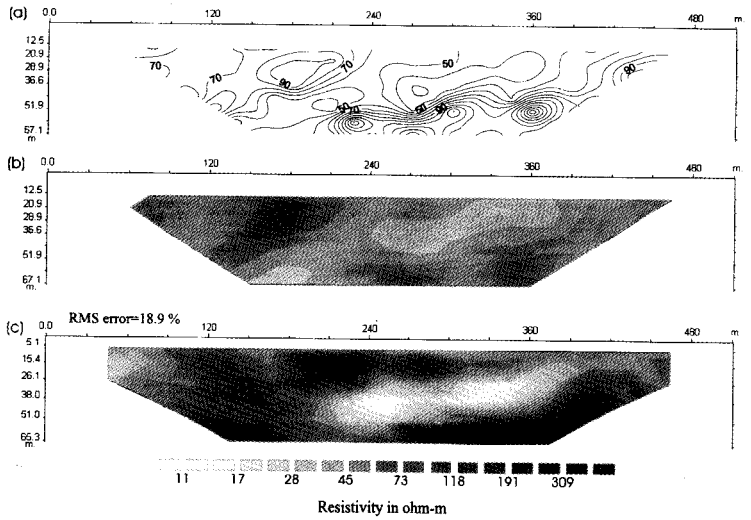


**Fig. 16.** Interpretation of dipole-dipole survey of DP4: (a) pseudosection of observed apparent resistivity, (b) pseudosection of calculated apparent resistivity, and (c) inverted model.

m, 지하 약 30 m 정도까지 관찰되는(Fig. 15c) 고비저항체에 의해 H4의 수평거리 약 200 m 부근에서 나타나는 정점이 나타난 것으로 판단된다. 호명리에서 수행된 쌍극자-쌍극자 탐사 DP4의 상부 비저항 해석 구조(Fig. 16c) 또한 동일한 측선에서 수행된 수평 탐사 H5에 잘 반영되는데(Fig. 17b), 이는 DP3·4 역산 해석 결과의 신뢰도를 높여준다. 수평 탐사 H6에서는 겉보기비저항값이 큰 변화 없이 동쪽으로 향하면서 약간 증가하는 것이 관찰된다(Fig. 17c).

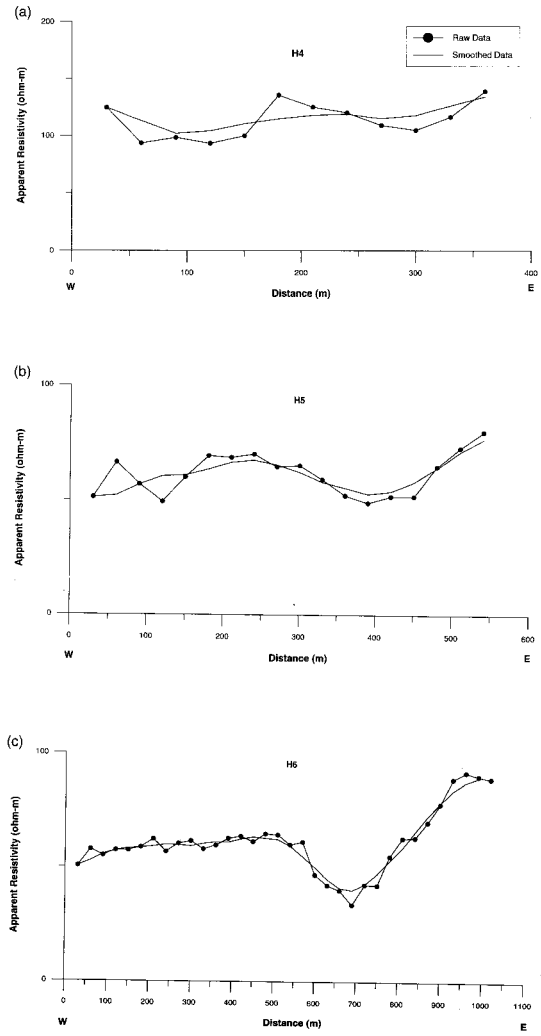


**Fig. 17.** Apparent resistivities of profiles (a) H4, (b) H5, and (c) H6 obtained by Wenner array with 30 m electrode separation.

## 4. 결 론

양산단층이 통과할 것이라 여겨지는 경주 남부 및 북부 지역에서 여러 종류의 전기비저항 탐사를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 탐사 지역 내 경주 남부 지역에서는 파쇄대가 예상 단층선을 무한한 축으로 갖는 2차원 구조에 가까울 것으로 보이며 예상 단층선 동쪽의 파쇄대가 서쪽에 비해 깊게 발달되어 있는 것으로 판단된다.

2. 탑정동에서 행해진 쌍극자-쌍극자 탐사에서는 파쇄대가 예측 단층선에 접근함에 따라 심부까지 연장되는 특징적인 경향이 관찰된다.

3. 탐사 지역 내 경주 북부 지역에서 수행된 탐사 결과는 쌍극자-쌍극자 탐사 DP3의 서쪽기준 200 m 지점의 동쪽(형산강쪽)과 DP4의 서쪽기준 300 m 지점의 서쪽(형산강쪽) 사이에 낮은 비저항대를 보여주며 이것으로 미루어 파쇄대가 형산강을 따라 2차원적인 구조를 가지며 발달해 있는 것으로 해석된다.

4. 경주 북부 지역에서는 형산강 서쪽 하부의 비저항구조가 파쇄대의 영향을 많이 받는 것으로 보이며, 쌍극자-쌍극자 탐사 DP4의 서쪽 기준 약 300 m 지점으로 수직단층이 통과할 것이라 해석된다.

5. 경주 남부 및 북부 지역에서의 파쇄대의 구조가 심하게 변화하지 않는 것으로 미루어 Lee·Jin (1991)에 의해 제기된 양산단층의 북부구역과 중앙구역의 경계는 이 지역의 북쪽에 위치할 것으로 판단된다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구비(96-0703-05-01-3) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다. 또한, 심사 과정에서 많은 의견을 주신 두 분 심사위원님들께 깊은 감사의 말씀을 전하며, 쌍극자-쌍극자 탐사자료의 해석과 출력에 도움을 주신 지오텍 컨설탄트(주)의 원경식 사장님께도 감사드립니다.

## 참고문헌

경재복, 이기화, Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., and Takemura, K., 1999a, 양산단층계 남부 상천리 일대의 트렌치 조사에 의한 단층특성 규

명, 지구과학회지, 20, 101-110.
경재복, 한수형, 조현주, 김지수, 1999b, 양산단층 남부 상천리 일대의 천부 전기비저항 및 VLF 탐사, 지질공학회지, 9, 59-68.
김기영, 이광자, 1998, 안강부근 양산단층 지역에서의 중력 및 지자기 연구, 지구물리, 1, 31-40.
김남장, 권영일, 진명식, 1971, 한국지질도 (1:50,000), 모량도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
김영화, 이기화, 성일경, 1990, 경주 북쪽에 있어서의 양산단층의 구조에 관한 지전기학적 연구, 지질학회지, 26, 393-403.
김영화, 장보안, 박상욱, 1996, 양산단층 지역의 화강암체 내에 분포하는 열린 미세균열과 경상분지의 고응력장, 지질학회지, 32, 367-378.
김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동, 지질학회지, 28, 84-109.
김인수, 김종렬, 1983, 경상분지 언양단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질학회지, 16, 11-18.
이준동, 김인수, 윤선, 상기남, 김영화, 1993, 언양지역을 중심으로한 양산단층에 관한 연구 -특히 파쇄작용과 자기 비등방성 고찰을 중심으로- , 지질학회지, 29, 128-144.
채병곤, 장태우, 1994, 청하-영덕지역 양산단층의 운동사 및 관련단열 발달상태, 지질학회지, 30, 379-394.
deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data, Geophysics, 55, 1613-1624.
Kim, K. Y., Woo, N. C., Kim, H. K., and Jung, M. S., 1997, Seismic reflection studies near Eonyang 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. H., 1982, An example of a geophysical survey in an inferred fault area, Journal of the Geological Society of Korea, 18, 73-82.
Kim, Y. and Lee., K., 1987, A study on the structure of the Yangsan Fault in the southern part of Kyeongju, The Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 20, 247-260.
Kim, Y. and Lee., K., 1988, A geoelectric study on the Structure of the Yangsan Fault in the south of Kyeongju, Journal of the Geological Society of Korea, 24, 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, 127-135.
Lee, K. and Han, W. S., 1999, Geoelectric surveys in the southern part of the Yangsan Fault, Journal of the Korean Geophysical Society, 2, 111-122.
Lee, K., Kim, K. H., and Chang, T. W., 1986, Seismicity of the Korea Peninsula (II) : seismicity of the northern part of the Yangsan Fault, Journal of the Geological Society of Korea, 22, 347-365.
Lee, K., Jeong, B., Kim, Y., and Yang, S. J., 1984, A geophysical study of the Yangsan Fault Area, Journal of the Geological Society of Korea, 20, 222-240.
Lee, K., Jeong, B., and Kim., Y., 1985, A geophysical study of the Yangsan Fault area (II), Journal of the Geological Society of Korea, 21, 79-89.
Lee, K. and Jin, Y. G., 1991, Segmentation of the Yangsan Fault System: geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin, Journal of the Geological Society of Korea, 27, 434-449.
Lee, K. and Lee, J. H., 1997, Geoelectric study on the probable seismic segment boundaries of Yangsan Fault zone, Geoscience Journal, 1, 16-25.
Loke, M. H., 1995, 2D resistivity inversion using the Gauss-Broden least-squares method, Advanced Geosciences, Austin Texas.
Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, Geophysical prospecting, 40, 453-464.
Tateiwa, I., 1928, Geological atlas of Chosen, No. 10, Geological Survey of Chosen.
Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods; *in* Ward, S. H., Ed., Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysicists, 147-189.
Zohdy, A. A. R., 1989, A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves, Geophysics, 54, 245-253.

1999년 9월 15일 원고접수
1999년 12월 23일 원고채택