

지반조사를 위한 3차원 전기비저항 탐사

정 승환*, 이 명중, 김 정호, 조 성준, 송 윤호

(한국자원연구소 자원연구부 포텐셜 및 전기·전자 그룹)

Three-dimensional resistivity imaging for site investigations in civil engineering

Seung-Hwan Chung*, Myeong-Jong Yi, Jung-Ho Kim, Seong-Jun Cho, Yoonho Song

(Potential & Geoelectric Group, Korea Institute of Geology, Mining & Materials)

요 약: 전기비저항 탐사는 국내에서 가장 성공적으로 적용되고 있는 물리탐사 기술의 하나로서 최근에는 토목·건설분야의 지반조사 등에서의 역할이 증대되고 있다. 이와 같은 역할의 증대에 따라 더욱 정확한 해석기법의 등장도 요구되었으며, 특히 국내의 경우 매우 복잡한 지질구조와 험난한 지형여건을 고려할 수 있는 해석기술이 요구되고 있다. 이러한 맥락에서 최근에 3차원 전기비저항 탐사자료의 역산기술이 개발되었다. 개발된 3차원 전기비저항 역산법은 유한요소법을 이용한 3차원 전기비저항 모델링 알고리즘을 근간으로 함으로써 국내와 같이 험난한 지형 및 복잡한 지질구조에 대하여 정확한 지하구조의 3차원 영상을 제공할 수 있으며, 특히 ACB법 (Active Constraint Balancing method)의 채용으로 지하구조에 대한 분해능의 향상을 기대할 수 있게 되었다. 개발된 3차원 영상화 기술을 토대로 토목·건설분야의 지반조사에 3차원 전기비저항 탐사가 동원되고 있으며, 지반조사 대상지역에 있어서 중요한 지하구조에 대한 정보인 기반암 심도, 연약대 및 파쇄대 발달상황, 지하공동의 분포 등을 제공할 수 있었다.

주요어: 3차원, 전기비저항, 지반조사

Abstract: Recently resistivity survey is widely used for site investigations in the field of civil engineering. Since such application area requires accurate interpretation tools especially in the area of complicated geology and rough terrain topography, we developed a three-dimensional (3-D) resistivity inversion code, which can reconstruct real earth structures. Furthermore, the inversion code gives resolution-enhanced images by applying the ACB(Active Constraint Balancing) method. With the help of this inversion code, 3-D resistivity survey is now used as new techniques for site investigations in civil engineering problem. By imaging the 3-D resistivity distribution, we could get useful informations such as depth distribution of basement rock, distribution of weak zone, fractures and cavities which is crucial to civil engineers.

Keywords: three-dimension, resistivity, site investigation

서 론

전기비저항 탐사는 국내에서 가장 성공적으로 적용되고 있는 물리탐사 기술의 하나로서 최근에는 적용분야에 있어서도 기존의 지하자원조사, 온천 및 지하수 조사, 지질조사 등의 목적을 넘어서서 도로, 교량, 대형구조물 건설을 위한 토목공사나 지반침하 안정성 평가 등의 지반조사 분야 및 쓰레기 매립장 오염조사, 폐광지역 조사 등의 환경분야에까지 확대일로를 걷고 있다. 특히 최근에는 국내의 많은 토목·건설 분야의 지반조사에 있어서 전기비저항 탐사의 역할이 매우 증대되고 있으며, 이와 같은 사회적인 요구 및 적용분야의 변화양상은 필연적으로 전기비저항 탐사의 분해능 향상 및 현장자료 획득기술의 발전을 요구하는 바, 최근의 전기비저항 탐사법의 발전은 이러한 맥락에서 이루어져 왔다. 특히 전기비저항 토모그래피 기술은 전기비저항 탐사법의 지하구조에 대한 분해능 향상을 위하여 최신기술로서 도입되어 활용되고 있으며(정승환 등, 1995), 최근에는 지하구조를 단순히 1차원이나 2차원적인 구조보다는 실제 지하구조의 특성과 일치하는 3차원적으로 파악하고자 하는 노력이 이루어지고 있다.

현재 일반적으로 수행되고 전기비저항 탐사자료의 해석은 주로 1차원 또는 2차원적 지하구조를 가정함에 근거하고 있으며, 이와 같은 방법에 있어서의 문제점은 국내의 경우와 같이 지질구조가 복잡하여 그 구조를 1차원 또는 2차원으로 가정하는데는 무리가 따르는 경우가 빈번하다는 데 있다. 이 경우 기존의 1차원 또는 2차원적인 해석방법은 잘못된 지하구조를 도출할 가능성이 있으며, 특히 지하구조에 대한 분해능에 있어서 한계점을 드러내고 있다. 한편, 국내의 경우 전국토의 70%이상이 산악지형으로 되어 있으므로 인하여 전기비저항 탐사자료에는 필수적으로 불규칙한 지형에 의해 왜곡되는 전기장의 효과(지형효과)가 포함되게 되어 3차원 해석을 수행하는 경우에 있어서도 오류를 야기한다. 특히 토목·건설 분야에서의 지반조사는 대부분 산악지형의 열악한 탐사여건을 가지는 경우가 빈번하고 획득하고자 하는 지하 전기비저항 구조 또한 매우 복잡한 양상을 가지는 것이 일반적으로 더욱 정확한 해석기술이 요구되고 있다.

이와 같은 문제점들에 대한 적극적인 해결책으로서 한국자원연구소의 전기·전자탐사 연구팀은 지표의 복잡한 지형을 포함하는 3차원 전기비저항 역산을 이용한 지하구조의 3차원 영상화 기술(이명종 등, 1997, 1998)을 개발하였으며, 최근 국내의 여러 토목·건설 현장에서의 지반조사 또는 지반안정성 조사에 활용하여 매우 정확한 지하구조 영상을 획득하고 있다. 본 논문에서는 이들 국내에서 지반조사에 활용된 3차원 전기비저항 영상화 결과를 중심으로 지반조사를 위한 3차원 전기비저항 해석에 대하여 소개하고자 한다.

3차원 전기비저항 영상화

3차원 전기비저항 탐사는 격자망을 이루는 측정점들을 사용하여 전기비저항 탐사를 수행함으로써 지하구조를 3차원적으로 영상화하는 기술이다. 이와 같은 3차원 전기비저항 탐사에 있어서 가장 필수적인 것은 격자망의 3차원 전기비저항 탐사자료를 해석할 수 있는 3차원 역산법이다. 전기비저항 3차원 역산은 선진국의 경우에 있어서도 극히 최근에 연구, 발표되고 있는 주제의 하나로, 그 적용 사례 또한 매우 최근에 제한적으로 발표되기 시작하고 있다. 한국자원연구소 전기·전자탐사 연구팀은 1997년과 1998년의 2년간에 걸쳐 3차원 전기탐사 자료의 해석 방법에 대하여 연구하였으며, 그 결과 3차원 역산 프로그램을 완성하였

다(이명중 등, 1997, 1998).

전기비저항 탐사자료의 역산을 포함하는 지구물리탐사자료의 역산은 대부분 현장에서 측정된 측정값과 수치 지하구조 모델에서 계산되는 이론 측정값의 차이, 즉 현장 관측값과 이론반응값의 오차 ϵ 을 최소화하는 모델을 찾는 데에 있다. 즉 지하 전기비저항 분포를 ρ 라 하고, 현장 측정값을 g 라 하면, 오차 ϵ 은 다음과 같이 표시될 수 있다(김정호,1987).

$$\epsilon = F(\rho(x, y, z)) - g \quad (1)$$

여기서 전기비저항 분포를 $\rho(x, y, z)$ 로 나타낸 것은 3차원 탐사자료의 해석을 위함이므로 지하 비저항 분포가 3차원 공간좌표의 함수임을 의미하며, 물론 2차원 탐사자료의 역산일 경우에는 $\rho(x, z)$ 와 같이 2차원 공간좌표로 표시되어야 할 것이다. $F(\rho(x, y, z))$ 는 전기비저항 분포 $\rho(x, y, z)$ 로부터 계산되는 이론치를 의미하고, 함수 F 는 주어진 지하구조 모형으로부터 측정값을 계산하는 수치 모델링을 의미하며, 대부분 유한차분 또는 유한요소 모델링 방법을 이용한다. 당 연구팀이 보유한 알고리즘은 유한요소법을 이용한 3차원 전기비저항 모델링 알고리즘으로서, 유한요소법을 이용한 모델링의 최대 장점이라고 할 수 있는 지형효과 고려가 가능하다.

전기비저항 탐사자료의 역산은 오차 ϵ 을 최소화하는 모델 $\rho(x, y, z)$ 를 찾는 데에 있다. 실제적으로는 오차의 제곱을 최소화하는 방법을 취하며, 따라서 최소자승 역산(least-squares inversion)이라고 한다. 그러나 오차만을 최소화하는 지하구조 모델을 계산함은 실제로는 의미가 없는 모델이 계산될 가능성이 높을 뿐만 아니라, 계산과정에서 오차가 수렴하지 않고 발산하여 역산이 불가능해지는 경우가 대부분이다. 바로 이 때문에 단순히 오차를 최소화하는 방법을 취하지 않고, 지하 구조모델에 어떤 규칙성을 갖도록 하면서 오차를 최소화하는 방법을 위한다. 모델에 규칙성을 부여하는 방법 중 가장 많이 사용되는 것이 물성이 공간적으로 부드럽게 변화하도록 하는 것인데, 이를 평활화 제한 최소자승역산이라 한다. 이는 다음의 방정식으로 표시된다.

$$\epsilon^2 + \lambda(\text{지하구조 } \rho(x, y, z) \text{의 불규칙성})^2 \simeq 0 \quad (2)$$

위 식에서 λ 는 상수로써, 오차의 최소화와 지하구조 모델에 가하는 제한, 두 항목 사이의 균형을 유지하는 역할을 하며 Lagrangian multiplier라고 한다. λ 가 작은 경우에는 주로 오차를 최소화하는 방향으로, λ 가 1보다 큰 경우에는 지하 모델의 규칙성을 강조하는 방향으로 역산이 진행된다. 현재까지의 대부분의 전기비저항 역산은 이 알고리즘에 의존하고 있다.

한국자원연구소의 전기, 전자탐사 연구진은 역산에 있어서 분해능을 좌우하는 주요한 요소의 하나가 Lagrangian multiplier λ 에 있음을 주목하고, λ 를 상수가 아닌 공간 함수로써 개념을 새로이 설정하였다. λ 를 지하구조 모델을 구성하는 각 블록의 분해능에 따라 능동적으로 λ 의 공간 분포를 계산하여 이를 역산에 이용하는 방법을 개발하였으며, 이를 ACB(Active Constraint Balancing) 법이라고 명명하였다(Yi and Kim, 1998). 즉 ACB 법을 이용한 역산은

$$\epsilon^2 + \lambda(x, y, z)(\text{지하구조 } \rho(x, y, z) \text{의 불규칙성})^2 \simeq 0 \quad (3)$$

와 같이 표시된다. ACB 법에서 상수가 아닌 공간함수 λ 는 각 블록의 분해능을 계산하여 그 분해능의 고저에 따라 자동적으로 결정이 된다. 이와 같이 능동적으로 계산된 Lagrangian multiplier λ 를 이용함으로써 역산결과 얻어지는 지하구조모형은 주어진 자료에

대해 최대한의 분해능을 갖는 영상이 된다. 이와 같은 접근은 2차원 탐사자료의 역산에서도 동일하게 적용할 수 있으며, 단지 2차원이므로 $\rho(x, y, z)$ 및 $\lambda(x, y, z)$ 가 $\rho(x, z)$ 및 $\lambda(x, z)$ 로 표시됨이 다를 뿐이다.

한편 그림 1은 국내의 일반적인 지형여건을 모식적으로 나타낸 것으로 매우 복잡한 지형을 나타내고 있다. 이처럼 복잡한 지형을 가지는 탐사현장의 경우 획득된 전기비저항 탐사자료에는 지하구조에 의한 반응뿐만 아니라 지표의 불규칙한 지형에 의하여 야기되는 전기장의 왜곡현상인 지형효과(topography effect)가 필수적으로 포함되어 나타나게 된다(박권규, 1994). 이 경우 지형기복을 무시하고 지하구조의 해석을 수행하는 경우 지형효과에 의한 왜곡현상으로 인하여 오류를 범할 가능성이 높아진다. 이와 같은 점에 대하여 종래의 지형효과에 대한 고려는 지하의 전기비저항분포가 균일하다는 가정하에 불규칙한 지형기복에 의한 지형효과를 계산하고 이로부터 현장자료의 보정을 통하여 지형효과를 완화하는 방법으로 이루어 졌으나, 원론적으로는 지형의 기복을 포함하여 역산을 수행함으로써 지하구조를 해석함이 가장 정확한 방법이라고 할 수 있다. 이와 같은 측면에서 당 연구팀은 유한요소법을 이용함으로써 지형기복을 역산에 포함시킬 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 즉, 유한요소법의 장점을 최대한 활용하여 유한요소 격자시스템을 그림 1과 같이 변형함으로써 불규칙한 지형구조를 설정하고, 그림에서와 같은 방식으로 설정된 격자시스템을 사용하여 3차원 전기비저항 모델링을 수행함으로써 3차원 전기비저항 역산단계에서 지형에 의한 효과를 고려하여 지형기복에 의하여 가려질 수 있는 지하 이상대의 분포를 정확히 영상화하게 된다.

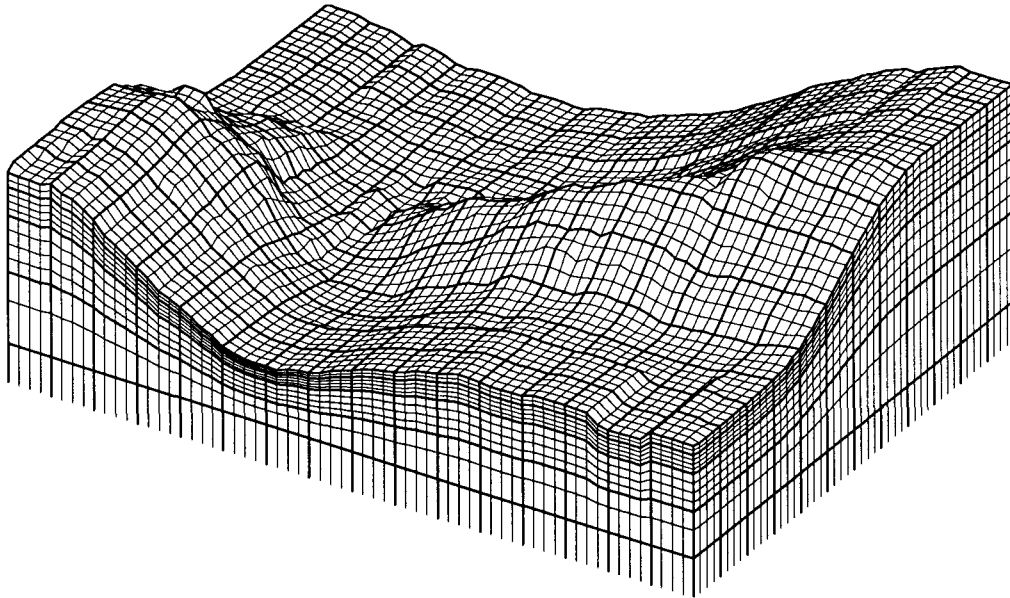


Fig. 1. Three-dimensional finite element mesh system which incorporates the rough terrain irregularity. Thick lines shows the inversion block of constant resistivity.

그림 2는 지형기복이 존재하는 경우에 대한 3차원 전기비저항 역산 수치모형실험 결과이다. 그림에서 (a)는 지하구조 모형으로 한 변의 길이가 60 m인 정육면체로 구성된 전도체가 조사지역 중앙에 위치하는 매우 간단한 구조이나 전도체의 좌우로 요철의 지형의 고저가 존재하는 모형이다. (b)는 지형효과를 고려하지 않은, 즉 평탄한 지표면을 가정한 역산 결과 영상으로 비록 중앙부의 전도체의 영상을 보여주고 있기는 하지만, 지형효과에 의하여 전도

체의 우측으로 저비저항 이상대가 심부로 발달하고 있는 것처럼 나타나고 있다. (c)는 지형을 포함한 역산 프로그램으로 계산된 지하구조 영상으로 중앙부의 전도체를 매우 뚜렷하게 보여주고 있을 뿐만 아니라 지형에 의한 거짓 이상대가 전혀 나타나고 있지 않다.

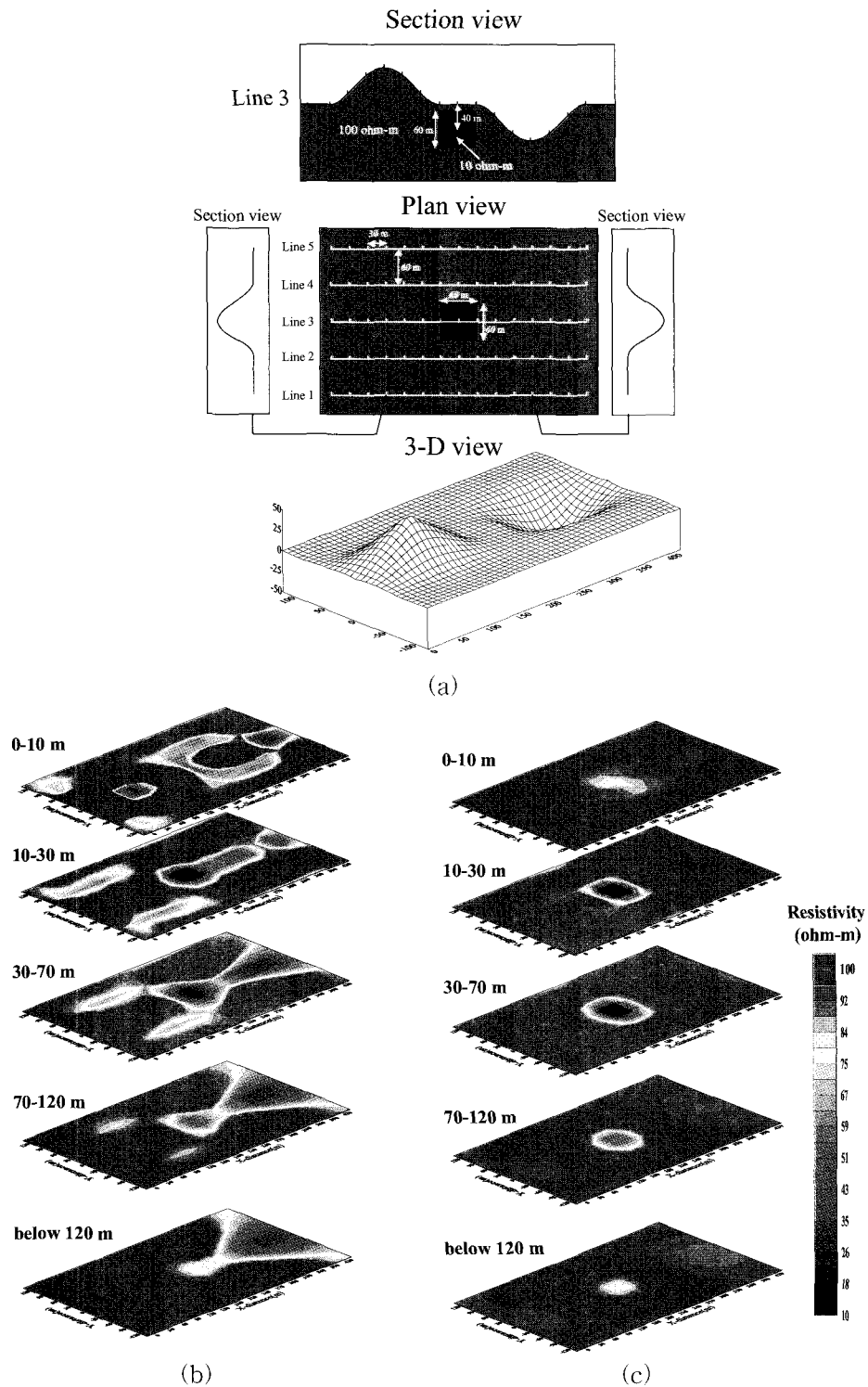
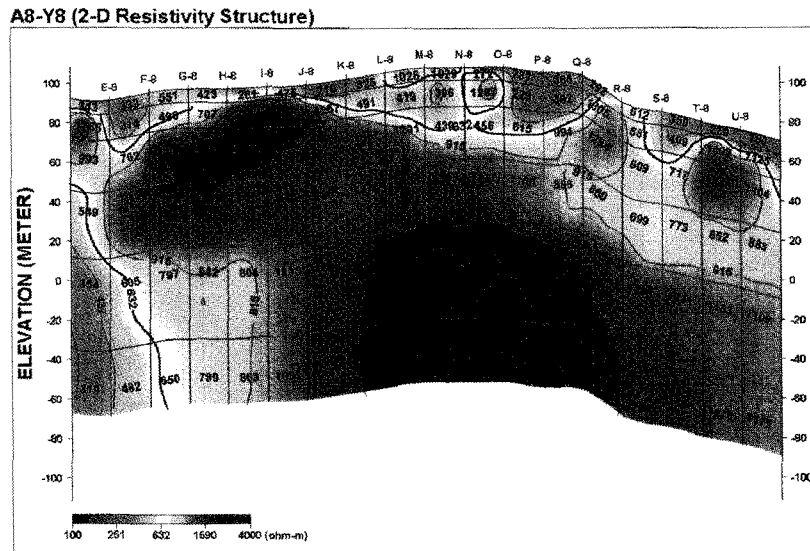


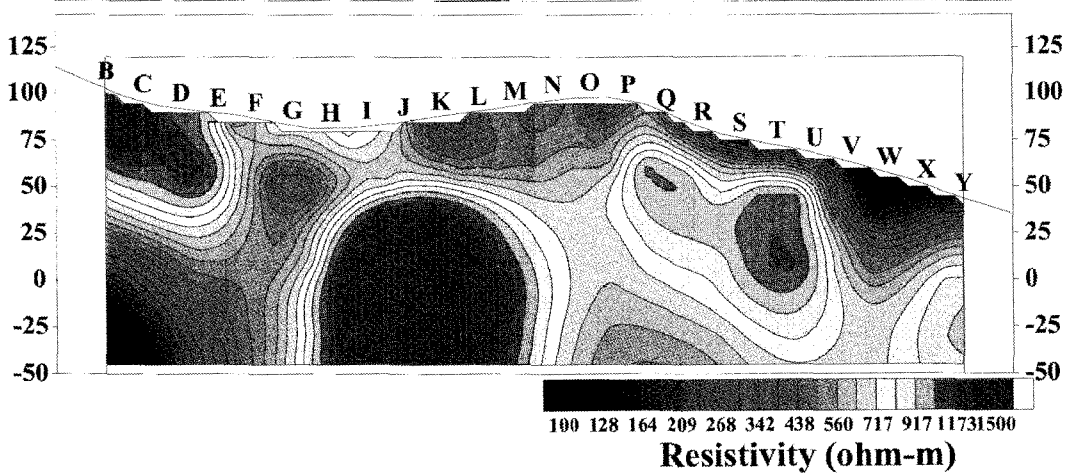
Fig. 2. Numerical experiment for topography effect in the 3-D resistivity imaging.
 (a) simple earth under the rough topography area,
 (b) 3-D resistivity images when topography was not implemented.
 (c) 3-D resistivity images when topography was included in the inversion

2차원 전기비저항 탐사에서 지형은 측선 방향으로만 변화하며, 측선에 수직인 방향으로 는 지형의 변화가 존재하지 않음을 기본가정으로 하고 있다. 그러므로 측선이 지형변화가 심한 쪽으로 설정되어 있을 경우에는 어느 정도 신뢰할 만한 지형효과의 보정이 가능할 것이다. 그러나 측선 방향보다 측선 방향에 수직인 방향으로 지형의 기복이 더욱 심하다면 2차원 전기비저항 탐사자료의 지형보정 결과는 적절하다고 볼 수 없을 것이다. 그림 3은 이와 같은 경우에 대한 예로써 국내에서 획득된 현장자료를 도시한 것이다.



(a)

Line 8



(b)

Fig. 3. 3-D resistivity imaging versus conventional 2-D resistivity imaging.

- (a) 2-D resistivity image obtained by 2-D inversion and topography correction :
- (b) 2-D resistivity distribution extracted from 3-D resistivity image which was obtained by 3-D resistivity inversion with topography

그림 3의 자료는 매우 많은 탐사시간이 소요되는 3차원 탐사 이전에, 전반적인 전기비

저항 분포 경향을 알아보기 위하여 쌍극자 배열 2차원 전기비저항 탐사가 수행된 경우로, 그림 3의 예는 2차원 전기비저항 탐사가 이루어진 축선에 대한 2차원 전기비저항 영상(a)과 3차원 전기비저항 탐사결과 가운데 2차원 전기비저항 축선 하부의 전기비저항 영상을 추출(b)하여 도시한 것이다. 본 탐사지역은 축선 방향보다는 축선에 수직인 방향으로 지형의 기복이 심한 특징을 가지고 있다. 이들 두 전기비저항 영상을 비교하여 보면 두 영상이 매우 다르다는 것을 알 수 있으며, 특히 3차원 역산에서 얻어진 전기비저항 분포에서 축선 중앙에 발달하고 있는 저비저항 이상대는 2차원 역산으로 얻어진 영상에서는 거의 찾아보기 힘들다. 이와 같은 결과는 지하구조의 3차원적인 효과뿐만 아니라, 지형이 심하지 않은 방향으로 2차원 쌍극자 탐사 축선이 설정되어 있기 때문에 2차원 지형보정으로서는 실제의 지형효과를 완전히 보정하지 못하였기 때문이다.

3차원 전기비저항 탐사를 사용하여 실제 3차원적으로 변화하는 지하구조를 영상화하기 위해서 가장 중요한 것은 축선을 격자망으로 설정함과 아울러 3차원 역산법을 동원하여 해석하여야 한다는 점이다. 만약 격자망으로 축선을 설정하고 2차원 탐사와 같이 축선별로 자료를 획득하였다고 하더라도, 3차원 역산법을 이용하여 지하구조를 구성하였다면 이는 분명 3차원 탐사의 범주에 속한다. 그러나 격자망으로 구성된 측정점에서 3차원 탐사를 수행하였다고 하더라도 해석방법으로 2차원 역산법을 이용하고, 그 결과로부터 3차원 전기비저항 분포를 얻었다고 하더라도 엄밀한 의미에서 3차원 탐사 결과로 간주할 수는 없으며, 3차원 역산법을 이용한 영상보다 정밀도 또는 정확도가 훨씬 떨어지는 결과를 초래하게 된다.

고속도로 교량건설 예정부지에서의 3차원 전기비저항 탐사

고속도로 교량건설 예정부지에서 획득된 전기비저항 탐사자료에 대하여 3차원 전기비저항 역산을 수행하였다. 교량건설 예정부지에는 시추 조사 결과 다수의 지하공동이 석회암 지대에 분포하는 것으로 확인되었으며, 본 조사의 목적은 이와 같은 지하공동 및 연약대의 분포를 밝히고자 하는데 있었다. 대부분 국내의 경우, 석회암 지대에서 지하공동의 발달은 비교적 신선한 암반의 경계부위에 존재하는 연약대를 따라서 발달하는 경우가 많으므로 이와 같은 연약대 분포를 파악함으로써 가능한 지하공동의 위치를 밝히고자 하였다.

그림 4에는 전기비저항 탐사 축선도를 나타낸 것으로 각 축선들에 대하여 쌍극자배열 전기비저항 탐사가 수행되었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전체 축선들의 분포는 교량 중심축에 대칭이 되도록 교각 위치마다 설정된 축선들과 교각축을 연결하는 선을 따라 설정된 축선들로 구성되어 있으며, 각 축선들의 공간적 분포는 거의 격자망이 되도록 탐사가 이루어졌다. 또한 전반적으로 탐사지역의 지형은 주로 논으로 평탄하게 나타나고 있다.

이 조사에서 가장 두드러진 반응이 나타난 지역은 그림에서 A지역으로 표시한 곳이며, A지역에 있어서 교각축에 수직으로 설정된 축선들에 대한 2차원 전기비저항 역산 결과를 그림 5에 도시하였다. 여기서, 특징지을 수 있는 점은 교량의 진행방향을 따라서 이에 사교하여 나타나는 저비저항 이상대로서 축선별로 뚜렷한 연속성을 가지고 발달하고 있다. 또한 이 저비저항 이상대가 지표천부에만 국한된 채널형태를 가지고 발달하고 있으며 그 하부에 고비저항의 신선한 암반이 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나, 교각 P5의 시추 코어 조사 결과에 의하면 저비저항대의 발달심도는 훨씬 깊은 것으로 확인되었다.

이 같은 특성을 가지는 탐사자료를 사용하여 3차원 전기비저항 역산을 수행하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 여기서 본 조사지역의 지형이 거의 평탄하므로 3차원 전기비저항 역산에는 지형구조를 포함시키지 않았다. 3차원 역산 결과인 그림 6(a)에서 볼 수

있는 바와 같이 저비저항 이상대가 수평적으로 연속성을 가지는 양상은 2차원 역산에 의한 결과와 동일하게 나타나고 있다. 이에 비하여 이 이상대의 발달심도에 있어서는 앞의 2차원 역산의 결과와는 달리 훨씬 심부까지 나타나고 있다. 앞의 2차원 역산에 의한 결과에서는 저비저항 이상대의 하부에는 신선한 암반이라고 할 수 있는 고비저항대가 존재하나, 3차원 역산에서는 이와 같은 영상이 나타나지 않고 있으며, 따라서 2차원 역산에서 나타나는 하부의 고비저항 이상대는 3차원 효과에 기인한 것이라 할 수 있다. 한편 3차원 전기비저항 영상으로부터 전기비저항 값이 100 ohm-m 이상인 지역을 기반암으로 상정하여 그림 6(c)와 같이 기반암 분포도를 작성하였으며, 이로부터 전체 기반암 심도분포와 3차원 전기비저항 영상으로부터 파악되는 저비저항 이상대의 연속성을 뚜렷이 살펴볼 수 있다.

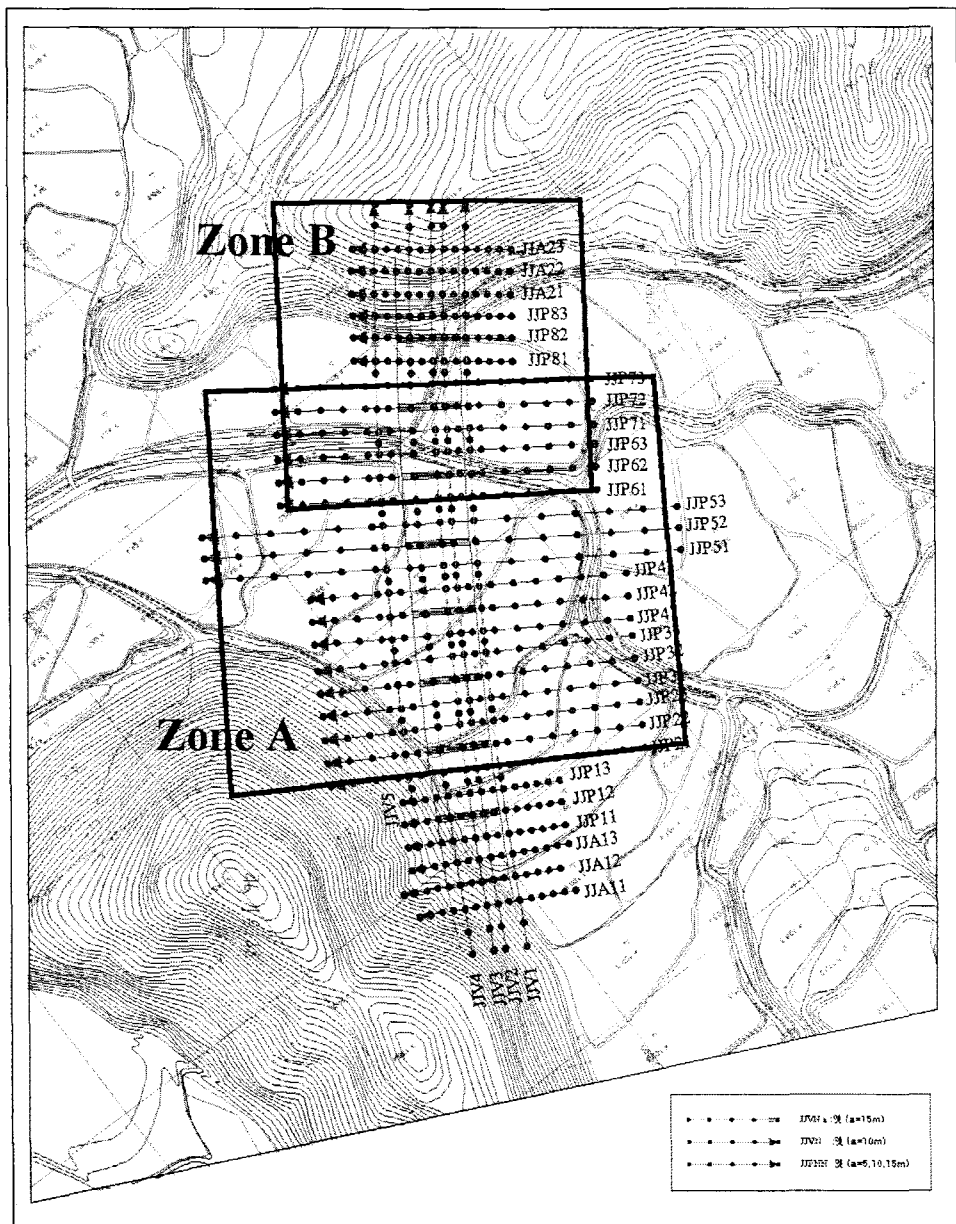


Fig. 4. Location map of the survey lines in the Highway construction site. Survey lines were chosen to cover the pier locations of the bridge which would be constructed

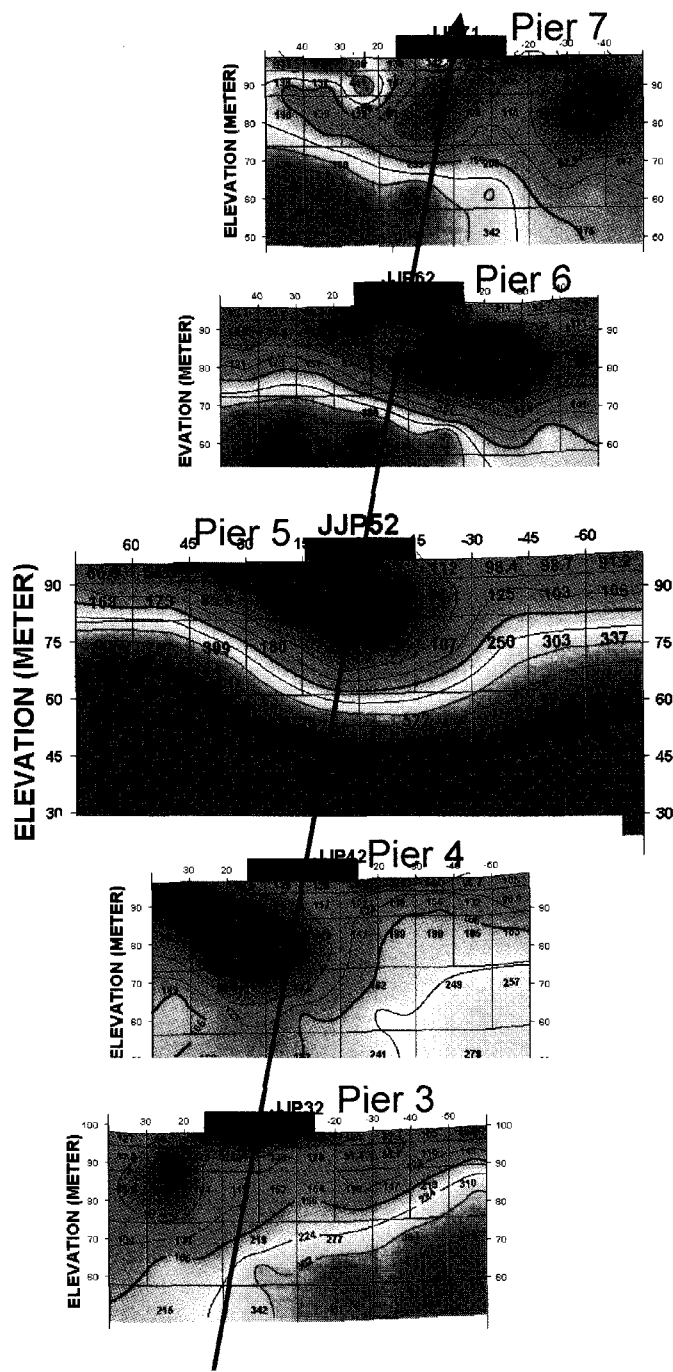
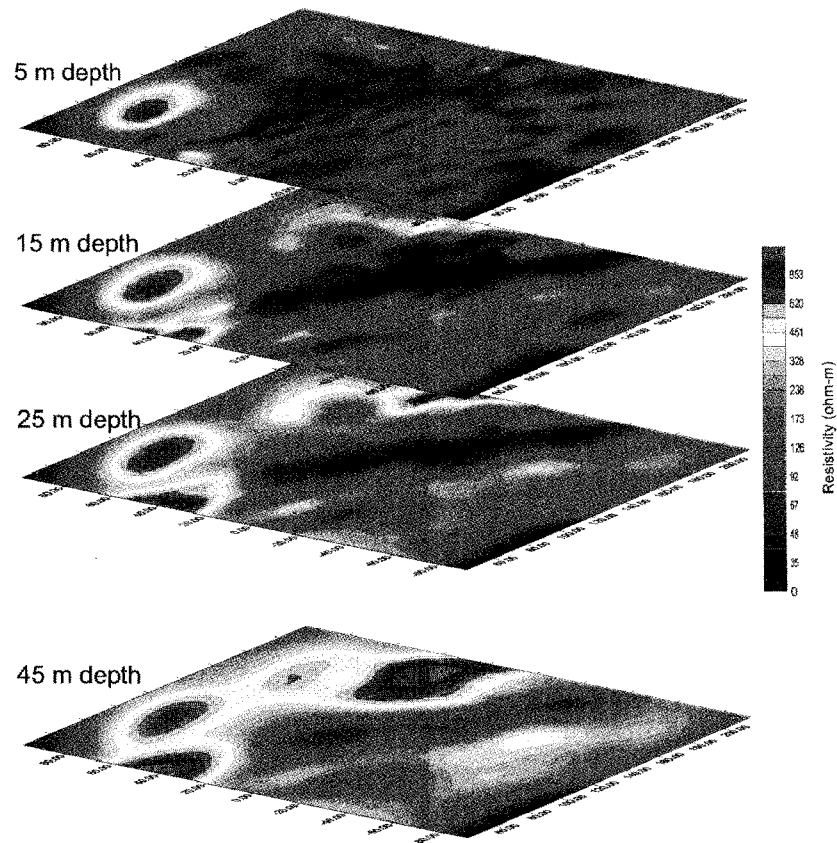
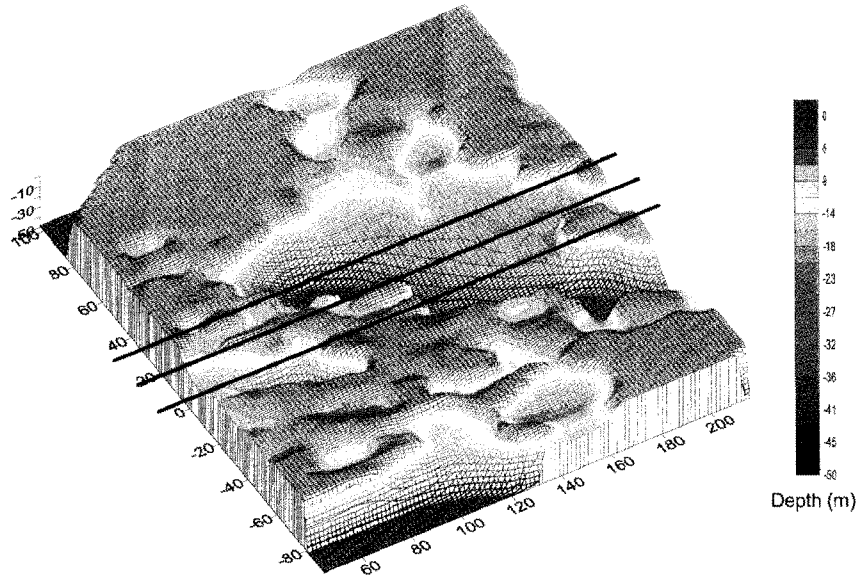


Fig. 5. Plots of two dimensional resistivity structures obtained by 2-D inversion of each survey lines.

본 지역에 대한 전기비저항 3차원 역산 결과 파악된 이상대는 건설될 교각의 안정성에 문제가 되는 지역으로 파악되었으며, 시추코아 조사결과 이미 발견된 석회암 공동분포와의 면밀한 연관성 검토를 통하여 하부에 소규모 지하공동의 발달 가능성이 높은 지역으로 해석되었다. 이 이상대의 발달양상은 야외지질조사 결과와도 일치하는 결과를 나타내는 것으로 이 지역에 발달하는 단층선으로 해석되었다. 이와 같이 본 조사에서 파악된 이상대 및 전기비저항 분포로부터 파악된 기반암 심도 등에 대한 정보는 본 지역에 건설될 고속도로 교량 건설의 기본설계의 기초자료로 사용되었다.



(a)



(b)

Fig. 6. 3-D resistivity images obtained by 3-D inversion of survey lines in zone A.

- (a) Depth slice map of 3-D resistivity distribution. Also shown are the pier locations which would be constructed.
- (b) Basement rock topography from 3-D resistivity image. The region which have the resistivity value over 100 ohm-m was set as the basement rock.

다음은 교량건설 예정부지 지반조사의 또 다른 예로서 그림 7에는 격자망을 이루도록 설정된 측선도를 나타내었다. 여기에는 총 34개의 측선이 포함되어 있으며, 사용된 쌍극자 간격은 10m 및 5m로 하여 각 측선 하부에서 예상되는 기반암 심도에 따라서 선정하였다. 또한 서로 다른 쌍극자 간격을 동일한 측선에서 반복 사용하여 탐사가 이루어졌다. 한편 이 지역의 지형은 교량이 계곡지역을 가로지름으로 인하여 그 지형의 기복이 대단히 심하다. 측선도인 그림 7에 나타난 지형도로부터 알 수 있는 바와 같이 주된 지형기복의 변화는 교량진행방향으로 나타나고 있다.

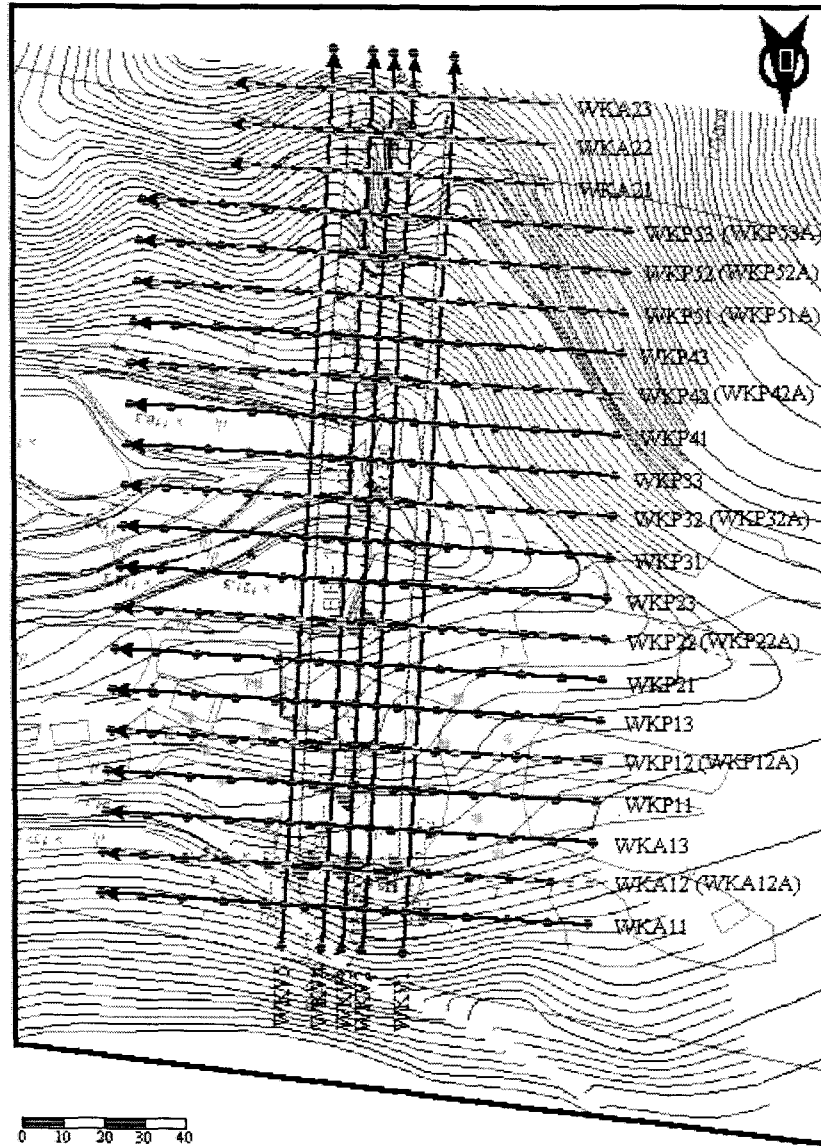
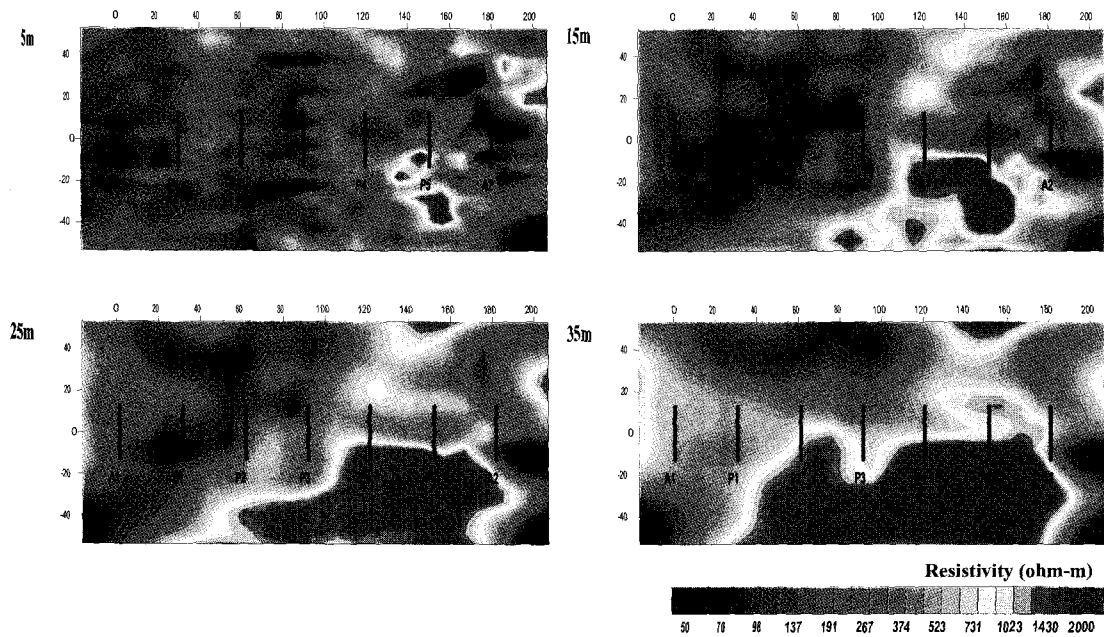


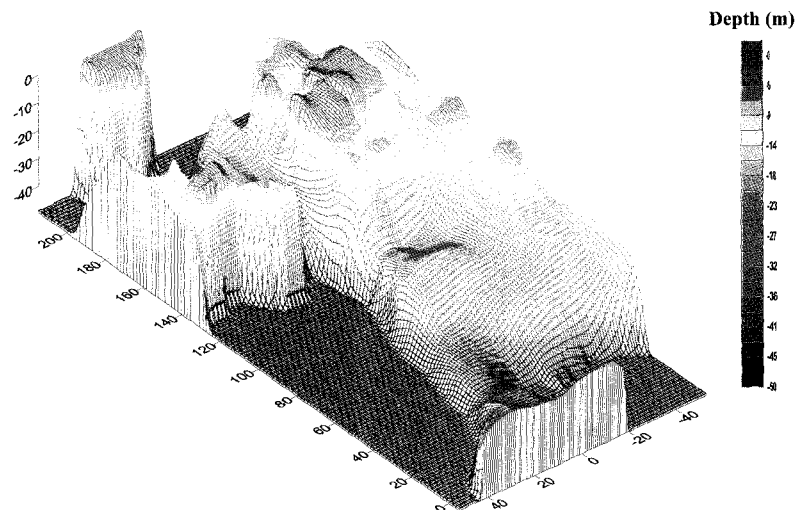
Fig. 7. Location map of the survey lines in the Highway construction site. Survey lines were chosen to cover the pier locations of the bridge which will be constructed.

그림 8은 이 지역에 대한 전기비저항 탐사자료를 모두 사용하여 3차원 전기비저항 역산을 수행한 결과이다. 여기에는 본 지역에서 지형의 기복이 대단히 심함을 감안하여, 지형을 고려하는 3차원 역산 알고리즘이 사용되었다. 그림 8은 3차원 전기비저항 역산결과로서 (a)

는 3차원 전기비저항 영상을 심도별로 영상화한 것이다. 여기에는 두 가지의 특징적인 구조가 나타나고 있는 바, 이들은 교량 중심축을 가로지르며 교각 P1~P3사이에 발달되는 저비저항 이상대와 교각 P3로부터 교대 A2에 걸쳐서 교량 중심축을 따라서 발달되는 중간 비저항값을 가지며 연속성을 가지는 이상대로 대별된다. 먼저, 교량 중심축을 가로지르는 방향으로 나타나는 저비저항 이상대는 상부에 폭넓게 분포하는 붕적층의 발달을 보여주는 것으로 이들은 교량건설시 문제가 되는 연약지반으로 판단되었으며, 특히 이들과 신선훈 기반암인 고비저항대의 경계부위에는 지하공동의 발달 가능성이 높은 것으로 해석되었다. 이와 같은 양상은 시추코아 조사결과 발견된 지하공동의 위치와의 연관성으로부터 유도되었다.



(a)



(b)

Fig. 8. 3-D resistivity images obtained by 3-D inversion of data set for the survey lines in Fig. 7. (a) depth slice images (b) 3-D view of basement topography from resistivity distribution.

한편 교량 중심축을 따라 발달하고 있는 또 하나의 이상대는 야외 지질조사결과를 볼 때 이 지역의 전반적인 지질구조 변화와 관련된 이상대로 보이며, 특히 신선한 기반암인 고비저항대의 주변부위에 이와 같은 이상대가 분포한다는 사실과 교각 P4 및 교각 P5의 하부에 지하공동이 발달한다는 시추 코아 조사 결과를 종합할 때에 앞의 논의에서와 같이 기반암 주변에 발달하는 연약대를 따르는 이 이상대의 분포를 따라서 다수의 지하공동이 발달할 가능성이 높은 것으로 해석되었다.

한편 그림 8(b)는 그림 8(a)의 3차원 전기비저항 영상으로부터 기반암으로 상정할 수 있는 500 ohm-m 이상의 전기비저항 값을 가지는 심도를 계산하여 기반암 심도를 3차원적으로 도시한 것으로서 이상에서 언급한 저비저항 이상대의 공간적 발달상황을 잘 나타내고 있다. 한편 야외지질조사에 의하여 이상과 같은 이상대는 단층선의 영향으로 파악되었으며, 이들 이상대에 대한 공간정보 및 기반암의 발달 심도 및 형상은 본 지역에 건설될 교량에 대한 기본설계의 기초자료로서 활용되었다.

폐광지역에서의 지반안정성 조사

국내에서 1차 산업으로서 각광받던 광산업이 사양화되면서 국내에는 많은 폐광지역이 발생되었다. 이들 폐광산들의 기본적인 문제점은 가행시 과거 굴진이 이루어진 채굴적들에 대한 정보가 제대로 확보되어 있지 못하다는데 있으며, 이 경우 이들 폐광지역에서 각종 토목·건설공사 수행시 채굴적 등에 의해 발생하는 지하암반의 응력 변화에 기인하여 지반침하 등이 발생하여 지반의 안정성에 심각한 문제가 야기되고 있다.

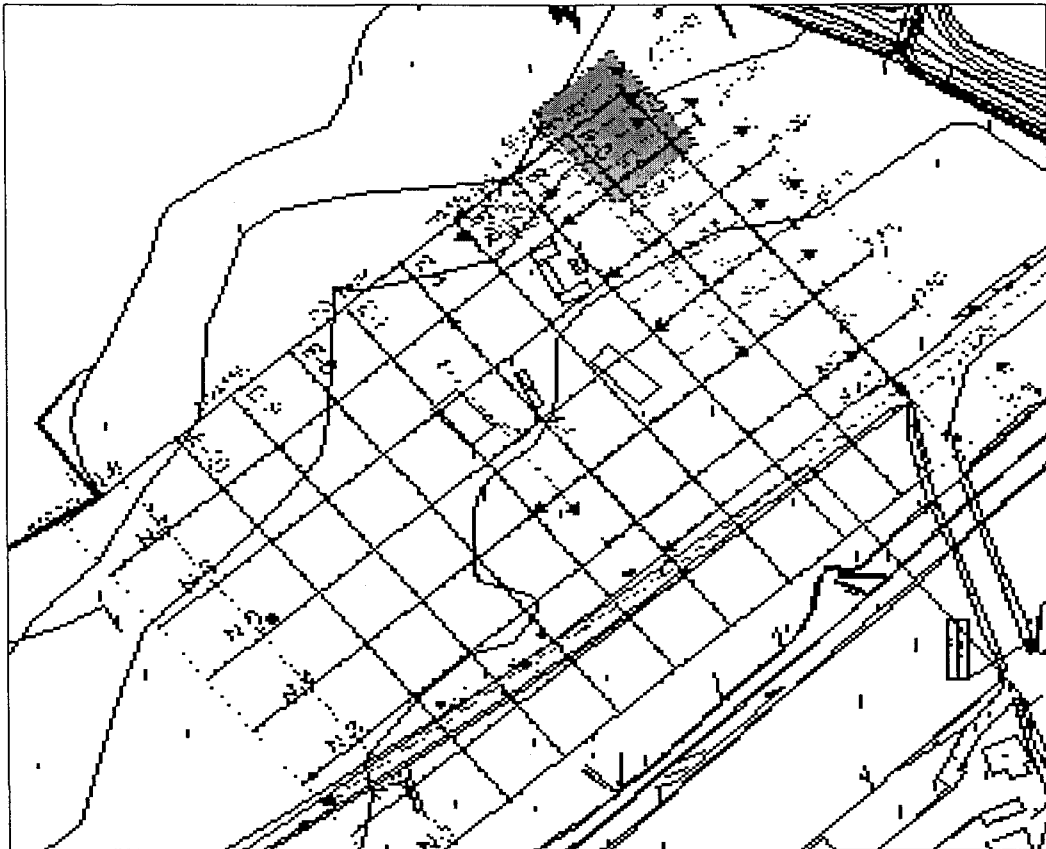


Fig. 9. Location map of the survey lines in the abandoned coal mine area.

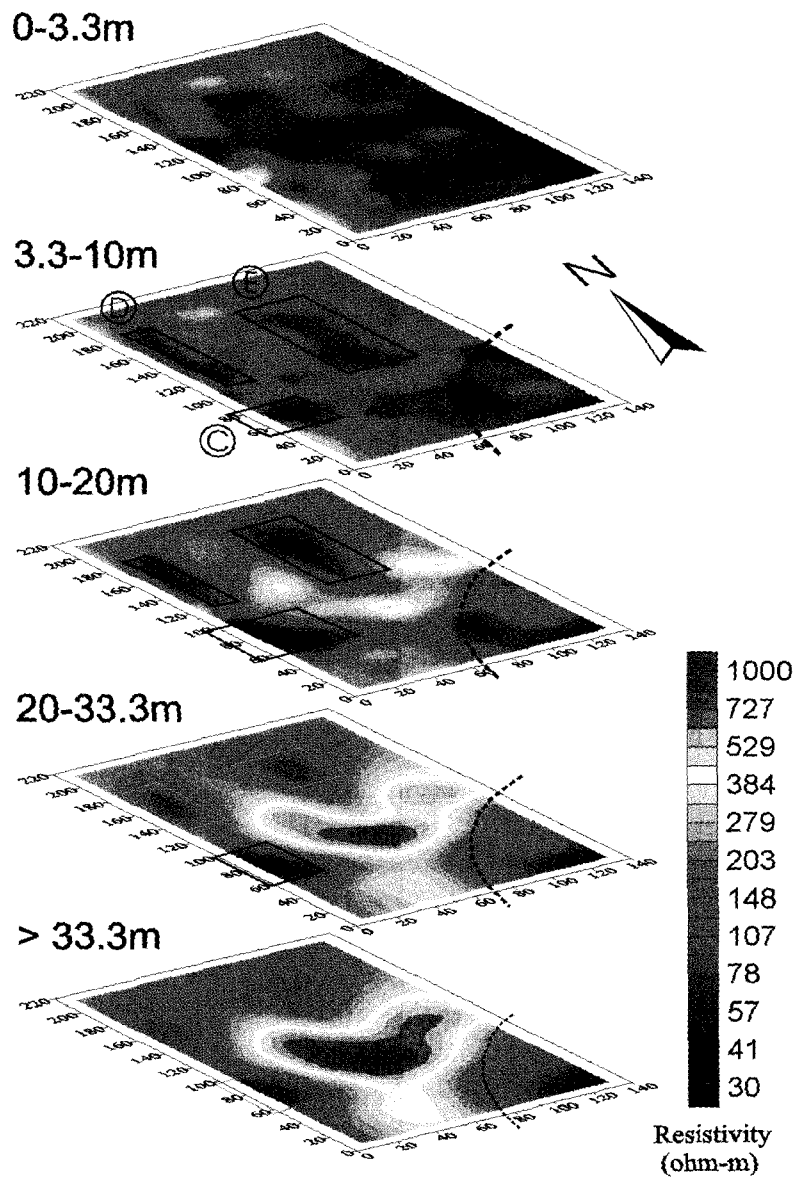


Fig. 10. 3-D resistivity images obtained by 3-D inversion of data set for the survey lines in Fig. 9.

그림 9는 국내에서 폐광지역에 대한 지반안정성 조사의 일환으로 수행된 전기비저항 탐사의 축선도를 나타낸 것이다. 이 지역은 과거 석탄광을 가행한 지역으로 이 지역의 하부는 석회암으로 석회암의 지하수와 반응에 의하여 조사지역의 하부에는 많은 지하공동이 발달할 것으로 예측된 곳이다. 특히 부근에는 함몰대(sinkhole)로 설정된 지역이 다수 존재하며, 이들은 지하공동과 연관되어 지반침하에 의하여 조사지역에 구조물을 설치할 경우, 안정성에 문제를 야기할 수 있는 지역이다. 이와 같이 지하에 발달하는 지하공동의 분포를 파악하기 위하여 지표레이다(GPR) 탐사 및 전기비저항 3차원 탐사가 수행되었으며, 이로부터 이 지역에 존재하는 연약대 및 파쇄대의 분포를 영상화하고 이들 연약대내에 부존하게 되는 석회암 지하공동의 분포를 파악함으로써 이 지역의 지반안정성 확보를 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 N으로 명명된 축선과 E로 명명된 축선에 대하여 격자망을 이루어 축선별 쌍극자배열 전기비저항 탐사가 이루어졌으며, 이들 전체

탐사자료에 대하여 3차원 역산을 수행하였다. 여기서 이들 축선들의 공간적 분포는 축선간의 간격이 10m로 균일하며 축점간의 간격 또한 10m로서 일정하게 하여 완벽하게 바둑판 모양을 가지고 있다.

그림 10은 본 조사지역에 대한 3차원 전기비저항 영상을 나타낸 것으로 여기에는 몇 가지 특이한 반응이 나타나고 있다. 즉, 전체 탐사영역의 남동부(그림에서 점선으로 표시) 지역에는 지표로부터 폭넓게 저비저항대가 발달하고 있으며, 이 이상대는 GPR탐사에 의한 정밀탐사 결과에서도 공통되게 파악된 이상대로서, 실제 굴삭기를 이용한 확인조사 결과 이 지역에 과거에 산업쓰레기의 투기가 이루어진 지역임을 밝힐 수 있었다.

한편 그림 10에는 3차원 전기비저항 영상에서 파악할 수 있는 다른 이상대들을 나타내었으며 이들 중 이상대 ㉔는 확인 시추가 이루어진바 약 30m하부에까지 단속적으로 지하공동이 분포함이 확인되었다. 이로부터 나머지 이상대 ㉕ 및 ㉖의 하부에도 지하공동이 분포할 가능성이 높은 것으로 해석되었다. 이와 같은 이상대는 이 지역에 있어서 지반침하문제 등 지반안정성 확보를 위한 기본자료로서 유효하게 사용된 바 있다.

결 론

국내의 전기비저항 탐사는 최근 3차원 전기비저항 역산 알고리즘의 개발에 힘입어 3차원 지하영상화의 단계로 도약하였다. 특히 국내와 같이 지형이 험준하고 복잡한 지질구조를 가지는 점에 입각하여 이들을 정확히 고려할 수 있는 3차원 영상화 기술이 등장함에 따라 최근에는 성공적으로 국내 지반조사 현장에 적용되고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 전기비저항 3차원 탐사를 이용한 국내에서의 지반조사 사례를 살펴보았다. 즉, 고속도로 교량건설 예정부지에 대한 3차원 전기비저항 탐사 및 폐광지역에서의 전기비저항 탐사 결과에 대한 예를 살펴보았으며, 이로부터 3차원 전기비저항 탐사가 매우 정확한 지하구조 영상을 제공함을 확인하였다.

이와 같은 예에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 3차원 전기비저항 탐사를 통하여 토목·건설 시공시에 필요한 다양한 정보 - 기반암 심도, 연약대 및 파쇄대의 3차원적 분포 상황, 지반 안정성에 영향을 미치는 지하공동의 분포 -등을 정확히 영상화 할 수 있었으며, 이들 정보를 사용함으로써 토목·건설 시공시 안전성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 부지 특성의 정량적인 파악이 가능하게 되었다. 특히 지반구조에 대한 3차원적 영상은 정확도 및 정량적인 측면에서 지하물성(전기비저항)에 대한 정확한 더욱 정확한 결과를 제공할 수 있었으며, 이후 토목·건설분야에서의 적용이 더욱 증대될 것으로 예상된다고 하겠다.

참고문헌

- 김정호, 1987, 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산: 공학박사 학위논문, 서울대학교
- 박권규, 1994, 유한요소법을 이용한 3차원 전기비저항 모델링 및 지형보정에 관한 연구: 공학석사 학위논문, 서울대학교.
- 이명중, 김정호, 조성준, 정승환, 1997, 전기비저항 탐사자료의 3차원 역산: 전기·전자탐사법에 의한 지하 영상화 기술연구, 한국자원연구소, KR-97(C)-16, 57-100.
- 이명중, 김정호, 조성준, 정승환, 송운호, 1998, 지형을 고려한 전기비저항 탐사자료의 3차원 역산: 전기·전자탐사법에 의한 지하 영상화 기술연구, 한국자원연구소, KR-98(C)-09, 5-47.
- 정승환, 김용태, 안대영, 1995, 전기비저항 토모그래피에 의한 지하영상화 및 적용사례: 지반

사고예방을 위한 물리탐사 활용, 한국자원공학회 특별심포지엄 논문집, 한국자원공학회, 113-140.

Yi, M. J., and Kim, J. H., 1998, Enhancing the Resolving power of the Least-squares inversion with Active Constraint Balancing: *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstracts*, 485-488.