

2차원 전기비저항 탐사를 이용한 경주 개곡리 지역의 단층조사

이치섭¹⁾ · 김희준²⁾ · 공영세²⁾ · 이정모³⁾ · 장태우³⁾

Investigation of fault in the Kyungju Kaekok-ri area by 2-D Electrical Resistivity Survey

ChiSeop Lee¹⁾, Hee Joon Kim²⁾, Young Sae Kong²⁾, Jung Mo Lee³⁾ and Chang Tae Woo³⁾

요 약 : 경주 개곡리 지역에서 단층 파쇄대와 지하 내부구조를 파악하기 위해 전기비저항 탐사를 실시하였다. 지층의 전기전도도 분포는 공극수의 함량, 지하수, 공극률 및 점토광물 등의 많은 요인에 의해 지배되고, 이러한 특징은 지층의 풍화상태와 정도, 단층 파쇄대를 간접적으로 설명하는 증거가 된다. 따라서 전기비저항 탐사는 지표에 드러나지 않아 그 연장성이 확실하지 않은 단층 파쇄대를 탐지하기에는 좋은 방법이다. 단층구조를 해석하기 위한 2차원 전기비저항 역산 기법으로 평활화제약 최소화승법을 이용하였고, 모형반응의 계산은 지형의 기복을 고려하기 위해 유한요소법을 사용하였다. 본 연구에 이용된 야외자료는 울산단층에 인접한 경주 외동읍 개곡리 부근의 제 4기 단층 파쇄대로 추정되는 곳에서 쌍극자배열을 이용하여 획득하였다. 이들 자료를 역산하여 전기비저항 2차원 단면도를 작성한 결과, 단층 파쇄대의 특징을 잘 보여주는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과, 경주시 외동읍 개곡리 제 4기 단층은 노두에서부터 총 50m까지 단층의 연장이 확인되었으며 그 연장 방향은 N80°W임이 밝혀졌다. 본 연구를 통해 단층 조사에 있어 2차원 전기비저항 탐사해석이 유용하게 적용될 수 있음을 보여주었다.

Abstract : Electrical resistivity survey has been conducted for delineating geological fault structure in Kaekok-ri near Kyungju. In general, electrical resistivity survey has an advantage of searching buried faults and its traces compared with other geophysical survey methods. Distribution of electrical conductivity in the ground is influenced by the ratio of pores, groundwater and clay minerals. These properties are evidenced indirectly to explain for weathering condition, faults and fracture zones. Thus the electrical resistivity survey can be an effective method to find buried faults. We have carried out two dimensional (2-D) interpretation by means of smoothness-constrained least-squares and finite element method. Field data used in this paper was acquired at Kaekok-ri, Woedong-eup, Kyungju-si, where is Ulsan Fault and is close to the region in which debatable quaternary fault traces were found recently. The dipole-dipole array resistivity survey which could show the 2-D subsurface electrical resistivity structure, was carried out in the area with three lines. The results showed good property of fault, fracture zone and fault traces which we estimated were congruous with the results. Through this study, 2-D electrical resistivity survey interpretation for fault is useful to apply.

Keywords : Electrical resistivity survey, fault, dipole-dipole array, FEM

서 론

대지에 인공적으로 전류를 흘려서 전극간의 전위를 측정하고 이로부터 지하 지질구조를 반영하는 전기비저항 분포도를 얻는 전기비저항 탐사는 경제적이면서도 비교적 정확한 결과를 제공해 주기 때문에 여러 목적으로 널리 사용되고 있다. 초기에는 금속광상이나 석탄 등의 자원탐사에 활용이 되어왔지만 최근 들어 환경에 대한 관심이 높아지면서, 환경문제 해결이나 지하공간 활용을 위한 기초 물리탐사로 그 응용성이 증

가하고 있는 추세이다.

지질구조와 단층대를 조사하기 위한 전기비저항 탐사는 많은 연구가 있어 왔다(Suzuki and Sasaki., 1992; 김건영, 1998; 손호웅 등, 1999). 일반적으로 암석과 지층의 전기비저항은 공극수의 전기비저항, 공극률, 점토광물의 함량 등의 많은 요인에 의해 지배되므로 전기비저항 분포와 지질구분이 바로 직접 대응하는 경우는 드물며, 같은 암종이라도 공극률이나 함수상태, 점토 함량에 따라 전기비저항 값은 달라지게 된다. 또한 전기비저항 분포가 지층의 풍화상태와 정도, 혹은 단층 파쇄대를

*2001년 7월 12일 접수

1) 부경대학교 응용지질학과(Pukyong National University, Dept. of Applied Geology)

2) 부경대학교 환경탐사공학과(Pukyong National University, Dept. of Environmental Exploration Engineering)

3) 경북대학교 지질학과(Kyungpook National University, Dept. of Geology)

반영하는 경우가 많다.

암반층의 단층 파쇄대는 주변보다 공극률이 크므로 물로 포화된 단층 파쇄대의 전기비저항은 상대적으로 낮아진다. 특히 점토를 많이 함유한 파쇄대는 명확하게 낮은 비저항대로 나타나며, 단층 폭이 작아서 탄성과 속도로 단층 그 자체를 탐지하기 어려운 경우라도 전기비저항 탐사를 통해 단층이 파악될 경우도 있다. 이러한 단층구조를 전기비저항 탐사로 밝히기 위해서는 단층 예상선과 직각으로 측선을 잡는 것이 중요하고,

자료해석은 그 측선에 대한 단면 해석이 바람직하다.

본 연구는 전기비저항탐사를 통하여 지하의 단층 파쇄대와 그 연장성을 밝히기 위해 지형조건을 고려한 평활화제약 (smoothness-constrained) 최소자승법을 이용한 2차원 역산기법으로 해석하였다.

현장 자료에 대한 이러한 방법들의 적용성을 검토하기 위해서 울산단층에 인접한 경북 경주시 외동읍 개곡리 일대의 제 4기 천부 단층 파쇄대를 가로질러 전기비저항 탐사를 실시하

4

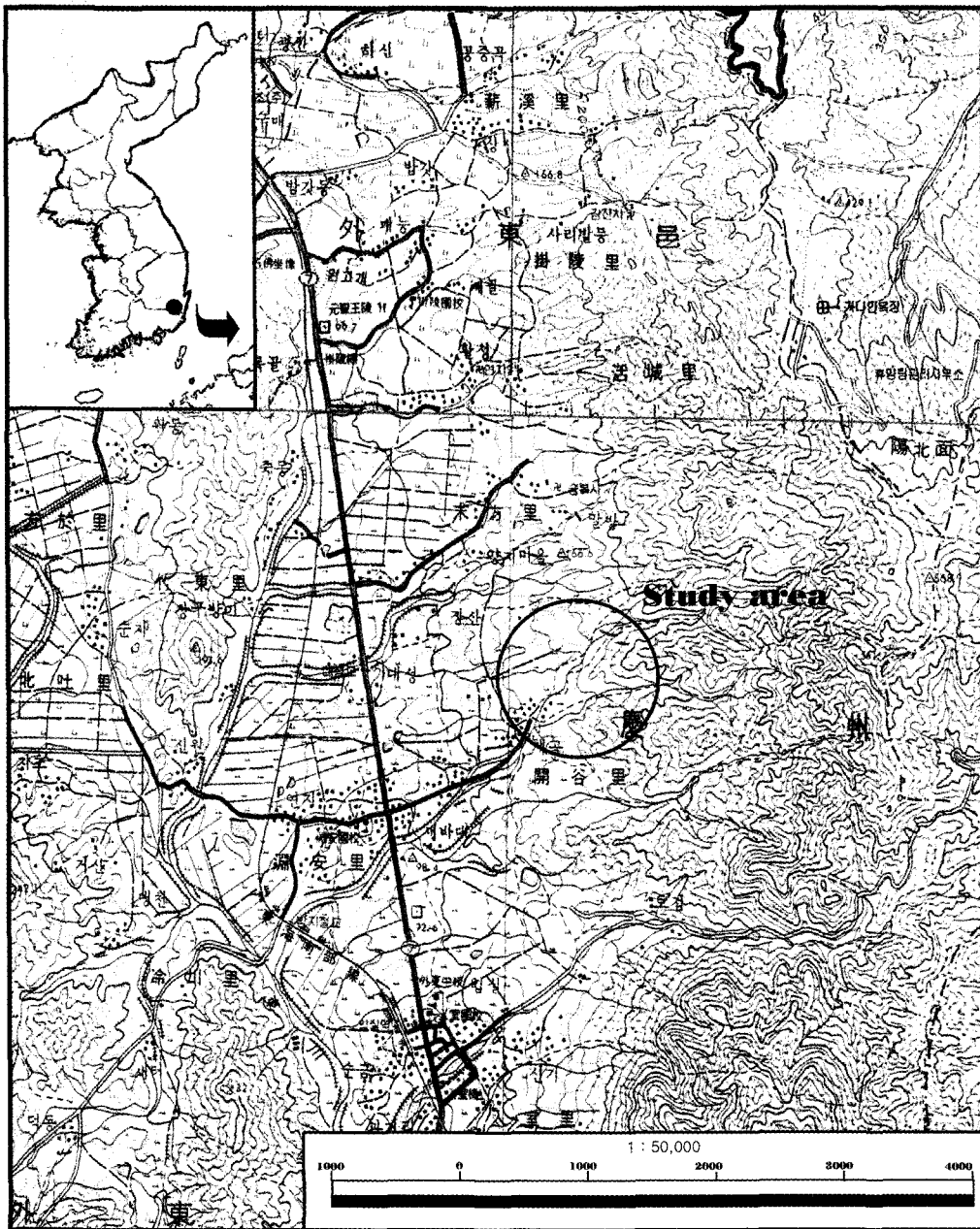


Fig. 1. Location map of the Kaekok-ri electrical resistivity survey area.

였다. 탐사에서는 전극 간격이 3 m인 쌍극자배열(dipole-dipole array)을 채택하였고, 길이가 100 m 내외인 3개의 측선에서 자료를 획득하였다. 그리고 앞에 기술한 방법들에 의해 전기비저항 2차원 단면도를 작성하여 지하구조 및 단층구조 해석을 실시하였다.

연구지역

연구지역의 지형과 지질

연구지역은 울산단층선으로 추정되고 있는 북북서 방향의 경주-울산간의 7번 국도를 중심으로 동쪽으로 1.5 km에 위치하고 있으며 행정구역상으로는 경상북도 경주시 외동읍 개곡리 일대에 해당한다(Fig. 1). 탐사지역 주변의 지형은 낮은 산지와 구릉으로 되어있고, 주변 일대에 고위, 중위, 저위의 개석(開析) 선상지의 단구면이 잘 발달하고 있으며 이러한 지형면을 절단하는 일련의 저단층애가 N-S 방향으로 약 3~5 m의 높이차로 발달하고 있다. 이러한 지형적 영향으로 주변지역의 대부분은 계단식 전담으로 이루어져 있으며, 측선 시작점에서는 SE 방향의 얇은 계곡이 형성되어 있다.

이 지역은 울산만과 경주시를 잇는 북북서 방향의 7번 국도 변의 계곡선을 따라 울산단층이라 명명된(최현일 등, 1980) 곳으로 주요 지질은 신생대 제 3기의 안산암, 화강암류, 장석반암 및 염기성 암맥과 제 4기의 미고결 퇴적층이 분포한다(Fig. 2). 이 지역에 분포하는 최고기 암석인 안산암은 화강암과 단층 접촉관계로 소규모 분포하며 전체적으로는 이 암체를 관입한 화강암체의 상위에 roof pendant형태로 분포하는 것으로 보고되어 있다(김건영, 1998). 이 암체 내에는 화강암의 관입의 증거가 되는 수조의 흑색 장석 암맥이 발달하고, 수조의 흑운모 화강암 암맥이 화강암을 관입하며 발달한다. 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 화강암과 화산암을 기반으로 하여 저 경사의 평탄면을 이루며 전담, 과수원 및 택지로 활용되고 있고, 탐사 지점 역시 제 4기의 층적층으로 구성되어있다.

울산단층은 울산과 경주를 잇는 불연속선(김종환 등, 1976; 원종관 등, 1978)으로 최현일 등(1980)과 김옥준 등(1980)에

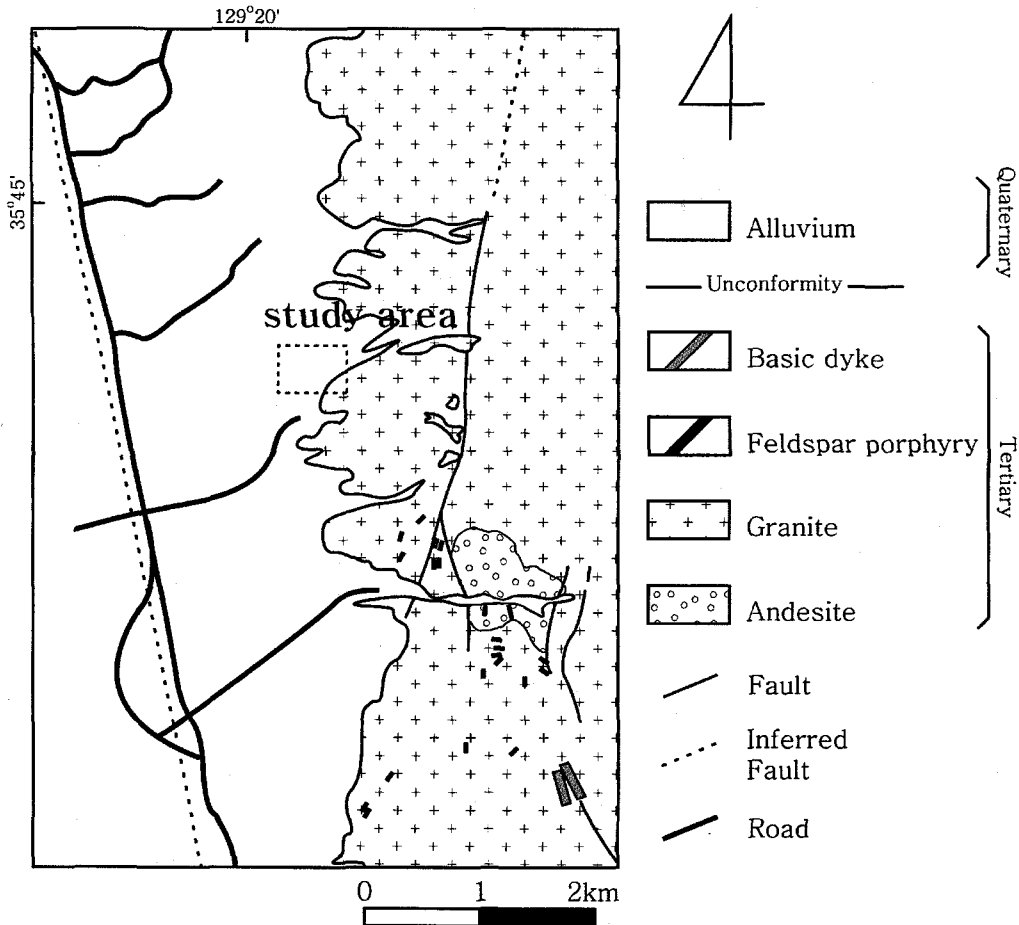


Fig. 2. Geological map of Kaekok-ri area (After Kim, 1998).

의해 울산단층이라는 이름으로 명명되었으며, 울산단층대 또는 울산단층계(김인수와 김종열, 1983) 등 구체적인 기재나 정의가 부족한 상태에서 명칭이 혼용되어 왔다. 본 연구에서 사용하는 울산단층은 경주시 북부에서 양산단층으로부터 분기되어 북북서-남남동 방향으로 울산만까지 약 50 km 정도의 연장선을 갖는 단층대를 의미한다. 최근 울산단층을 중심으로 그 동측 지괴에서 입실단층을 비롯한 여러 단층들이 발달하고 있는 것으로 보고되었다(류충렬 등, 1996; 1997). 이를 바탕으로 개곡리 지역에 발달하는 파쇄대와 그 연장성을 조사하기 위해 전기비저항 탐사를 실시하였다.

현장 자료 획득

경주시 외동읍 개곡리 지역(Fig. 1)에서 SE 방향으로 흐르는 얇은 계곡 측면의 단구면에서 발견된 단층을 토대로 단층의 흔적이 잘 보이는 노두로부터 그 연장으로 추정되는 주향방향에 대해 수직으로 3개의 축선을 설정하였다(Fig. 3). 지형은 복잡하지 않고 거의 평탄하지만 축선 중간에는 무시 못할 정도의 단구형 계단식 노두로 되어 있고, 축선 중앙을 가로질러 약 2 m 높이의 소단을 형성하고 있어, 탐사 자료 해석시 이러한 지형적 특징을 역산에 반영해야 했다.

정밀탐사를 위해 축선 간의 간격을 Line 1과 Line 2 사이는 7 m, Line 2와 Line 3 사이는 6 m로 설정하였다. 전극배열은

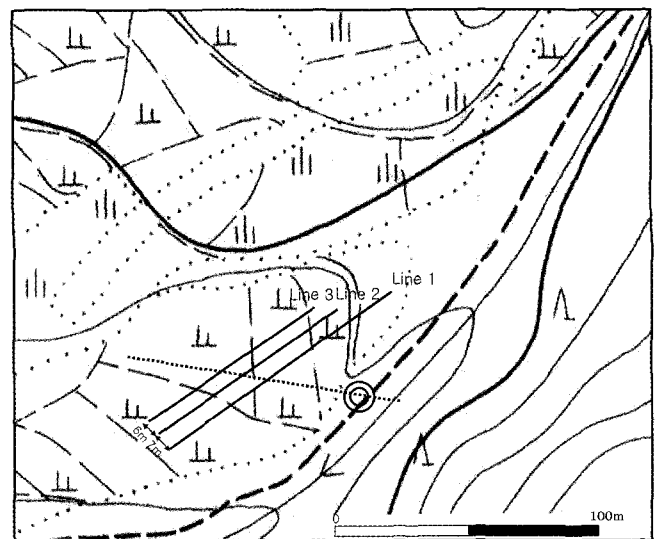
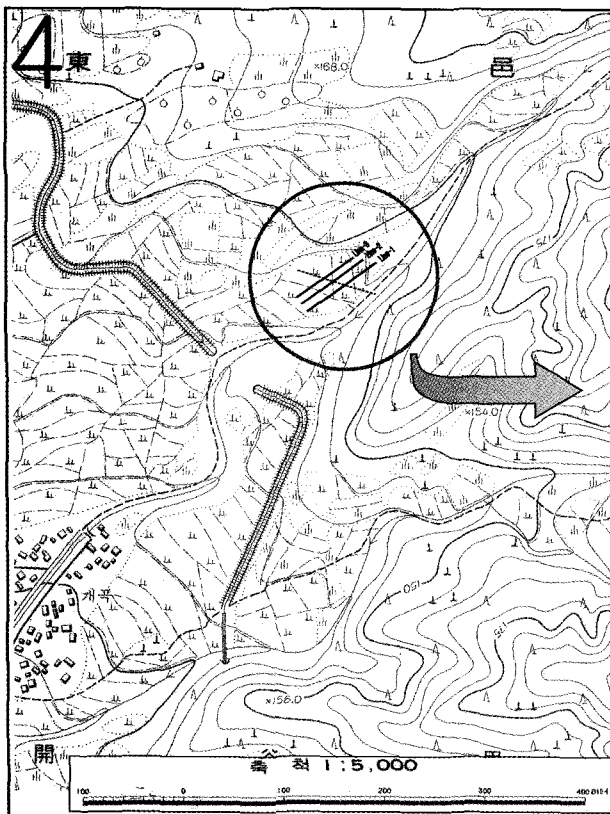
수직, 수평 탐사를 동시에 수행하는 효과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있고, 그 결과 2차원 해석이 용이하도록 가단면도를 형성할 수 있는 쌍극자배열을 이용하였다. 전극간격 (a)은 3 m, 전극 전개수 (n)는 11로 하여 정밀탐사가 가능하도록 하였다. 현장의 지형적인 특징인 단구의 위치는 Line 1에서는 절점 52번과 56번 사이에 위치하고, Line 2는 절점 72번과 76번 사이에, 그리고 Line 3은 절점 88번과 92번 사이에 위치하고 있다(Fig. 4).

본 연구의 전기비저항탐사 수행을 위하여 사용된 측정장비는 프랑스 IRIS사의 Syscal Junior 전기비저항 탐사기이다.

탐사자료의 모델구성과 역산방법

모델 구성

먼저 자료 해석을 위한 기본작업으로 예를 들어 Line 1의 경우 Fig. 4에서와 같이 수평방향의 절점 1~155번, 연직방향의 절점 1~25번으로 단면을 요소로 분할하고 수평방향의 4개의 요소와 연직방향으로 위에서 아래로 각각 3, 4, 5, 6, 6개의 요소를 합쳐서 블록으로 표현한다. 수평방향의 양측면과 수직방향의 하부측면의 블록은 크게 설정되어있다. 이는 전극으로부터 먼 수평방향과 연직방향의 심부는 자료의 감도가 작기 때문에 역산시 이를 고려하기 위함이다. 절점 12번부터 전극을



◎ : The location of the Quaternary fault outcrop

Fig. 3. Location map showing the survey lines at the Kaekok-ri area.

배치하여 절점 144번까지 34개의 점에 쌍극자배열로 전극을 배열해 나가며 현장에서 얻은 자료를 분석하게 된다. Line 2와 3의 경우도 마찬가지로 전극전개수에 따라 그 격자가 결정되며 역산을 위한 모델을 형성하게 된다.

전기비저항 탐사 자료에 포함된 지형의 효과를 고려하기 위해서 전기비저항 모델링에 유한요소법을 사용하였으며, 지표 지형을 잘 묘사할 수 있는 mesh를 만들었다. 3개의 축선을 가로 질러가는 각각의 단구의 높이를 측정한 결과, 그 높이는 약 2m이었다. 이러한 현장의 지형기복을 모델에 표현하면 Line 1의 모델에서는 절점 1번에서 52번까지 지표를 0m라 가정하고 52번과 56번 사이는 경사로 표시하고, 이후 155번까지는 2m로 설정하였다. 마찬가지로 Line 2의 모델에서는 72번과 76번 사이를, Line 3의 모델에서는 88번과 92번 사이를 경사로 설정하였다. 이로써 지표의 지형에 의한 전기비저항 값의 왜곡을 역산시 교정할 수 있도록 모델을 구성하였다.

역산방법

탐사자료의 해석에 있어서 쌍극자배열 탐사는 지표 천부의 수평적 전기전도도의 변화에 매우 민감하므로 그로부터 야기되는 이상대를 정확히 해석하지 못하는 어려움이 있다. 이는 쌍극자배열 탐사에 있어서 수직탐사가 갖는 큰 단점의 하나이다.

이번 연구에서는 이러한 결점을 해결하고 정량적인 해석과 지표 지형에 의해 왜곡된 물성치를 보정하기 위해서 비선형 문제를 반복적 최소자승기법의 하나인 평활화 제약 최소자승법을 사용하고, 앞서 탐사지역의 지형 기복을 적절하게 표현한 유한요소 블록구조를 구성하여 이를 역산 단계에서 함께 반영되어지도록 하였다(Kim, 1986; 1988; 1990). 현장자료가 지하 구조에 대한 반응을 얻는 것이므로 역산을 통하여 그 지하구조를 추정하고, 이때 현장자료와 계산된 자료를 비교하여 반복 검증함으로써 조사지역의 지하구조 해석을 하게된다. 즉, 현장자료와 계산자료의 차이가 최소가 될 때까지 반복하여 계산한다(齋藤正徳, 1983a; b; 松岡俊文, 1986).

또한, 역산에서는 비교적 간편하게 임의의 블록에서 전기비

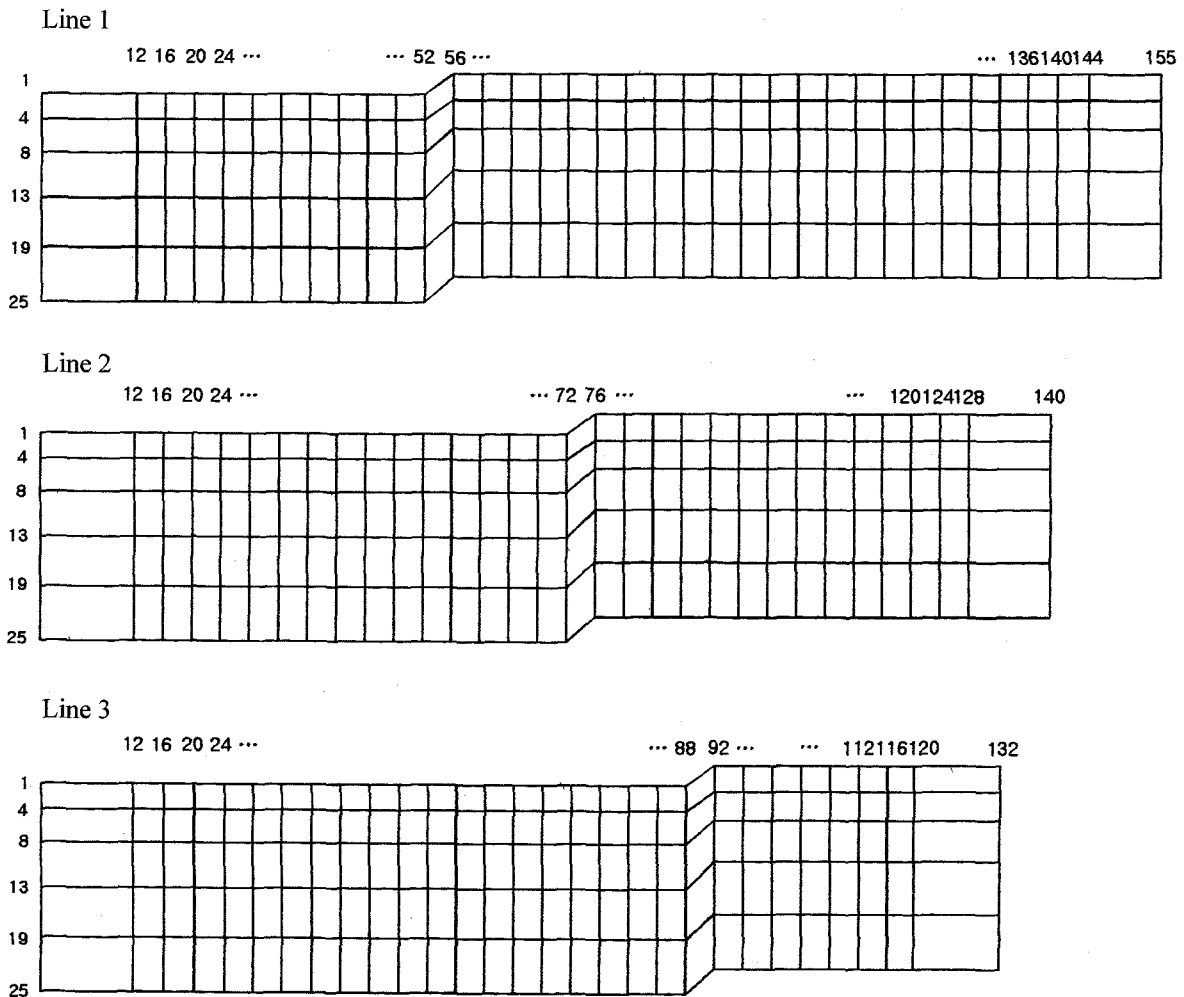


Fig. 4. Block structures and 2-D earth model.

저항 값의 범위를 제한할 수 있는 부등식 제약(inequality constraint)을 적용하였다(Kim *et al.*, 1999). 일반적으로 지반을 구성하는 지표층과 암석은 10,000 ohm-m 범위 내외이므로 본 연구의 역산에서는 모든 블록의 전기비저항이 $1 < \rho_i < 10,000$ ohm-m 범위에서 계산되도록 하였다.

결과 및 고찰

균질지반을 초기모델로 한 Line 1의 탐사자료의 평활화제약 최소자승법의 결과 단면(Fig. 5)을 보면 지표층을 기준으로 심도 2~5 m까지는 800~1,500 ohm-m 이상의 높은 전기비저항 값을 보여주며, 다음 약 9 m까지 200~800 ohm-m로 대체로 층상구

조를 보여준다. 그리고 측선 시작을 기준으로 33~84 m, 심도 9 m 이하는 전반적으로 100 ohm-m 이하의 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 보여준다.

Fig. 6 및 7은 각각 Line 2 및 Line 3에 대해 평활화제약 최소자승법으로 얻은 결과이다. (a)는 겉보기 비저항의 가단면도이고, (b)는 계산값을 나타내며 (c)는 역산결과를 나타낸다. Line 2의 경우(Fig. 6), 측선의 63 m에서 84 m, 심도 3 m 이하 10,000 ohm-m의 고비저항 이상대를 보여주고 있다. 마찬가지로 Line 3의 경우도 측선에서 43~78 m까지 약 10,000 ohm-m에 가까운 높은 비저항 이상대를 보여주고 있다. Line 1의 결과(Fig. 5)는 전반적으로 폭넓게 낮은 비저항 분포를 이루며, 특히 63~78 m 사이는 주변보다 특히 낮은 전기비저항

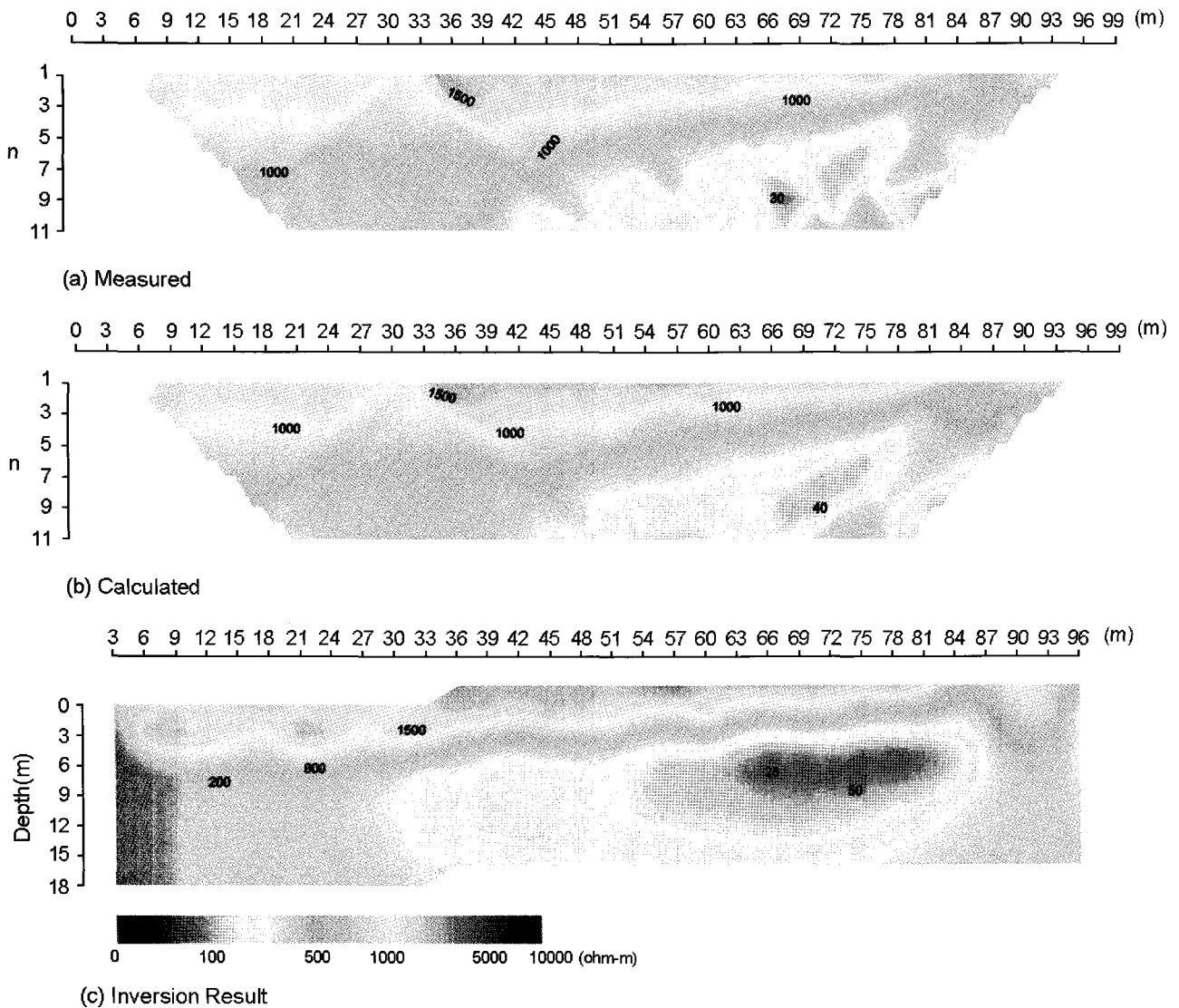


Fig. 5. The result of inversion which was executed by smoothness-constrained least-squares in homogeneous earth model (Line 1).

- (a) Apparent resistivity pseudosection.
- (b) Calculated resistivity pseudosection.
- (c) Resistivity section.

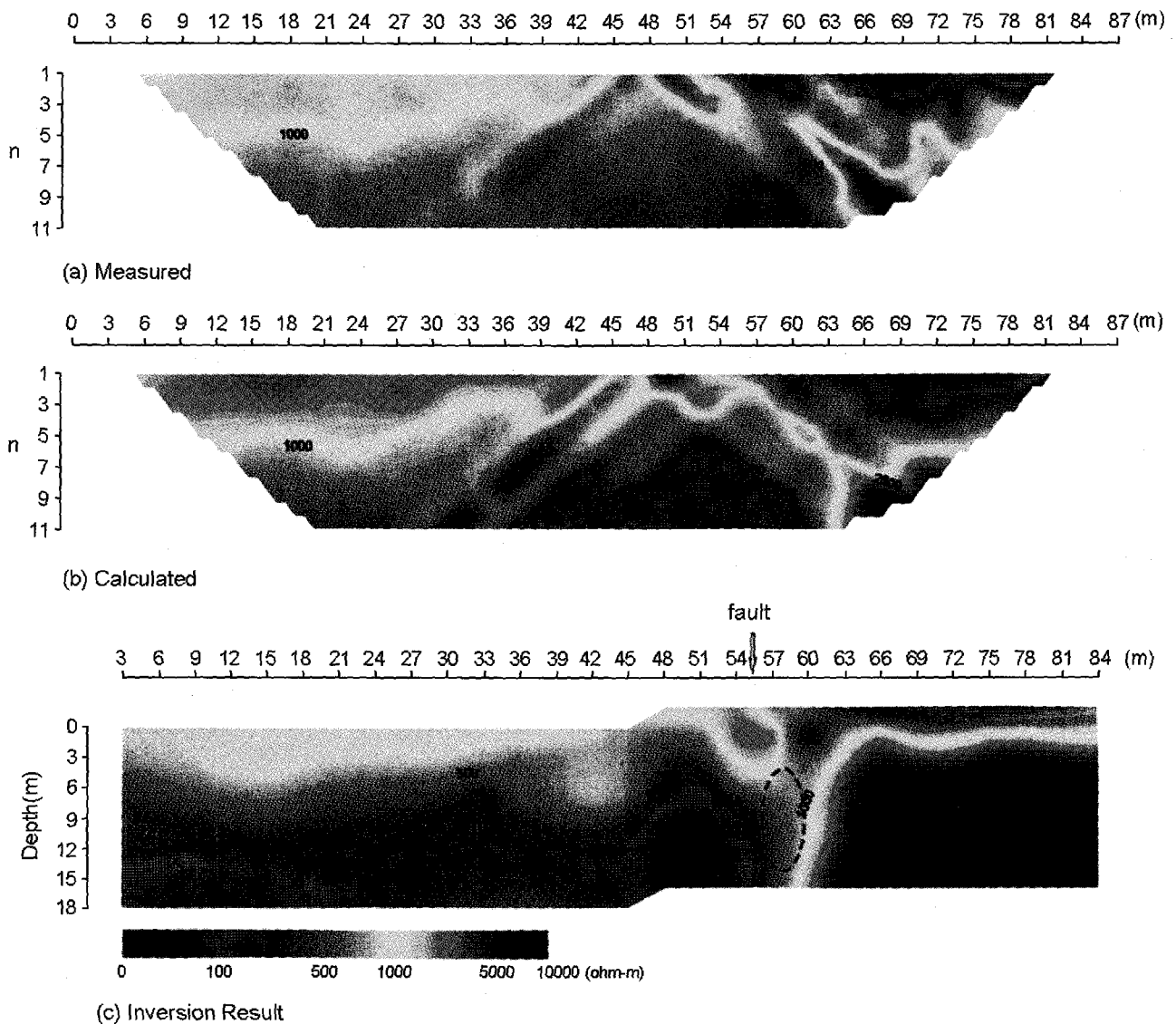


Fig. 6. Apparent resistivity pseudosection and resistivity section reconstructed by inversion analysis (Line 2).

- (a) Apparent resistivity pseudosection.
- (b) Calculated resistivity pseudosection.
- (c) Resistivity section.

이상대를 이룬다. 일반적으로 단층 파쇄대가 지나가는 지역은 지하수의 유입이나 점토함량이 많아지므로 상대적으로 전기비저항이 낮아져서 주변 지반의 전기비저항 값과 뚜렷이 구분되는 특징을 가진다(김건영, 1998; 손호웅 등, 1999).

이러한 특징적인 이상대를 나타내는 3개 축선의 결과단면을 고찰하면, Line 1의 축선 시작으로부터 63~78 m 사이, Line 2의 54~60 m 사이와 Line 3의 40~43 m 지점에서 단층 파쇄대가 지나가리라 추정되는데, 이들 세축선의 저비저항 지점을 연결하면 직선을 이루며, 그 방향은 N80°W로서 현장에서 발견된 노두의 단층지점과 만난다. 위의 결과를 바탕으로 탐사 지역의 3차원 단면과 전기비저항 탐사결과로부터 단층선을 도식하였다(Fig. 8). 각 전기탐사 축선 상의 단층지점들(Line 1의

63 m, Line 2의 55 m, Line 3의 43 m)을 연결하면 단층의 연장 방향을 파악할 수 있는데 그 방향은 N80°W이었다. 그리고 이번 조사에서 확인된 단층의 총 연장은 단층의 노두로부터 Line 3의 43 m 지점까지 적어도 50 m 이상인 것으로 해석된다. 이러한 전기탐사의 결과는 인접한 노두조사에서 확인된 단층방향 (N80°W, 65°SW; 장태우, 1999)과 일치한다.

Line 1의 경우, 전반적으로 낮은 전기비저항 분포를 보이는 것은 남동쪽 지형의 영향이 전기비저항값의 변화에 크게 작용하리라 생각된다. 또한 Line 1은 단층의 노두에서 가장 가까이 위치하고, 이 단층 노두부는 바로 얇은 개울측면에 위치해 있기 때문에 지형 뿐만 아니라 단층대를 따라 지하수의 영향을 가장 크게 받으리라 사료된다.

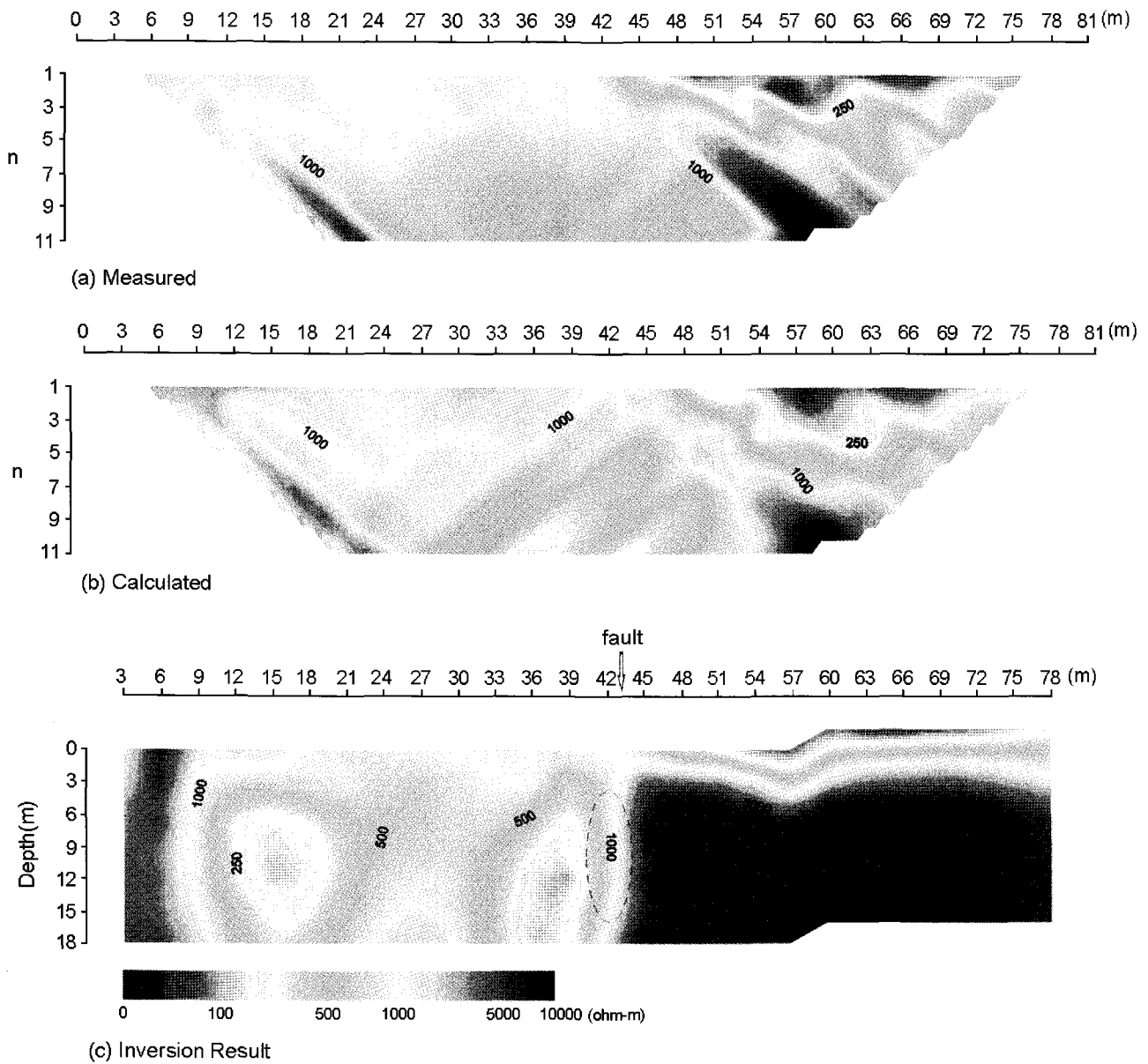


Fig. 7. Apparent resistivity pseudosection and resistivity section reconstructed by inversion analysis (Line 3).

- (a) Apparent resistivity pseudosection.
- (b) Calculated resistivity pseudosection.
- (c) Resistivity section.

결론

지질구조 및 단층 파쇄대를 조사하기 위한 물리탐사 중에 다른 탐사법에 비해 전기비저항 탐사를 이용하면 유리한 경우가 많다. 이는 전기비저항의 특성이 지층의 풍화상태와 정도 및 단층 파쇄대를 반영하는 경우가 많기 때문이다. 본 연구에서는 단층 구조를 밝히기 위해 전기비저항 탐사를 통해 2차원 구조 해석을 실시하였다.

현장 탐사는 울산단층 인근의 경주 외동읍 개곡리의 제 4기

단층이 지나가리라 추정되는 지점에서 3개의 측선을 설정하여, 전극 간격은 3 m, 전극 전개수(n)는 11인 쌍극자배열 전기비저항 탐사를 수행하였다. 탐사자료의 해석을 위해 평활화제약 최소자승법을 이용하였고, 역산시 지형의 기록을 표현하기 위해 지하를 유한요소 블록구조로 구성하고 이를 함께 계산되어 지도로 하였다. 이때 간편하게 임의의 블록에서 전기비저항값의 범위를 제한할 수 있도록 부등식 제약을 적용하였다.

3개의 측선에 대한 역산 결과는 단층 구조를 잘 보여주는 것으로 나타났다. 즉 각 측선에서의 2차원 해석 결과, 뚜렷한 지

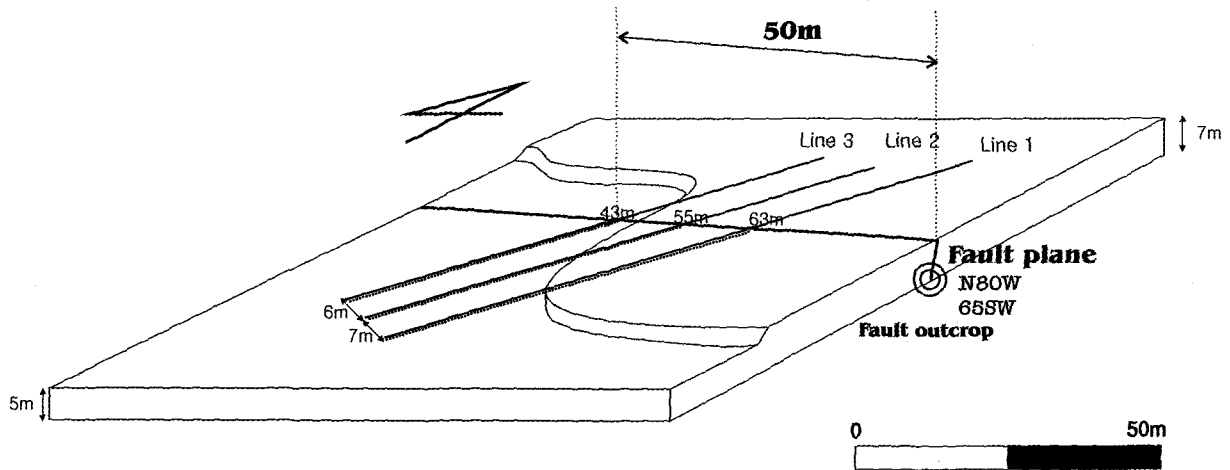


Fig. 8. A sketch of the study area and fault plane.

비저항대와 고비저항대로 양분되는 모습을 보여주었으며 그 경계를 단층으로 판단할 수 있었다. 그리고 이 제 4기 단층은 N80°W의 방향으로 최소한 50 m까지 연장되어 있음이 급변 전기비저항 탐사에 의해 확인되었다.

사 사

연구지역의 지질정보 및 현장자료 획득에 도움을 주신 경북 대학교의 김태경씨에게 감사드린다. 이 연구는 1999년도 학술진흥재단 기초과학 연구지원 학술연구(과제번호: 1999-015-DI0110)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

김건영, 1998, 전기비저항 탐사법을 이용한 지하 천부 파쇄대 조사: 이학석사학위논문, 경북대학교 대학원.
 김옥준, 정봉일, 엄상호, 장기홍, 박봉순, 강필중, 1980, 한반도의 지진지체구조에 관한 연구: 과학기술처.
 김인수, 김종열, 1983, 경상분지 언양단층 지역에 대한 전기비저항 연구: 광산지질학회지, 16, 11-18.
 김종환, 강필중, 임정웅, 1976, Landsat-1 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광상과의 관계 연구: 지질학회지, 12, 79-89.
 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: 대한자원환경지질학회 제 30차 학술발표회 발

표논문요약집, 14, 79-92.
 손호웅, 윤혜수, 오진용, 1999, 전기, 전자탐사에 의한 경주남부(입실지역)의 울산단층 심부구조: Econ. Environ. Geol., 32, 161-167.
 원종관, 강필중, 이상현, 1978, 경상분지 구조해석과 Igneous pluton에 관한 연구: 지질학회지, 14, 79-92.
 장태우, 1999, 울산단층 동쪽지괴의 제 4기 단층운동: 제 54차 대한지질학회 추계학술발표 논문요약집, 25-26.
 최현일, 오재호, 신성천, 양문열, 1980, 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적 연구: 자원개발연구소.
 齋藤正徳, 1983a, 最小二乗法の 計算法: Butsuri-Tanko (Geophys. Expl.), 36, 24-35.
 齋藤正徳, 1983b, 特異値分解 と 最小二乗法: Butsuri-Tanko (Geophys. Expl.), 36, 36-48.
 松岡俊文., 1986, インバージョンにおける數値解法: Butsuri-Tanko (Geophys. Expl.), 39, 14-30.
 Kim, H. J., 1986, Two-dimensional resistivity modeling by finite element method: J. Korean Inst. Mining Geol., 19, 283-292.
 Kim, H. J., 1988, Two-dimensional inversion for dipole-dipole resistivity data: J. Korean Inst. Mining Geol., 21, 107-113.
 Kim, H. J., 1990, Two-dimensional resistivity inversion with smoothness constraint: J. Geol. Soc. Korea., 26, 12-17.
 Kim, H. J., Song, Y., and Lee, K. H., 1999, Inequality constraint in least-squares inversion of geophysical data: Earth Planets Space, 51, 255-259.
 Suzuki, K., and Sasaki, Y., 1992, Application of 2-D inversion analysis of resistivity method for survey of fault under alluvial deposits: Butsuri-Tansa (Geophys. Expl.), 45, 81-95. (in Japanese)