

## 풍화사면에서의 추정파쇄대 평가를 위한 2차원 전기비저항 구조도 적용 기법

김재홍<sup>1\*</sup> · 박철숙<sup>2</sup> · 이현재<sup>3</sup> · 정교철<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국수자원공사 Kwater연구원, <sup>2</sup>한국수자원공사 성덕댐건설단, <sup>3</sup>지오사이언스, <sup>4</sup>안동대학교 지구환경과학과

### Application Techniques of 2D-Resistivity Structure for Estimation of Inferred Fracture Zone in Weathered Slope

Jae-Hong Kim<sup>1\*</sup>, Chal-Sook Park<sup>2</sup>, Hyun-Jae Lee<sup>3</sup>, and Gyo-Cheol Jeong<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation,

<sup>2</sup>Seongdeok Dam, Korea Water Resources Corporation, <sup>3</sup>CEO, Geo-Science Corp.

<sup>4</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

전기비저항 탐사는 최근 토목설계 및 환경분야에 있어서 단층 및 파쇄대의 탐지 등에 활발히 적용되고 있다. 국내에서는 지금까지 시공실적이 없는 직경 15 m 3열의 터널 굴착공사를 시행하는 도중 터널 유입부 지반이 당초 설계와 달리 기반암선이 낮게 형성되었고, 풍화된 사면에 핵석과 파쇄대가 존재하는 것으로 나타났다. 터널 유입부 지반의 분포양상을 정확히 파악하고자 전기비저항 쌍극자탐사를 시행하였다. 전기비저항 탐사는 암석의 종류, 공극, 온도 및 지질적 순환과정 등을 통하여 외견비저항 값이 많은 변화를 보인다. 역산해석 후 전기비저항치에 의한 지반특성을 파악하였고 유한차분법을 활용한 2차원 전기비저항 구조도를 적용하여 파쇄대를 추정하였다.

**주요어** : 전기비저항탐사, 파쇄대, 역산해석, 2차원 전기비저항 구조도

Electrical resistivity survey is applied for estimation of inferred fault and fractured zone in civil engineering and environment field. While 15 m diameter and 3 lines tunnels are excavated. It is recognized that core stone and fractured zone is existed in the weathered slope of the entrance to a tunnel. To make confirmation geological characteristics, dipole-dipole electric resistivity survey was carried out in weathered slope of the entrance to a tunnel. Core stone distribution and fracture zone characteristics are estimated by reverse analysis and 2D-resistivity structure using FDM.

**Key words** : electrical resistivity survey, fracture zone, reverse analysis, 2D-resistivity structure

### 서 론

최근 기상이변으로 인한 이상홍수로 댐 저수위가 계획 홍수위에 접근하고, 집중강우시 가능최대홍수량(PMF)이 댐 건설시에 비해 두 배 가까이 증가하여 기존 여수로의 방류 능력으로는 증가된 홍수량에 대한 배제능력이 부족한 것으로 나타난 댐에 대한 치수능력 증대사업의 일환으로 경북지역 소재의 댐에 터널형식의 비상여수로 공사를 시행도중 터널 유입부 지반이 당초 설계와 달리 기반암선이 낮게 형성됨을

알 수 있었다.

유입부는 비상여수로 터널 방류시 4 m/sec 이상의 유입속도로 굴착사면의 안정성이 무엇보다 중요시 된다. 암반사면의 경우 다수의 불규칙한 패턴의 불연속면들이 내재되어 있는 불연속체로써 암반 내에 존재하는 절리는 암반의 수리적, 역학적 거동을 좌우하는 중요한 요소로써 이러한 특성들은 각각 다르게 나타날 수 있다.

절개사면은 토사부의 파괴보다 토사하부 암반내에 존재하는 연약한 불연속면을 따라 파괴가 발생하는 것이 일반

\*Corresponding author: kjhpmk@kwater.or.kr

적이다. 또한, 사면파괴는 퇴적암의 층리와 변성암의 엽리에 규제된 파괴, 단층 파쇄대를 따른 활동파괴, 토사사면 내에 잔존되어 있는 불연속면을 따라 파괴 및 상이한 지층의 경계부에서 파괴등으로 복잡한 지질적 특성에 관련하여 발생된다(이창섭, 2007)

이런 사유로 불연속면의 물리적 특성과 파쇄대의 존재등을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 불연속면은 함수비 증대에 따른 내부마찰각 감소 및 간극수압 증가로 인한 전단 강도 감소 등이 파괴의 원인으로 볼 수 있다(2007, 박종오).

사면에서의 지구물리 탐사는 일반적으로 산사태 지역의 지질구조와 기반암 상부에 존재하는 풍화대의 두께에 대한 정보를 얻기 위해 적용되어 진다(Jomard et al., 2007; Saas, 2008)

개략적인 육안 관찰결과 입자가 대부분 거정질의 임하화강암이며 이로 인해 입자의 표면적이 넓어 파쇄대, 지하수 및 지표수 유입에 의해 쉽게 풍화 또는 산화될 수 있는 지질학적 지반특성을 나타나는 것으로 판단되었다.

이상대 파악을 위한 물리탐사 기법 연구로는 암반사면 사태의 원인 규명을 위한 전기비저항 탐사(황학수 외, 2001)와 노두에 관찰되는 단층과 관입망의 발달 양상을 파악하기 위한 물리탐사 기법을 적용하여 지반특성을 연구(김지수 외, 2005) 있다.

본 연구는 차별 풍화가 심한 사면에 존재하는 파쇄대를 추정하기 위하여 전기비저항 탐사를 실시하여 역산해석 후 2차원 비저항 구조도로 적용하기 위한 기법을 연구코자 하였다.

### 지형 및 지질

#### 지형

연구대상 지역은 국립지리원 발행의 축척 1/50,000

중평동지질도폭(도엽번호 SHEET 6923- I)의 하단 중앙부에 해당된다.

산계는 대상지역의 동측에 위치하는 아기산(588.9 m)을 최고봉으로 하고 지형발달 윤희상 장년기에 해당된다. 수계는 산계로부터 발원한 소지류들이 계곡부를 따라 발달하고 있으며, 대체적으로 이수지상(subdendritic pattern)-직각상(rectangular pattern)의 양상을 나타내고 있다.

#### 지질 및 지질구조

지질은 소위 임하화강암을 기반암으로 하고 이들 상위에 제4기 충적층과 풍화산류토 그리고 산록퇴적물로 이루어져 있다. 연구대상지역 동쪽으로 남-북 방향의 안동 전단대가 발달하고 남쪽으로 동-서방향의 단층대가 발달하고 터널 유입부 또한 이들 전단대의 직, 간접적인 영향권내에 위치하였다(Fig. 1).

임하화강암은 연구지역 대부분을 차지하고 있으며, 회백색을 띠고, 거정질 내지 조립질의 등입상 조직을 띠며, 육안 관찰상 석영, 정장석, 흑운모 그리고 소량의 각섬석으로 구성되어 있으며 과입지역 내에서의 노출되어 있는 본 암은 대부분 마사토화되어 있고, 차별풍화작용에 의한 핵석 발달과 소규모 산성 암맥을 수반하기도 한다.

토사층은 풍화산류토 기원의 굵은 모래 그리고 마사토가 주 능선부에 발달되어 있고, 충적층은 계곡부에 국한되어 분포하고 있으며 현재 경작지로 이용되고 있다. 암반 노출부의 육안 관찰 결과 임하화강암 입자가 대부분 거정질이고 이로 인해 입자의 표면적이 넓어 파쇄대, 지하수 및 지표수 유입에 의해 쉽게 풍화 또는 산화될 수 있는 지질학적 지반특성을 나타나는 것으로 판단되었다.

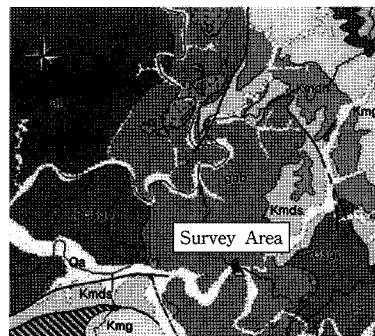
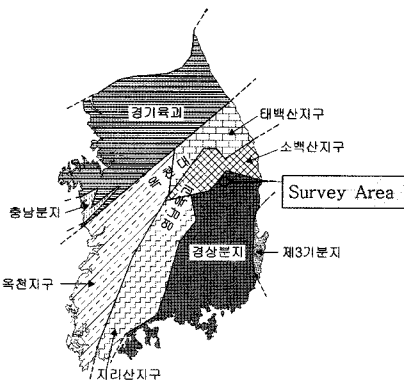


Fig. 1. Survey site and geographical map of study area.

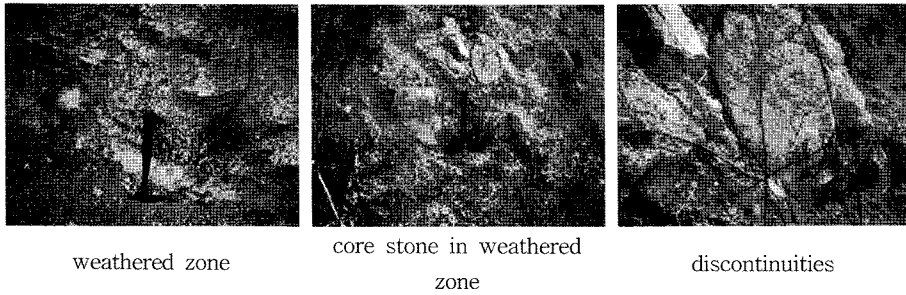


Fig. 2. State of outcrops in study area.

지질현상에 의한 전기비저항의 변화

전기비저항탐사는 시추와 같이 특정 지점의 지하 매질에 대한 정보만을 주는 것이 아니라 측선을 전개한 모든 구간에 대한 비저항단면을 작성함으로써 지하매질의 수직적인 변화는 물론 측방 변화에 대한 정보를 제공한다. 암석들은 종류에 따라 고유한 범위의 전기비저항을 가지고 있으며, 이러한 비저항은 여러 지질현상에 의해 영향을 받게 된다. 그 중 대표적인 것이 암석내의 유체 함량 및 공극의 연결성(투수성), 이온농도 및 온도 등이다.

유체의 함량과 공극의 연결정도는 지질학적 변형작용(파쇄)에 크게 좌우되는데, 암석의 파쇄는 지표수의 유입을 원활하게 하며 이렇게 유입된 지하수는 암석의 풍화를 촉진하게 된다. 한편 변성 및 변형작용을 수반하는 다양한 지질작용에 의해서 암석을 구성하는 입자간 결합력이 약해지면 지표수의 유입 통로가 되는 불연속면들이 발달하고, 이렇게 유입된 지하수에 의해 암석의 풍화와 파쇄는 가속된다. 파쇄가 심하게 발달한 곳에서는

Table 1. Change characteristics of electricity specific resistance by soil phenomenon.

Soil phenomenon	Change of resistivity	
	up	down
clay change		□
weathering		□
melting		□
hardening	□	
Fault		□
fracture -zone		□
shear		□
sea water		□
silicate	□	
carbonate precipitation	□	
metamorphism	□	□

암석을 구성하는 이온들이 지하수와 반응하여 쉽게 용출되어 전기전도도를 높이며, 이것은 역으로 전기비저항이 낮아지게 되는 결과를 나타낸다.

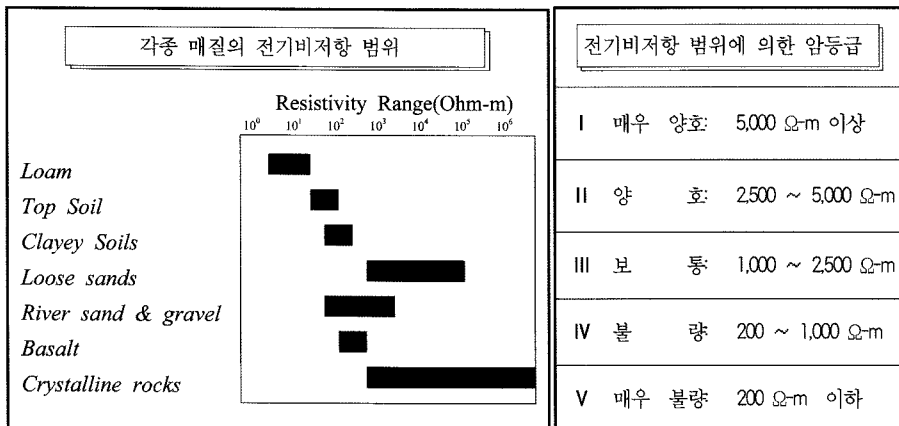


Fig. 3. Resistivity range in geological materials.

Table 1은 여러 지질현상에 따라 전기비저항의 변화를 나타낸 것으로 실리케이트화 작용, 변성작용과 같이 암석을 경화시키는 작용은 비저항을 증가시키며, 변질 내지 단층작용 등은 암석의 비저항을 감소시킨다.

## 탐사 계획

### 탐사장비 및 본 탐사 축선 설정

탐사는 미국 AGI사 제품인 AGI Mini Sting모델과 AGI Super Sting R1/IP모델을 사용하였으며, 비상여수로 터널 유입부 상부 지반에 대한 전반적인 지하구조를 파악하기 위해 터널 유입부 상부 계획사면 좌·우측 끝과 터널중단 방향을 기준으로 하여 축선을 격자화하여 탐사를 수행하였으며 터널횡단방향으로 4축선(DD-1~4), 터널중단방향(DD-5~10)으로 6축선 총 10축선을 현장 여건을 고려하여 전개하였다. 전기비저항 쌍극자탐사 축선은 Table 2 및 Fig. 4와 같이 총 10축선을 대상으로 총 1,038m에 걸쳐 실시하였다.

## 결과 및 해석

### 해석 계획

토사, 풍화암, 발파암의 분포상태 및 단층 파쇄대 또는 풍화대 등의 이상대를 파악하기 위하여 현장에서 측정된 외견비저항치(apparent Resistivity)를 이용하며 야외자료 가단면도(FDP: field data pasedosection), 이론자료가단면도(TDP: theoretical data pasedosection)를 작성하여 역산해석을 시행하였다.

유한차분법을 활용한 2차원자동역산을 수행하여 터널 및 설계시 시행한 시추조사를 포함하여 2차원 비저항구조도(2DRS: 2-Dimensional resistivity structure)를 칼라 영상화하여 도시하였다.

해석은 본 연구에 사용한 전기비저항탐사 장비(Super sting R1. AGI)의 전용 해석 프로그램인 Earth-image로 하였고, 이 프로그램에서 이용된 일련의 역산 과정(inversion routine)은 수평·수직 병행탐사 자료에 대한 smoothness-constrained least-squares method (de Groot-

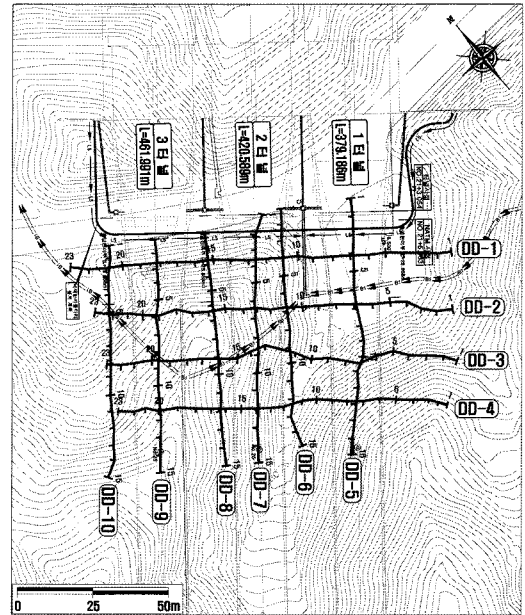


Fig. 4. Survey line map.

Hedlin & Constable, 1990, Sasaki, 1992) 와 Quasi-Newton optimization technique에 기초한 최소자승법(new least-square method)를 적용하였다.

### 역산 해석

DD-1은 터널 횡단방향으로 전개한 해석단면로서 고비저항대는 축선거리 60~120 m 구간 하부에 집중되어 나타나고, 상부에 부분적으로 나타나는 고비저항대는 차별 풍화작용에 기인된 해석의 영향일 것으로 판단된다.

중비저항대는 고비저항대와 저비저항대 경계부에 부분적으로 발달할 것으로 예측되며 저비저항대 영역은 상부에 걸쳐 광범위하게 분포하고 있으며 풍화대가 연장되어 발달할 것으로 판단된다.

DD-3은 터널 횡단방향으로 전개한 해석단면로서 고비저항대 부분에서 20~60 m 구간은 하부까지 연장성이 결여된 양상이며, 80~100 m 구간은 상부에 저전기비저항대내에 고립된 형태로 분포한다. 이는 차별 풍화작용에 의한 다수의 해석 수반에 기인되어진 것으로 판단된다.

Table 2. pole space and pole length.

Line	DD-1	DD-2	DD-3	DD-4	DD-5	DD-6	DD-7	DD-8	DD-9	DD-10
Pole space (m)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Pole No. (EA)	23	23	23	23	16	15	15	15	15	15
Pole length(m)	132	132	132	132	90	83	83	83	83	83

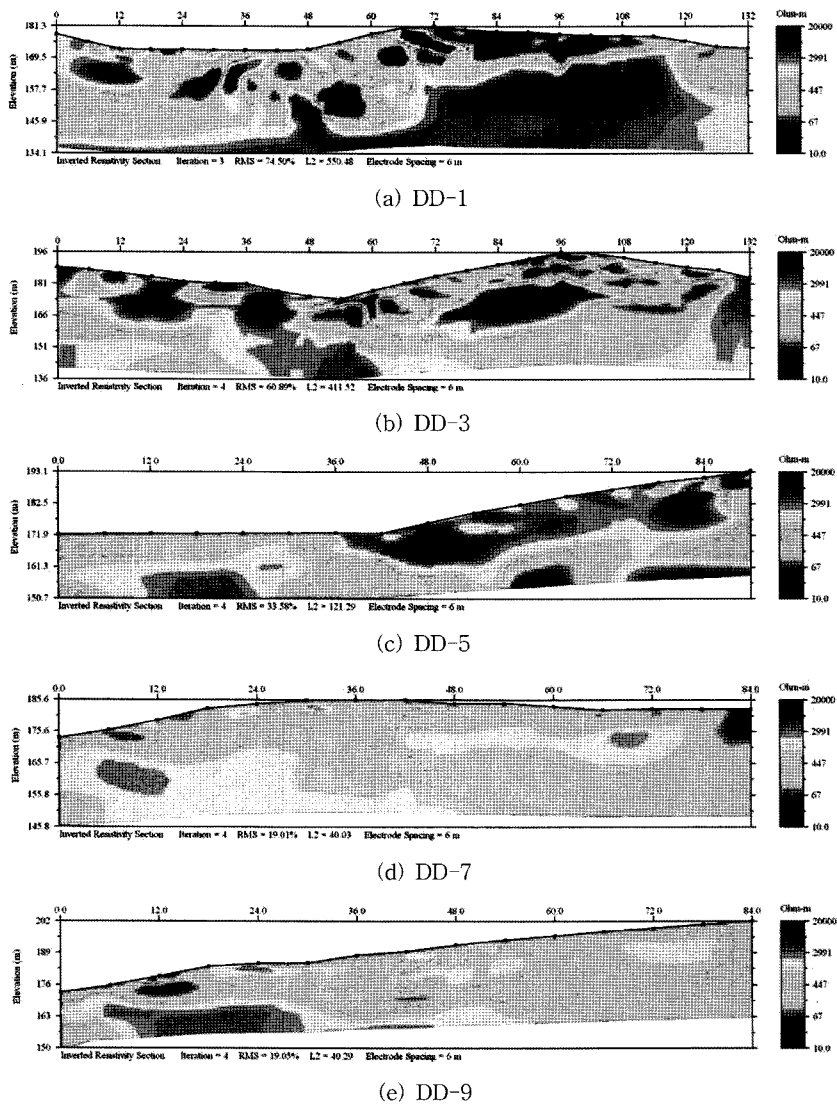


Fig. 5. Resistivity sections(DD-1, 3, 5, 7 and 9).

중비저항대는 고비저항대와 저비저항대의 경계부에 국한되어 발달하고 있다. 저비저항대 영역은 20~40 m 구간하부, 60~120 m 구간 중앙부를 제외하고 전 구간에 발달할 것으로 예측된다(풍화대 영역).

DD-5는 터널 종단방향으로 제1터널 상부에서 전개한 해석단면로서 고비저항대 부분은 10~30 m 구간 하부, 40~80 m 상부 및 70 m± 구간에서 발달하고 있으며, 상부의 고비저항대는 상하측방으로 연장성이 결여되어 있는 것으로 판단된다.

중비저항대 영역은 고비저항대와 저비저항대의 경계부에 국한되어 발달하고 전이대로 인지되고 저비저항대

는 0~40 m 구간 상부, 40~65 m 구간의 하부에 발달할 것으로 예측된다(파쇄대에 의한 영향).

DD-7은 터널 종단방향으로 제2터널 상부에서 전개한 해석단면로서 고비저항대는 좌측 중앙부와 우측 중앙부 일부에 발달한다(핵석).

중비저항대 부분은 10~50 m 구간 하부와 50~70 m 구간 중앙부에 발달하는 전이대 영역으로 판단되고 저비저항대 영역은 0~60 m 구간 상부, 나머지 구간은 상·하부에 걸쳐 발달할 것으로 예측된다.

DD-9는 터널 종단방향으로 제3터널 상부에서 전개한 해석단면로서 고비저항대는 상부 일부, 좌측 하부에 발

달하고 중비저항대 부분은 E.L 170 m를 경계로 하부에는 전이대 양상을 띠며 상부에서는 고립된 형태로 산재되어 발달할 것으로 판단된다.

저비저항대 영역은 E.L 170m를 경계로 상부에 광범위하게 발달하고, 70m± 우측지점에는 상·하부에 걸쳐 발달할 것으로 예측된다.

**2차원 전기비저항 구조도 해석**

DD-1 상부는 대부분 핵석(core stone)을 수반하는 풍화대가 발달되어 있을 것으로 판단되고, 제 1터널 우측

에 파쇄대(fracture -zone)가 발달할 것으로 예측되었다.

DD-3은 제 1터널 우측 계곡부에 파쇄대가 발달되어 있을 것으로 예측된다(현장 노두에서 관찰).

DD-5는 터널 시점부를 제외하고는 대부분 두꺼운 풍화대와 다수의 잔존 절리계 및 파쇄대를 수반하는 약대가 발달되어질 것으로 예측된다.

DD-7은 60 m 지점에서 파쇄대가 발달하고 있을 것으로 예측되며, 터널 천단부 지반은 60m±부터 터널 진행 방향으로 상당히 취약할 것으로 예상된다.

DD-9는 상부는 핵석을 수반하는 풍화토가 발달되어

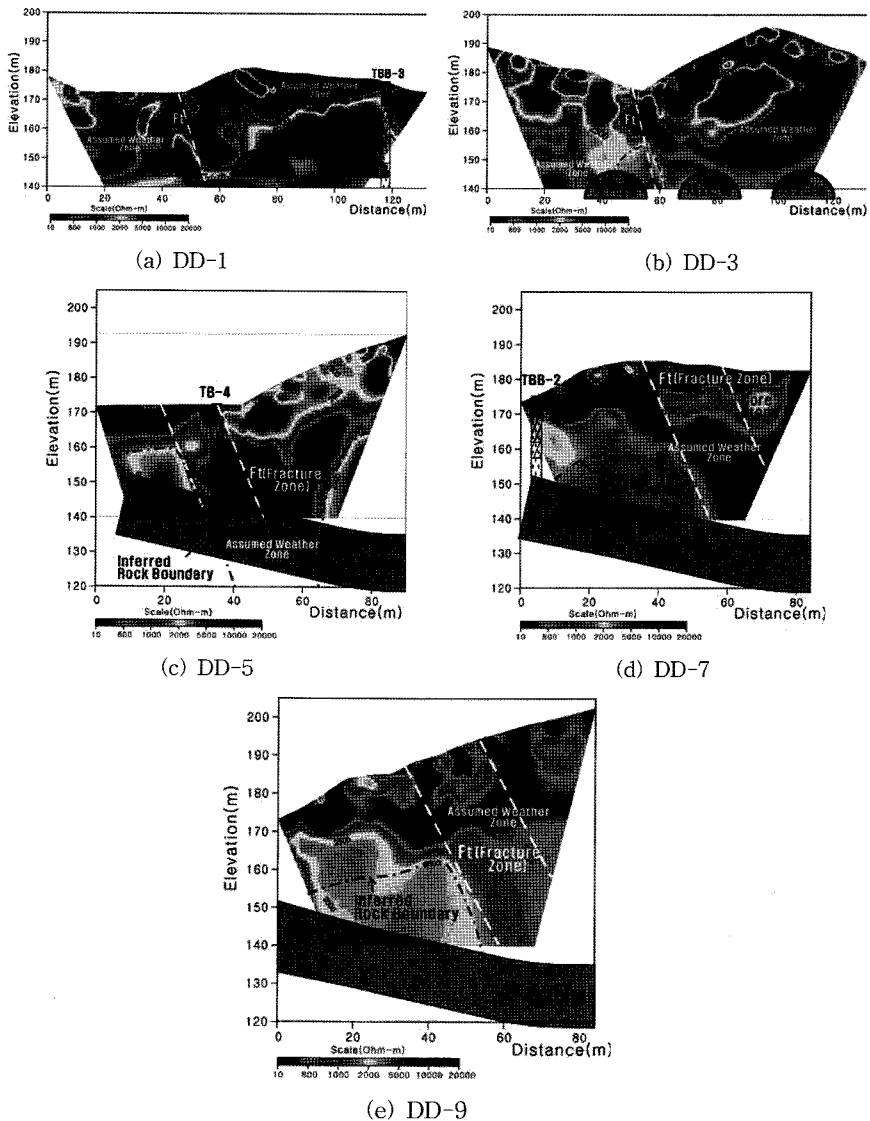


Fig. 6. 2D-Resistivity structure(DD-1, 3, 5, 7 and 9).

있을 것으로 판단되고, 60m± 지점에서 터널을 횡단하는 파쇄대가 수반되어지는 것으로 예측된다.

### 파쇄대 추정기법 고찰

연구지역에서 각 축선 별 외견비저항 분포는 측방 및 상하로 불균질(heterogeneous)한 특징을 보여주고 있다. 한편 고비저항대(적·황색부; 2,000 Ωm 이상), 중비저항대(녹색부; 500~2,000 Ωm), 저비저항대(청색부; 500 Ωm 이하)로 구분되어 나타나며, 이들은 상대적으로 각각 서로 다른 물리적 성격의 매질을 갖는 지반 특성을 나타내고 있다.

일반적으로 고비저항대를 띠는 부분은 신선하고 연암 이상의 암질을 갖는 비교적 양호한 지반에 대비되며, 저비저항 암체는 상대적으로 절리나 단층 등 파쇄대가 발달되어 있는 풍화대를 수반하고 있는 취약한 지반임을 의미한다. 그리고 중간 비저항대를 띠는 부분은 상기 2가지의 중간적인 특성을 보이는 지반이라 할 수 있다.

상기와 같이 구분된 전기비저항대가 각각 상이한 물리적 특성을 갖는 암체라 할 때 상호 접하는 접촉대는 암상의 전이대(transitional zone)이며, 비저항치의 차이를 부분일수록 암상이 급격히 변화하는 현상을 갖는 지반이라 가정할 수 있고 파쇄대의 추정이 가능하다.

### 결 론

터널 굴착에 따른 유입부 지반의 분포양상을 파악하고 전기비저항 탐사를 수행하여 토사, 풍화암, 발파암의 분포상태를 규명하고 파쇄대 또는 풍화대 등의 이상대를 파악하고자 급변 연구를 실시하였다.

사면파괴는 일반적으로 단층과 이상대를 따른 파괴 및 상이한 지층의 경계부에서 파괴등으로 발생되어진다. 이런, 불연속면들에 대하여 지표지질조사와 더불어 전기비저항탐사를 통하여 암석의 종류, 지질구조를 파악하는 것이 매우 효과적이다.

대부분의 전기비저항탐사 최종 결론 의견비저항치에 의한 역산해석이 대부분이나 2차원 비저항구조도를 적용하면 설치 구조물(터널)과 단층, 파쇄대 같은 이상대의 지질상태를 분석하기가 좋다.

1. 터널 굴착시 유입부 상부 지반의 상태는 기반암과 핵석이 혼재하고 상부 풍화대 발달로 인해 지층의 수직·측방변화가 심하게 나타나는 것으로 확인되었다. 현장작업 및 데이터 획득의 용이성, 지층구조파악, 파쇄대

및 풍화대 구간조사를 위한 조사법으로 전기비저항 탐사 중 쌍극자 배열법을 적용함이 효과적으로 조사목적에 부합될 수 있을 것으로 판단되었다.

2. 비상여수로 터널 유입부 상부에서 실시한 전기비저항 탐사 결과, 전체적으로 지층의 측방 및 수직적인 변화가 심한 관계로 복잡한 전기비저항 분포 양상으로 발달하고 이는 계곡부 방향과 제1, 2, 3 터널 방향에 횡단하는 파쇄대 또는 고도 풍화대가 발달할 것으로 예측된다. 그리고, 제1, 2, 3 터널 입구부 및 터널구간에서의 발파암 이상 강도를 갖는 기반암의 발달은 공간적으로 연속성이 결여되어 있고, 부분적으로 핵석을 다수 수반하고 있는 양상일 것으로 판단된다.

### 참고문헌

한국수자원공사, 2006. oo댐 비상여수로 지질조사 보고서. p. 11~12, 72~76  
 김경민, 안용상외 2002. 안동지반의 암상과 다양정치, 지질학회지 38(1), p. 51~65  
 이희천, 1986. 경북 안동군 일대에 분포하는 변성암류의 변성작용에 관한 연구  
 이기동, 1994. 안동단층의 지구물리학적 연구, 지질학회지 30(1), p. 69-80.  
 박종오, 2009. 자연사면에서 기반암 및 지질특성을 탐지하기 위한 지구물리 조사, 지질공학회. 19(1), pp 1-8  
 황상구와 정기영, 2006. 안동 일대 유역의 지질과 임하호 고탁수의 원인, 자원환경지질, 36(6), p.771-786.  
 Barker, R. D., 1992, A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface, v. 10, p. 53-62.  
 Mooney, H. M., 1958, A qualitative approach to electrical resistivity interpretation. Pure and Applied Geophysics, v.40, p.164-171.  
 Zohdy, A. A. R., 1974, Electrical methods. In: Applications of surface geophysics to groundwater investigations, B. 2, US Department of the Interior, p. 5-66.  
 Zohdy, A. A. R., 1989, A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves, Geophysics, v.54, p.245-253.

2009년 7월 21일 원고접수, 2009년 9월 16일 게재승인

### 김재홍

한국수자원공사 Kwater연구원 댐안전연구소  
 305-730 대전광역시 유성구 전민동462-1번지  
 Tel: 042-870-7623  
 Fax: 042-870-7619  
 E-mail: kjhpmk@kwater.or.kr

**박철숙**

한국수자원공사 성덕댐건설단  
763-864 경북청송군 안덕면 성재리 232  
Tel: 054-870-0361  
Fax: 054-870-0399  
E-mail: geopcs@kwater.or.kr

**정교철**

안동대학교 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-822-5467  
E-mail: jeong@andong.ac.kr

**이현재**

지오사이언스  
614-043 부산광역시 부산진구 전포동 362-62번지  
Tel: 051-918-7306  
Fax: 051-918-7305  
E-mail: geolhj@hanmail.net