

전기비저항 탐사법을 이용한 지하 천부 파쇄대 조사

김건영 · 이정모 · 장태우
경북대학교 지질학과

요 약

단층은 지질조사에 의하여 쉽게 발견될 수 있지만, 그 연장선은 지표에서 잘 발견되지 않기 때문에 전통적인 지질조사 방법에 의해 쉽게 파악하기가 어렵다. 단층 및 파쇄대의 경우 점토광물 및 지하수가 많이 함유되어 있어 주위보다 상대적으로 전기비저항이 낮게 나타나므로, 지표에서 발견되지 않는 단층 및 파쇄대 조사에 전기비저항 탐사가 효율적이다. 동래단층에 인접한 경상남도 양산시 웅상읍 용당리 지역과, 울산단층에 인접하고 또 근처 산 사면에서 아직 논란의 대상이 되는 제 4기 단층이 보고된 경상북도 경주시 외동읍 말방리 지역 두 곳에서 2차원적인 지하구조를 알 수 있는 쌍극자 배열 전기비저항 탐사를 실시하였고, 분석해를 이용하여 그 신뢰도를 검토한 역산 프로그램을 이용하여 전기비저항 단면도를 구하였다. 역산 결과 용당리 지역에서는 하나의 저비저항대(low resistivity zone)를, 말방리 지역에서는 2개의 저비저항대를 발견할 수 있었으며, 이들은 거의 수직에 가까운 선상으로 발달하며 그 폭은 15~20 m 정도로 나타났다. 이들 저비저항대(<100 Ω m)는 그 주변지역에 비해 상대적으로 매우 낮은 비저항을 보이므로 이는 단층작용에 의해 생성된 파쇄대에 의한 결과로 사료된다. 최종 판단은 시추나 트렌치에 의하여 이루어지겠지만 주위에 평행한 전기비저항 탐사 축선들을 추가하여 3차원적 해석을 시도하거나 다른 물리탐사 방법을 추가함으로써 해석결과에 대한 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

주요어: 파쇄대, 쌍극자 배열 전기비저항 탐사, 저비저항대

Kim, Gunyoung, Lee, Jung Mo, and Chang, Taewoo, 1999, Dipole-Dipole Array Geoelectric Survey for Gracture Zone Detection. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 3, p. 217-224.

ABSTRACT: Although faults can be found by geological surveys, the surface traces of faults are not easily discovered by traditional geological surveys due to alluvia. In and around faults and fracture zones, the electrical resistivity appears to be lower than that of the surroundings due to the content of groundwater and clay minerals. Therefore, electrical resistivity surveys are effective to search buried faults and fracture zones. The dipole-dipole array electrical resistivity surveys, which could show the two dimensional subsurface electrical resistivity structure, were carried out in two areas, Yongdang-ri, Woongsang-eup, Yangsan-si, Kyungsangnam-do and Malbang-ri, Woedong-eup, Kyungju-si, Kyungsangpook-do. The one was next to the Dongrae Fault and the other near the Ulsan Fault was close to the region in which debatable quaternary fault traces had been found recently. From each measured data set, the electrical resistivity cross-section was obtained using the inversion program the reliability of which was analyzed using analytic solutions. A low resistivity zone was found in the inverted cross-section from the Yongdang-ri area survey data, and two low resistivity zones were found in that from the Malbang-ri area survey data. They were almost vertical and were 15~20 m wide. Accounting the shape and the very low resistivity values of those zones (<100 Ω m) in the inverted section, they were interpreted as fracture zones although they should be proven by trenching. The reliability of the interpretation might be improved by adding some more parallel resistivity survey lines and interpreting the results in 3 dimensions, and/or adding other geophysical surveys.

Key words: fracture zone, dipole-dipole array electrical resistivity lsurveys, low resisitvity zone

(Kim, Gunyoung, Lee, Jung Mo, and Chang Taewoo Department of Geology, kyungbuk National University, Taegu 702-701, Korea. email:jung@kyungpook.ac.kr)

1. 서론

각종 물리탐사법 중에서 전기비저항 탐사법은 금속광상, 석탄 및 지하수 탐사 등에 광범위하게

사용되어 온 방법으로 여러 가지 전극 배열을 사용하여 지하의 전기비저항 분포에 대한 정보를 얻을 수 있다(Ward, 1990). 각종 암석들의 전기비저항 값은 많은 중첩을 보이므로(Keller · Frischknecht,

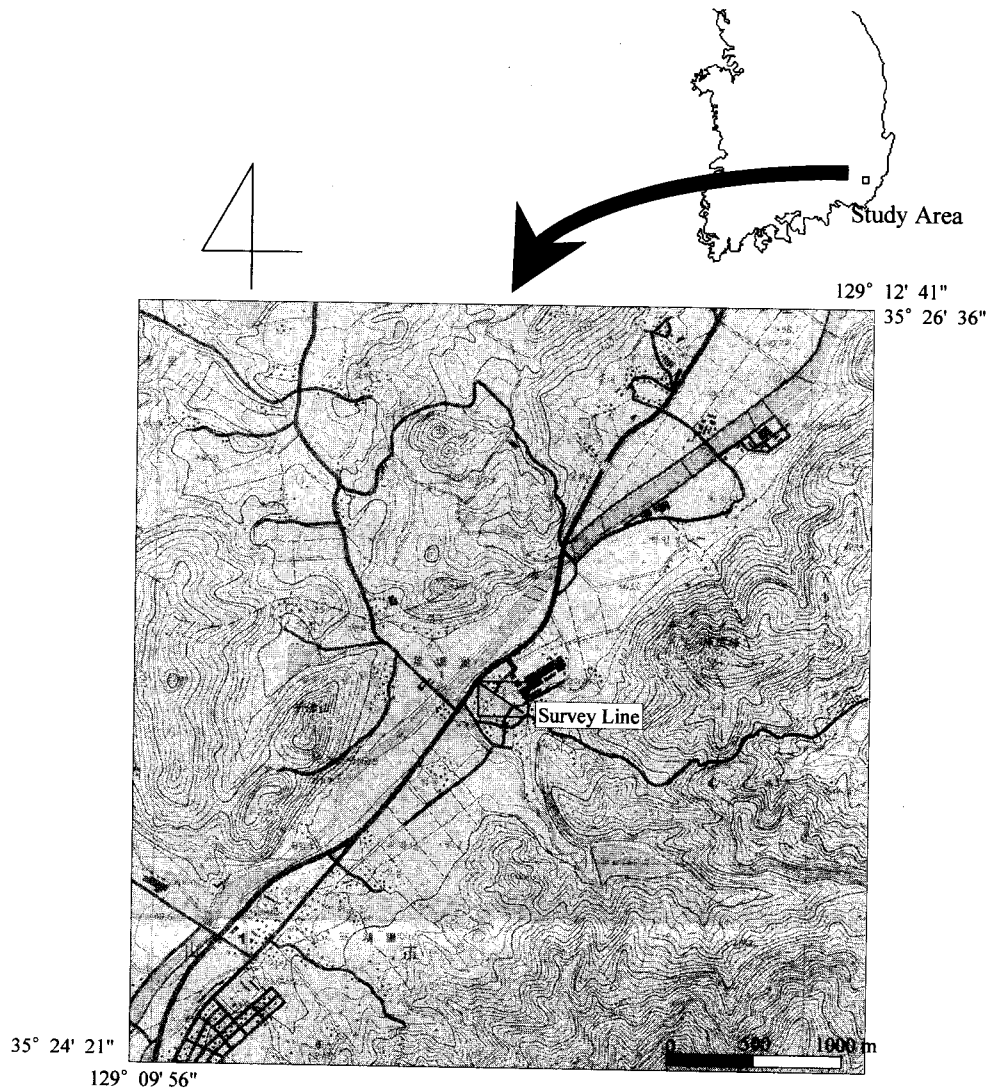


Fig. 1. Location map of the Yongdang-ri electrical resistivity survey area.

1966; Telford *et al.*, 1976) 전기비저항 탐사를 통하여 직접적으로 지하의 암상을 유추하기는 매우 어렵고 전기비저항의 상대적인 차이로부터 지하 구조를 알 수 있다. 일반적으로 파쇄대 혹은 단층대는 점토광물 및 지하수 등의 유체가 많이 함유되어 있고, 또 이렇게 존재하는 공극들은 서로 연결 상태가 좋기 때문에 전기를 잘 통하게 해주는 전도체 역할을 하여 주변보다 상대적으로 전기비저항이 낮다(Van Nostrand · Cook, 1966). 이러한 전기적 성질의 이상(anomaly)을 이용하여 지표에 노출되어 있지 않은 파쇄대 및 단층대 탐사에 전기비저항 탐사법이 많이 이용되고 있다(Bogoslovsky · Oglivy, 1977; Kim, 1981; Kim, 1982; 김인수 · 김종열, 1983; Olorunfemi *et al.*, 1986; 정승환 외, 1987; Lee, 1988; 김필선, 1989; 이성복, 1991).

본 연구는 양산단층계에 속하는 동래단층과 울산단층 주변 지역에서 쌍극자 배열법 전기비저항 탐사를 실시하여 단층작용에 의해 생성되었다고 추정되는 파쇄대(fracture zone)를 조사하기 위해 이루어 졌다. 현장 탐사는 각각 동래단층과 울산단층에 인접한 경상남도 양산시 웅상읍 용당리와 경북 경주시 외동읍 말방리 지역에서 이루어 졌으며, 탐사 측선은 해석의 용이를 위해 주 단층의 발달방향에 직교하는 방향으로 선택하였다(Kunets, 1966). 본 연구지역에 주로 분포하는 화강암류의 경우 공극률 및 투수율이 낮기 때문에 전기비저항이 높아 국부

적으로 존재하는 저비저항대의 의미는 지각변형에 의한 파쇄대의 발달에 기인하는 경우가 많으므로 전기비저항 탐사의 적용성이 높다. 야외탐사자료의 해석은 한국자원연구소에서 제작된 역산 프로그램(김정호, 1987)을, 분석해탈을 이용하여 그 신뢰도를 검토한 후(김건영, 1999) 사용하였다.

2. 탐사지역 지질 및 현장 탐사

용당리 지역은 행정구역상 경상남도 양산시 웅상읍 용당리에 해당하는 지역으로 울산에서 부산으로 이어지는 7번 국도에 인접한 마을이다(Fig. 1). 이 지역은 동래단층이 지나가는 지역으로(한국자원연구소, 1998), 주요 지질은 남동쪽의 백악기 주산 안산암질암과 북서쪽의 이를 관입하는 흑운모 화강암이 폭 1 km 미만인 계곡의 제 4기 충적층을 사이에 두고 분포하고 있다(이민성 · 강필중, 1964). 이 지역의 안산암류는 화강암류의 관입에 의한 영향으로 변질을 받아 암색이 백색 내지 담황색을 띠는 변질대가 다수 발달하고, 화강암류는 주로 흑운모화강암 및 화강반암으로 분포하며 이들 화강암류 들을 수조의 맥암류들이 관입하여 분포한다(Fig. 2). 제 4기 충적층은 계곡을 따라 분포하며 전담, 공장부지 및 택지로도 이용되고 있다.

양산단층 동쪽에서 양산단층과 평행하게 북북동-남남서 방향으로 발달하는 동래단층은 부산시의

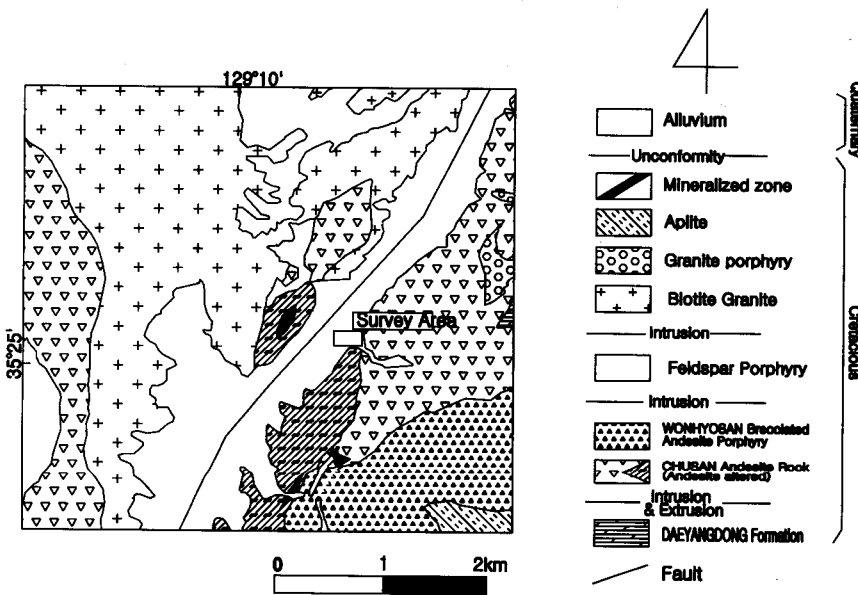


Fig. 2. Geological map of the Yongdang-ri area (After Lee, 1964).

동래에서 울산시의 서쪽을 지나 경주시 외동읍으로 이어지며, 울산시를 통과하는 태화강 이남까지는 7번 국도를 따라 발달하고 있다. 백악기 퇴적암층과 화산암층, 이들을 관입한 백악기말 화강암체를 자르며 발달하는 이 단층대의 특징은 북북동-남남서 방향의 골짜기가 단층선을 따라 단속적으로 발달하며, 북부에서는 직선이 아닌 굴곡된 양상으로 발달하고 있다(조용찬, 1997).

울산-부산을 연결하는 7번 국도에 바로 인접한

용당리 입구에서 마을 안쪽으로 연결되는 길을 따라 동래단층의 발달 방향에 직교하는 남동-북서 방향으로 300 m 측선을 설정하여 전기비저항 탐사를 실시하였다(Fig. 1). 탐사지점의 지질은 제 4기 충적층으로 구성되며, 탐사기기는 ABEM사의 Terrameter SAS 300C 기종을 이용하였으며, 전극 배열법은 2차원적인 탐사를 효율적으로 실시할 수 있는 쌍극자 배열법(dipole-dipole array)을 이용하였다. 1997년 11월 초순에 약 2주간 현장 탐사를

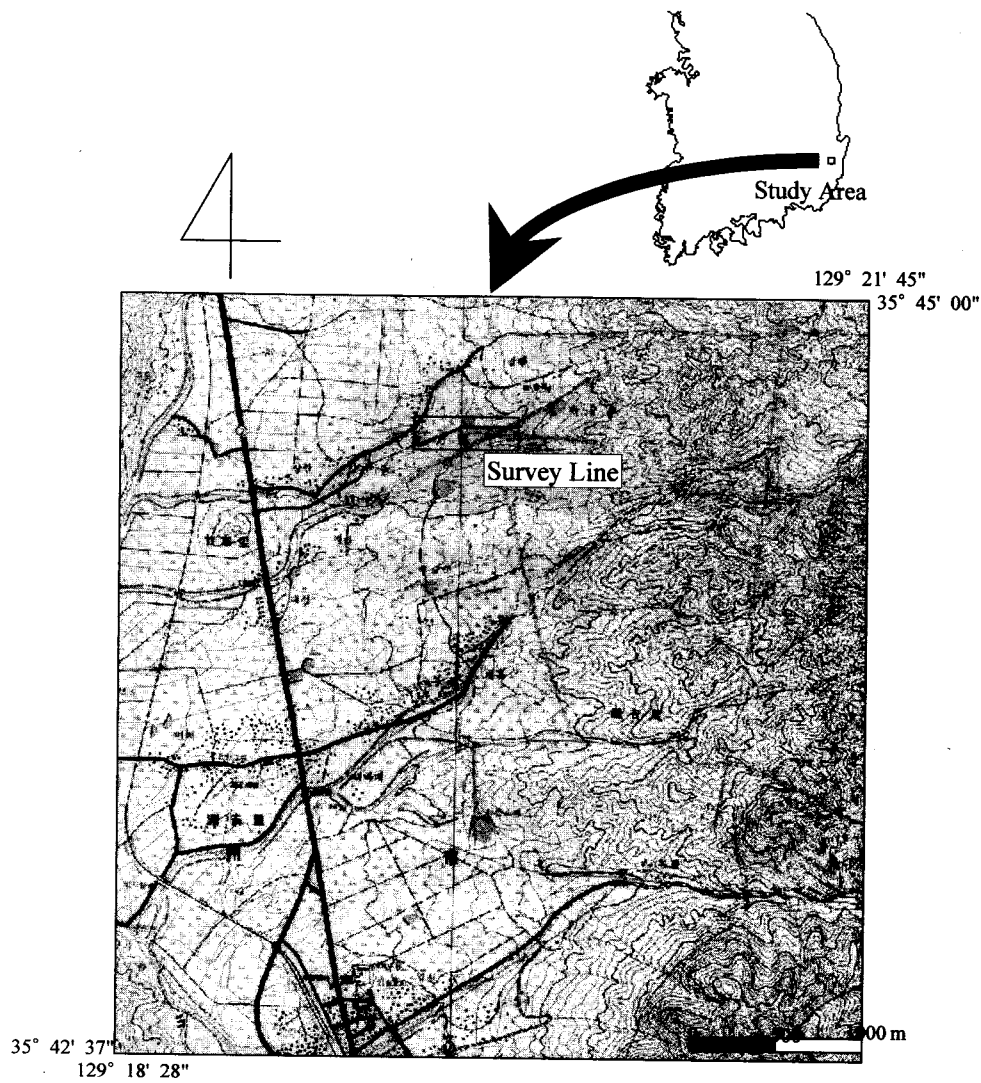


Fig. 3. Location map of the Malbang-ri electrical resistivity survey area.

실시하였고, 쌍극자 배열법에 있어서 전극간격은 6 m, 전극 전개수(number of separation)는 15이다. 탐사시기가 11월 초순으로 기후적으로 매우 건조한 시기였으므로 전극의 접지가 다소 불량하여 소금물을 주입하여가며 탐사를 실시하였다. 측선 근처에 조그만 언덕이 존재하나 대체적인 경사는 거의 수평에 가까워 지형적으로 따로 보정을 필요로 하지 않는다.

말방리 지역은 행정구역상 경상북도 경주시 말방리에 해당하는 지역으로 경주 울산간의 7번 국도에 인접한 마을이다(Fig. 3). 이 지역은 울산단층에 가까운 지역으로 주요 지질은 유천층군의 안산암, 불국사관입암군의 화강암류, 장석반암 및 염기성 암맥과 제 4기의 미고결 퇴적층으로 이루어진다(Fig. 4; 한국자원연구소, 1998; 최현일 외, 1980). 이 지역에 분포하는 최고(古)기 암석인 안산암은 화강암과 단층접촉관계로 소규모 분포한다. 이 암체 내에는 화강암의 관입의 증거가 되는 수조의 홍색장석 암맥과 수조의 흑운모 화강암 암맥이 발달하고 있다. 이 지역에 가장 넓게 발달하는 화강암류는 구성광물 및 조직에 따라 각섬석 흑운모

화강암, 흑운모 화강암, 홍색장석 화강암 및 반화강질 화강암으로 대략 분류할 수 있으나 이들 각 암체간의 경계가 점이적이어서 그 뚜렷한 경계면을 관찰하기가 매우 힘들다. 제 4기층은 기반암인 화강암과 화산암을 피복하여 저경사의 평탄면을 이루며 전답, 과수원, 공장부지 및 택지로 활용되고 있다.

울산단층은 울산과 경주를 잇는 불연속선(김종환 외, 1976; 원종관 외, 1978)으로 최현일 외(1980)와 김옥준 외(1980)에 의해 울산단층이라는 이름으로 명명되었으며, 울산단층대 또는 울산단층계(김인수·김종열, 1983) 등 구체적인 기재나 정의가 부족한 상태에서 명칭이 혼용되어 왔다. 본 연구에서 사용하는 '울산단층'은 경주시가지에서 양산단층으로부터 분기되어 북북서-남남동 방향으로 울산만까지 약 50 km 정도의 연장선을 갖는 단층대를 의미한다(한국자원연구소, 1998). 최근 울산단층을 중심으로 그 동측 지괴에서 입실 단층을 비롯한 제 4기 단층이 여러 개 발달하고 있는 것으로 보고되었다(류충렬 외, 1996, 1997).

말방리 안쪽에 있는 사곡저수지 사면에서는 울

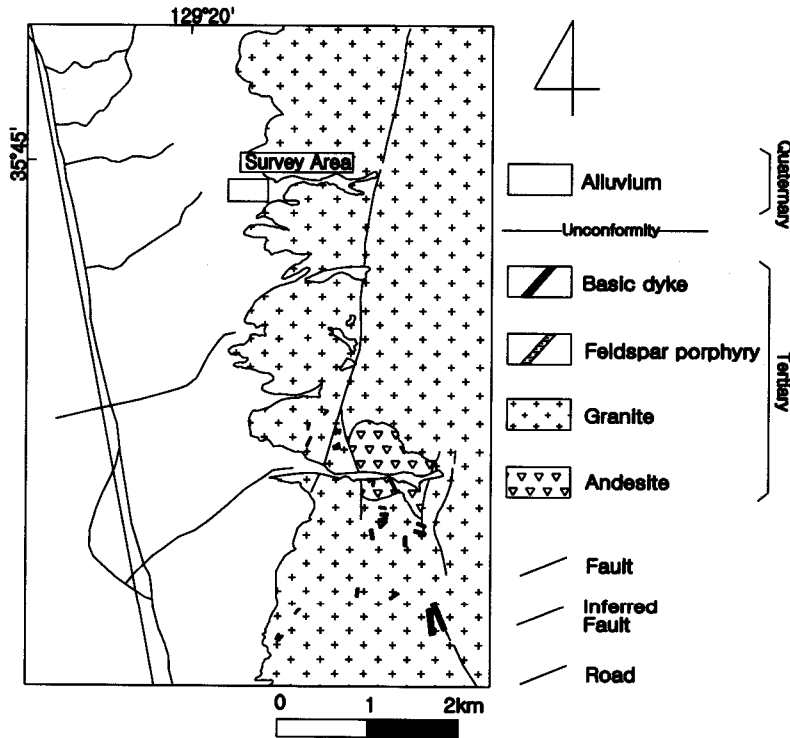


Fig. 4. Geological map of the Malbang-ri area (After KIGAM, 1998).

산단층대에서 처음으로 발견된, 아직 많은 논란의 여지가 남아있는 제 4기 단층이 보고되었다(류충렬 외, 1996, 1997). 또한 탐사지점에서 남동쪽으로 약 4 km 떨어진 입실리 계곡사면과 남동쪽으로 약 6 km 떨어진 모화리 원원사 계곡 사면에서도 제 4기 단층의 흔적발견이 보고되었다(한국자원연구소, 1998). 이렇게 주변에서 여러 단층의 흔적들이 발견되는 점을 근거로 하여 사곡저수지에서 남서쪽으로 약 1 km 떨어진 마을길을 따라 전기비저항 탐사를 시행하였다. 측선 주변에는 측사가 몇 군데 있고, 그 외에는 대부분이 논으로 되어있고, 탐사지점은 제 4기 충적층으로 구성되어 있다. 용당리 지역과 동일한 탐사기기를 이용하여 1998년 5월말 경에 약 10일간 현장 탐사를 실시하였다. 측선의 방향은 울산단층 및 여러 단층 흔적들의 발달방향인 북서-남동 방향에 직교하는 남서-북동 방향이고, 600 m 측선 상에서 전극간격은 10 m로, 전극 전개수는 10으로 하여 쌍극자 배열법 전기비저항 탐사를 시행하였다(Fig. 3). 탐사지역의 지형이 전체적으로 약간의 경사를 가지나 그 경사가 매우 완만하여 별도의 지형보정을 필요로 하지 않는다.

3. 탐사 해석 및 결과

용당리 지역의 자료를 역산한 전기비저항 단면도를 Fig. 5에 도시하였다. 54 m 지점 부근에서는 폭이 약 15 m 이하의 저비저항대가 수직으로 발달하는 것을 볼 수 있는데, 주변부분은 전기비저항이 1200 Ωm 이상으로 높게 나타나는 반면에 100 Ωm 이하의 낮은 저비저항대가 깊이 30 m 이상까지 존재하는 것으로 보아 단층 작용에 의해 생성된 파쇄대를 시사하고 있다고 할 수 있겠다. 전체적으로 비저항이 낮아 폭이 넓은 저비저항대가 존재하는 것처럼 보이는 240 m 지점에서 끝나는 탐사 당시 공터가 있던 곳으로 주변에 매설된 여러 물질들에 의한 영향을 일부 받은 것으로 사료되고, 인접한 곳에 개천이 발달하고 있었으므로 개천수의 유입 가능성도 배제할 수 없다. 또, 측선 끝 부분에서는 가장자리 효과를 무시할 수 없으므로, 이 지점에 대해 더 자세히 알기 위해서는 측선을 더 연장해서 탐사를 시행하여야 한다. 부분적으로 비저항이 낮게 나타나는 부분이 보이는 하나 이런 부분은 국부적인 저비저항대이고

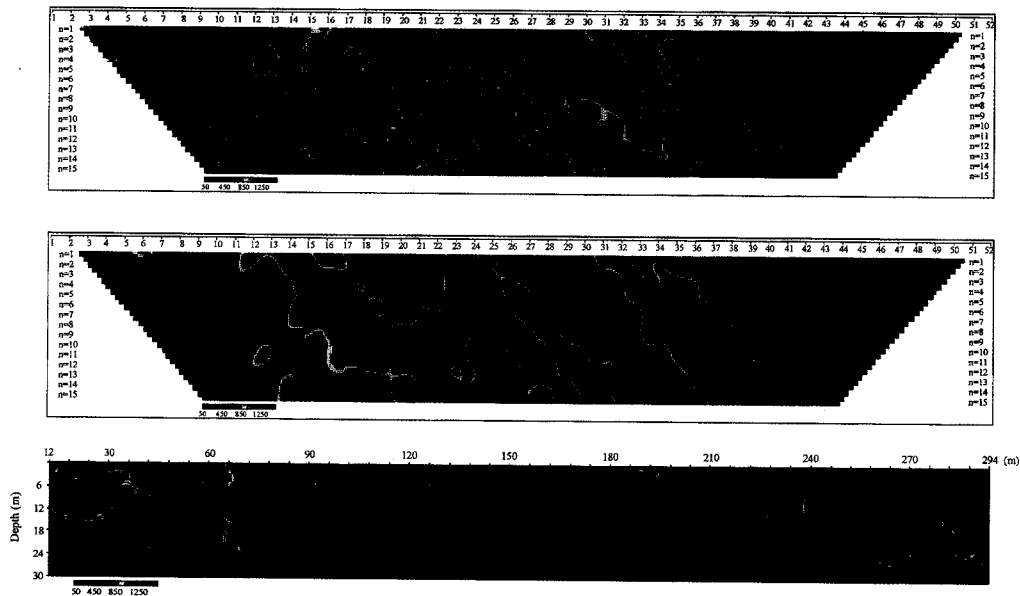


Fig. 5. Result of dipole-dipole array resistivity survey at the Yongdang-ri area using the dipole length of 6 m and 12 separations. In each box, measured apparent resistivity pseudosection (top), calculated pseudosection from the inverted section at bottom and resistivity image from two-dimensional inversion (bottom) are shown. The contour interval is 200 Ωm with 1800 Ωm maximum. Note that the vertical low resistivity zone that was interpreted as the fracture zone due to fault motion.

그 연장이 좋지 못하므로 파쇄대라고는 예측할 수 없고 부분적으로 어떤 다른 영향으로 인한 것으로 사료된다.

말방리 지역의 자료를 역산한 전기비저항 단면도를 Fig. 6에 도시하였다. 이 지역은 주로 주변에 눈이 많아 지표 근처 3~5 m 정도 깊이에서는 대부분의 지역에서 전기비저항이 낮게 나타나는데, 야외탐사 시기가 5월경이라 특히 지표부분과 지하 기반암 부분의 전기비저항의 차이가 더욱 두드러지게 나타나는 것으로 보인다. 이 지역에서는 220 m 주변, 또 445 m 주변 지역에서 폭이 약 20 m 이하의 저비저항대가 수직에 가까운 경사로 깊이 50 m 이상까지 발달하는데, 주변의 전기비저항이 1200 Ωm 이상으로 높게 나타나는 반면에 200 Ωm 이하의 저비저항대가 존재하는 것으로 보아 전기전도도가 높은 물질이 존재하는 것을 알 수 있으며, 이는 주변의 지질학적인 환경을 고려하였을 때 단층작용에 의해 생성된 파쇄대에 의한 결과로 사료된다. 즉, 말방리 지역의 전기비저항 탐사 결과 점토광물이나 지하수 등의 전도체를 다량 함유하고 있는 파쇄대로 추정되는 두 개의 저비저항대를 발견하였다.

4. 결 론

동래단층에 인접한 경상남도 양산시 용상읍 용당리 지역과, 울산단층에 인접하고 또 근처 산사면에서 말방리단층으로 명명된 단층대가 직접 발견되는 경상북도 경주시 외동읍 말방리지역 두 곳에서 2차원적인 지하구조를 알 수 있는 쌍극자 배열법(dipole-dipole array) 전기비저항 탐사를 실시하였고 역산 프로그램을 이용하여 분석하였다.

현장탐사는 용당리 지역에서는 남동-북서방향으로 300 m의 축선상에서, 전극간격을 6 m로 하여 실시하였고, 말방리 지역에서는 남서-북동방향으로 600 m의 축선을 선정하고, 전극간격을 10 m로 하여 탐사를 실시하였다. 각각의 탐사자료로부터 각 축선상의 2차원적인 전기비저항의 분포를 역산하였다. 용당리 지역 전기비저항 단면도에서는 하나의 저비저항대를, 말방리 지역 단면도에서는 두 개의 저비저항대를 발견하였다. 이들 저비저항대는 그 주변지역에 비해 상대적으로 매우 낮은 전기비저항을 보이고 주변의 지질학적인 배경이나 그 형태로 볼 때 단층작용에 의한 결과로 보이는 파쇄대로 해석하였다. 최종 판단은 시추나 트렌치에

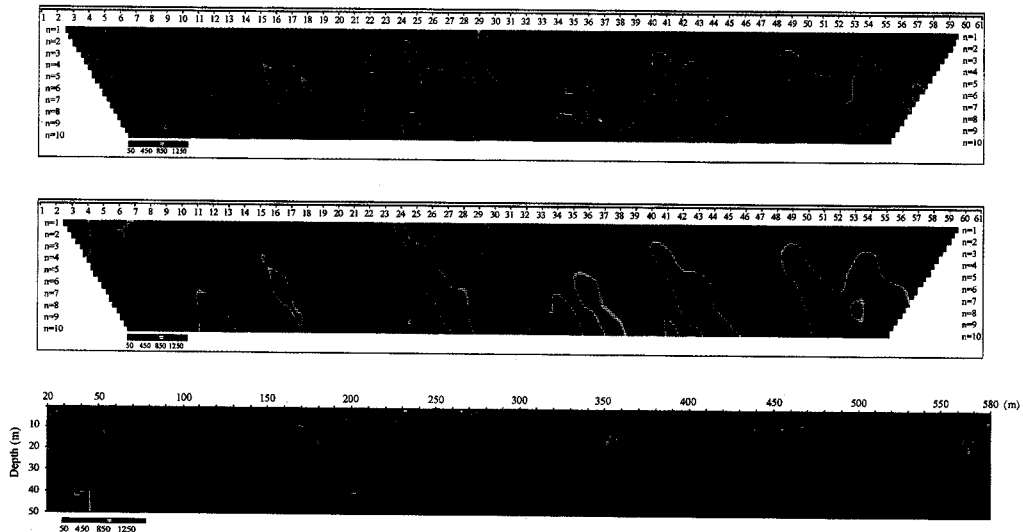


Fig. 6. Result of dipole-dipole array resistivity survey at the Malbang-ri area using the dipole length of 10 m and 10 separations. In each box, measured apparent resistivity pseudosection (top), calculated pseudosection from the inverted section at bottom and resistivity image from two-dimensional inversion (bottom) are shown. The contour interval is 200 Ωm with 1800 Ωm maximum. Note that two vertical low resistivity zones that were interpreted as the fracture zones due to fault motions.

의하여 확인되어야 하겠다. 또, 주위에 평행한 전기비저항 탐사 축선들을 추가하여 저비저항대의 3차원적인 배향에 대한 해석을 시도하거나 다른 물리탐사방법을 추가함으로써 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 1997년도 교육부 기초 과학연구소 학술연구조성비(과제번호: BSRI-97-5421)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김건영, 1999, 전기비저항 탐사법을 이용한 지하 천부 파쇄대 조사. 경북대학교 석사학위 논문.

김옥준, 정봉일, 엄상호, 장기홍, 박봉순, 강필중, 1980, 한반도의 지진지체구조에 관한 연구. 과학기술처.

김인수, 김종열, 1983, 경상분지 연양단층 지역에 대한 전기비저항 탐사연구, 광산지질학회지, 16, 11-18.

김정호, 1987, 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산. 서울대학교 박사학위논문.

김종환, 강필중, 임정웅, 1976, Landsat-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구, 지질학회지, 12, 79-89.

김필선, 1989, 전기탐사에 의한 음성퇴적분지 부근의 지하수조 연구. 충남대학교 석사학위논문.

류충렬, 양경희, 김인수, 1996, 울산단층 주변의 제 4기 단층: 활성단층인가?, 대한지질학회 제 51차 학술발표회 요약집, 79-80.

류충렬, 경제복 김인수, 1997, 울산단층대 동측의 신기지구조운동과 지형발달, 대한자원환경 지질학회 제 30차 학술발표회 발표논문요약집, 14.

원종관, 강필중, 이상현, 1978, 경상분지 구조해석과 Igneous pluton에 관한 연구, 지질학회지, 14, 79-92.

이민성, 강필중, 1964, 한국지질도 (1:50000), 양산도폭 지질보고, 국립지질조사소.

이성복, 1991, 논산 월성리 단층지역의 전기 비저항 탐사 연구. 공주사범대학 석사학위논문.

정승환, 김정호, 서재영, 1987, 탄전지역 단층, 파쇄대 탐지를 위한 전기 비저항 탐사 적용성 연구.

KR-87-11 연구보고서. 탐사기술개발연구, 동력자원연구소.

조용찬, 1997, 동래-외동지역 동래단층의 고응력장 해석. 경북대학교 석사학위논문.

최현일, 오재호, 신성천, 양문열, 1980, 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적 연구. 자원 개발 연구소.

한국자원연구소, 1998, 양산단층을 고려한 설계기준 지진의 재평가 최종보고서. 한국전력공사.

Bogoslovsky, V.A. and Ogilvy, A.A., 1977, Application of geophysical methods for the investigation of landslides, Geophysics, 28, 633-657.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C., 1966, Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon.

Kim, H.J., 1981, Studies on the resistivity inversion; 1. automatic interpretation of electrical resistivity sounding data, Journal of Korean Institute of Mining Geology, 14, 193-201.

Kim, Y.H., 1982, An example of a geophysical survey in an inferred fault area, The Journal of the Geological Society of Korea, 18, 73-82.

Kunets, G., 1966, Principles of direct current resistivity prospecting, Gebuder Borntager, Berlin.

Lee, D.I., 1988, An electrical resistivity study of the Gongju Pull-Apart Basin, M.E. Thesis, Chungnam National University.

Olorunfemi, M.O., Olarecaju, V.O., and Avci, M., 1986, Geophysical investigation of a fault zone-case history from left, southwest Nigeria, Geophysical Prospecting, 34, 1277-1284.

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

Van Nostrand, R.G and Cook, K.L., 1966, Interpretation of resistivity data, Geological survey Professional Paper 499, U. S. Government Printing Office, Washington.

Ward, S.H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, in Geotechnical and Environmental Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, I, 147-189.

1999년 2월 22일 원고접수
1999년 8월 27일 원고채택