2차원 및 3차원 전기비저항 탐사를 이용한 제당 누수 조사

이명종, 김정호, 송윤호, 정승환
(한국자원연구소 탐사개발연구부 전기·전자탐사 연구실)

Dam seepage investigation using two- and three-dimensional resistivity surveys

Myeong-Jong Yi, Jung-Ho Kim, Yoonho Song, Seung-Hwan Chung
(Geoelectric Imaging Lab., Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

요 약: 제당의 누수부위 조사를 위하여 전기비저항 탐사가 많이 이용되고 있는 바, 전기비저항 탐사를 이용한 누수부위의 파악은 주로 제체 내 불균질대의 규명을 통하여 이루어지고 있다. 본 연구에서는 제당의 누수부위 탐지를 위한 전기비저항 탐사의 3차원 유한요소 수치모델링을 수행하고 이 결과를 이용하여 제당 누수부위 조사를 위한 2차원 및 3차원 전기비저항 탐사 방법론 및 자료의 해석에 대하여 고찰하였다. 제체의 형상과 전기비저항 구조는 근본적으로 3차원이므로 종래의 2차원 전기비저항 탐사에 비하여 비록 격자상의 측선 배열을 적용할 수 없더라도 3차원적으로 탐사를 수행하고 이를 해석함으로써 좀 더 정확한 제체 하부의 영상화가 가능함을 보였다.

주요어: 제당, 누수, 전기비저항 탐사, 2차원, 3차원

Abstract: Electrical resistivity survey is widely applied to the dam seepage problems. Main purpose of the resistivity survey is to delineate the inhomogeneity in the dam. In this study, two- (2-D) and three-dimensional (3-D) resistivity survey methodology and corresponding interpretations of the data have been analyzed using 3-D resistivity modeling results. Since resistivity structures beneath the dam and its shape are 3-D in nature, we could get more accurate image of the dam structures using 3-D survey compared to 2-D survey even though we cannot employ the grid-shape survey layout.

Keywords: dam, seepage, resistivity survey, 2-D, 3-D

1. 서 론

국내에는 갈수기에 필요한 농업용수 확보를 목적으로 전국의 곳곳에 제당이 위치하고 있으며, 그 수는 약 18,000여개에 달하는 것으로 알려져 있다. 국내 농업용 제당의 문제점은 제당의 노후화로 인하여 전체의 약 16%정도가 누수에 취약하다는데 있다. 제당누수 부위의 조사를 위하여 전기비저항 탐사가 많이 활용되고 있으며, 이들은 대부분 제당의 중심부를 형성하는 중심점토의 안정성 및 제당하부를 통한 누수영역을 파악하는데 그 초점이 맞추어

져 있다. 즉, 대부분의 제당에는 차수의 역할을 담당하기 위하여 제체 중심부에 점토질의 중심점토 부분이 존재하며, 이 부위의 안정성 여부가 제체 전체의 안정성 및 누수여부의 핵심이 된다. 이와 같은 제체 내 중심점토의 안정성을 파악하기 위하여 전기비저항 탐사가 많이 동원되며, 국내의 경우 쌍극자배열 전기비저항 탐사가 일반적으로 수행되고 있다.

제체 중심부분은 보통 점토질로 되어 높은 함수율을 보이고 있으며 이에 따라 저비저항대로 나타나게 된다. 이 저비저항대에 대하여 전기비저항 탐사를 이용한 이상대 파악의 주착안점은 전반적으로 균질하게 나타나는 중심점토 부분에 있어서 불균질한 부분을 파악하는 것으로 요약될 수 있다. 여기서 불균질한 영역은 차수의 역할을 전담하는 중심점토의 기능을 제대로 수행할 수 없는 부분으로 제체 상류의 담수량과 관련하여 지속적인 압력을 받게 됨에 의하여 중심점토가 변형 또는 유실되어 누수 및 제체의 안정성에 문제가 되는 지역이라고 할 수 있다. 이처럼 변형을 받은 중심점토 부분은 안정된 부분에 비하여 전기비저항 값에도 변화를 나타내게 되며, 전기비저항 탐사의 적용은 이와 같은 부분을 영상화함으로써 제체의 안정성에 문제가 되는 부분을 파악하는데 그 목적이 있다고 할 수 있다.

한편 제체에 대한 쌍극자배열 전기비저항 탐사는 보통 제당의 마루부분 및 사면에 대하여 측선을 설정하고 설정된 측선을 따라 탐사자료를 획득하는 2차원 탐사로 구분할 수 있으며, 이에 대한 2차원 해석을 수행하는 경우 측선에 수직한 방향인 제당의 상·하류방향에 있어서의 제체의 구배 및 담수에 의한 전기비저항 영상의 왜곡에 대한 적절한 고려가 불가능하다. 또한 제체에 있어서의 전기비저항 구조는 제체의 종단을 따르는 방향의 변화뿐만 아니라, 제체의 횡단방향으로 상류측의 담수와 제체 내부의 중심점토, 그리고 이를 피복하고 있는 영역으로 구분되어 전체적으로 3차원적인 형태를 갖는다는 점이다. 이와 같이 3차원적인 특징을 갖는 것으로 요약할 수 있는 전기비저항 구조를 더욱 정확하게 영상화하기 위해서는 최근에 도입되어 지반조사 분야에 유용하게 적용되고 있는 3차원 전기비저항 탐사 및 해석기술의 적용이 필요한 바, 본 논문에서는 제체에 대한 통상적인 2차원 전기비저항 탐사 및 신기술로서 적용 가능한 3차원 전기비저항 탐사에 대하여 논의하고자 한다.

2. 2차원 및 3차원 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 지하매질의 전기비저항 차이에 의해 야기되는 이상(anomalous) 전위차를 측정하고 이를 정밀 해석함으로써 지하구조를 규명해내는 물리탐사 기술이다. 지하매질의 전기비저항은 암반에 따라 다르며 신선한 결정질 암반의 경우 거의 부도체에 가까운 전기비저항 값을 보여준다. 이러한 암반에서의 전기비저항의 변화는 그 암반이 어떻게 변질되었느냐에 크게 기인하는데, 특히 단층작용에 의한 파쇄대의 발달은 파쇄대 내를 주로 지하수나 전기전도도가 높은 점토가 충진하므로 전기를 잘 통해주는 전도체 역할을 한다. 우리 나라 지질의 대종을 이루는 화강암 내지 화강편마암 등의 결정질 암반뿐만 아니라 대부분의 퇴적암의 전기비저항은 미주나 유럽의 해성 퇴적암반에 비해 수백 배에 달하는 매우 높은 값을 보이는 것이 특징적이다. 따라서 우리나라에서 지하수 탐사나 단층대 혹은 파쇄대 등의 탐사를 위해서는 고비저항대내에 분포하는 저비저항대의 규명함이 주가 된다.

논의의 대상인 제당의 경우, 차수의 역할을 주로 담당하는 중심점토 지역은 담수에 의하여 포화되어 수 ohm-m 정도의 상당한 저비저항대로서 나타나며, 제체의 안정성을 검토하는데 있어서 단순히 저비저항 이상대의 파악만으로는 해석의 오류를 야기할 위험이 따른다. 따라서, 전기비저항 탐사자료의 해석은 제체의 특성을 충분히 고려하여 이루어져야 함은

물론이다. 일반적으로 제 기능을 다하고 있는 중심점토 지역은 제당의 주기능인 차수를 위하여 높은 함수율을 나타내고 이로 인하여 수리전도도가 대단히 낮아지게 되어 차수역할을 수행하게 된다. 따라서 제체에서 문제가 발생할 소지가 높은 지역은 이와 같은 차수가 잘 이루어지지 않는 지역으로 파악될 수 있으며, 이는 중심점토영역에 있어서 불균질한 구역이 된다. 제체에 있어서 불균질한 영역의 발생은 주로 중심점토의 변형에 의하여 발생되며 이와 같은 현상이 제체 상류의 담수량과 관련되어 지속적인 압력을 받음으로써 중심점토의 유실에까지 이르게 됨으로써 제체의 안정성에 치명적인 결과를 초래하게 된다. 이와 같은 불균질한 영역은 전기비저항 값에 있어서도 차수의 역할을 제대로 하고 있는 균질한 지역과는 함수율 및 그 성분에 있어서 차이를 보이게 되며 이는 필연적으로 전기비저항 값의 변화를 초래하게 된다. 따라서, 전기비저항 탐사를 이용한 제체의 안정성 및 누수부위의 파악은 비교적 균질할 것으로 예상되는 중심점토 부분에 있어서 불균질 영역을 파악하는 것으로 요약할 수 있다.

2.1. 2차원 전기비저항 탐사

2차원 전기비저항 탐사는 지하의 물성이 조사 측선 하부 단면상에서만 변화하며 측선에 직교하는 방향으로는 변화하지 않는다는 가정, 즉 전기비저항의 분포가 2차원적이라는 가정하에서 탐사를 수행하고, 측정자료를 해석하는 탐사법이다. 그러므로 2차원 탐사에서는 전극이 탐사 측선상에 국한되며, 측선을 벗어나지 않는다. 2차원 탐사에 채용되는 전극배열은 단극법(pole-pole), 단극-쌍극자법(pole-dipole), 쌍극자법(dipole-dipole), 웨너법(Wenner), 슐럼버져법(Schlumberger) 등 대부분의 전극배열이 이용될 수 있다. 이들 다양한 전극배열법들 중 가장 분해능이 높은 전극배열법은 쌍극자배열법이며, 슐럼버져법, 단극-쌍극자법, 웨너법, 단극법의 순서로 그 결과인 전기비저항 영상의 분해능이 감소된다. 반면에 측정자료의 질을 의미하는 S/N 비는 쌍극자배열법이 가장 낮으며, 슐럼버져법, 단극-쌍극자법, 웨너법, 단극법의 순서로 증가된다. 이는 측정되는 포텐샬 값의 절대 크기의 증가를 의미한다. 그러므로 전기비저항이 매우 낮은 지역에서는 측정값이 낮아지므로, 분해능은 쌍극자배열법보다 떨어지나 좀 더 높은 측정값을 보장할 수 있는 단극-쌍극자법이나, 혹은 단극법을 채용함이 바람직하다. 국내의 경우는 외국에 비하여 전기비저항이 매우 높은 편에 속하며, 따라서 많은 경우 분해능이 가장 높은 쌍극자배열법을 적용할 수 있다.

현재 제당에 대한 전기비저항 탐사에 가장 많이 사용되는 전극배열법은 쌍극자배열로, 수평 및 수직탐사를 동시에 수행함으로써 탐사 측선 하부의 2차원적 구조를 밝혀주게 된다. 이와 같은 2차원 전기비저항 탐사의 기본 가정은 측선에 수직인 주향방향으로의 전기비저항 구조의 변화가 없음에 기초하고 있으며, 이에 대하여 실제 제당의 전기비저항 구조는 3차원적으로 변화하여 측선을 따르는 수평적인 변화뿐만 아니라, 심도 및 측선을 가로지르는 방향으로도 변화하게 된다. 또한 상류측과 하류측에는 지표면의 굴곡이 존재하고 있으며 이는 전기비저항 탐사에서의 지형효과의 형태로 탐사자료에 반영되며, 상류측에 존재하는 담수 또한 전기비저항 탐사 자료에 영향을 미치게 된다. 이처럼 3차원적인 특성을 가지는 제당에 대한 2차원 전기비저항 탐사의 적용성은, 측선을 따르는 전기비저항 탐사의 감도분포가 측선에서 벗어난 지역에 비하여 측선의 직하부가 높다는 점, 제당의 상·하류방향의 지표면의 굴곡이 제당의 전구간에 있어서 비슷하여 이에 의한 지형효과가 비교적 균질하게 탐사자료에 포함된다는 점, 그리고 탐사의 대상이 되는 제체 내의 이상대가 주로 전기비저항 구조에

있어서 수평적인 불균질성을 나타낸다는 점 등에 의하여, 상당히 효과적으로 제체 내 불균질대의 영상화가 가능하다.

한편 2차원 전기비저항 탐사자료의 정량적 해석을 위해서는 임의의 지하구조에 대한 전기비저항 반응을 계산할 수 있는 수치모델링 및 역산 기법이 필요하게 된다. 한국자원연구소의 전기·전자탐사 연구실에서는 이러한 목적으로 2차원 지하구조에 의한 반응을 정량적으로 계산하고 이의 역산을 통해 지하의 참 비저항 분포를 영상화하는 소프트웨어를 개발하였으며 지난 10년간 이의 성능을 향상시키고 상업화한 바 있다. 이 소프트웨어 DIPRO는 현재 국내 대부분의 지하수 용역업계 및 건설회사에서 지반조사 목적으로 사용되고 있으며, 제당누수조사 분야에 있어서도 대부분 이 소프트웨어를 이용한 해석이 이루어지고 있다.

2.2. 3차원 전기비저항 탐사

전술한 바와 같이 2차원 전기비저항 탐사의 기본 가정은 전기비저항이 수직 및 측선 방향으로만 변화하고, 측선에 수직인 방향으로는 변화하지 않는다는 가정하에서 탐사를 수행하고, 해석하는 방법이다. 즉 2차원 탐사에 있어서 전기비저항 분포는 공간좌표 x, z의 두 좌표에 대한 함수이며, 바로 이 때문에 2차원 탐사라고 한다. 이에 반해 3차원 탐사는 지하의 전기비저항이 임의의 방향으로 변화할 수 있음을 상정하고 탐사를 수행하며 자료를 해석하는 방법이다. 다시 말해 3차원 전기비저항 탐사에 있어서는 지하 전기비저항 분포에 대한 기본가정은 존재하지 않는다. 만약 지하구조가 뚜렷한 주향을 갖고, 주향 방향으로 물리적인 성질의 변화가 거의 없으며, 측선이 주향방향에 수직으로 설정되어 있을 경우, 2차원 전기비저항탐사는 매우 정확한 지하 영상을 제공할 수 있다. 그러나 실제에 있어서는, 엄밀한 의미에서 2차원 지하구조는 존재할 수 없으며, 지하 물성은 3차원적인 공간좌표의 함수로 보아야 한다. 따라서 3차원 탐사가 그 원리상 가장 정확한 영상을 제공하여 줄 수 있음은 자명한 일이다.

탐사 지역의 지형이 평탄하지 않고 측점간의 고도차이가 심한 경우, 지형의 변화에 의하여 측정자료에 거짓 이상대가 발생할 가능성이 높다. 이러한 경우에는 탐사자료에 지형변화에 의한 반응을 보정하여 주는 지형보정을 수행한 후 자료 해석에 임하여야한다. 이와 같은 지형의 변화가 야기하는 문제에 있어서도 2차원적인 접근보다는 3차원적인 접근이 정확한 결과를 나타내 줄 수 있다. 2차원 탐사에 있어서는 그 원리상 지형이 측선 방향으로만 변화하고 측선에 수직인 방향으로 변화하지 않는다는 가정을 채택할 수밖에 없다. 그러나 3차원 탐사에 있어서는 3차원적인 지형변화를 완벽하게 처리할 수 있는 장점이 있다. 수치실험에 의하면 2차원적인 지형 변화 보다 3차원적인 지형 변화가 더욱 강하게 측정자료에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 제당에 대한 전기비저항 탐사의 경우 전극을 설치하게 되는 탐사지역의 지형변화의 형태가 일반적인 지반조사에서와는 달리 제체 마루와 사면 그리고 상류에 담수가 존재하는 형태로 정형화되어 있으며, 제당의 마루 및 사면에서의 전기비저항 탐사의 경우 측선방향으로는 거의 지형의 변화가 없는 특징을 가지고 있으나, 이에 수직한 방향, 즉 상·하류방향에 있어서는 급격한 지형변화를 보이게 된다. 이와 같은 지형변화는 2차원 해석을 수행하는 경우 이에 대한 고려가 불가능하며, 전기비저항 2차원 영상에는 이에 의한 효과가 반영되어 있게 된다.

한편 2차원 탐사의 현장탐사는 1개 측선상에서 수행되는 데에 반해, 3차원 탐사는 조사지역 전체의 임의의 점에서 전류를 흘리고, 임의의 점에서 전위를 측정한다. 즉 2차원 현장

탐사는 선의 개념을 갖는 데에 반해, 3차원 현장탐사는 면의 개념을 갖는다. 2차원 탐사에서 측점이 측선상에서 등간격으로 위치하는 것과 동일한 개념으로, 3차원 탐사에서는 조사지역을 격자망으로 분할하고 측점은 격자점 상에 위치하여야 한다. 이는 지하구조를 3차원 유한차분 또는 유한요소로 분할하여 지하구조 모델을 구성함으로써 3차원 역산을 가능하게 하기 위한 필수 요건이다.

한편 전기비저항 3차원 탐사에서 필수적인 것은 3차원 역산법이다. 전기비저항 3차원 역산은 선진국의 경우에 있어서도 극히 최근에 연구, 발표되고 있는 주제의 하나로, 그 적용사례 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 완성하였다.

전기비저항 탐사자료의 역산을 포함하는 지구물리탐사자료의 역산은 대부분 현장에서 측정된 측정값과 수치 지하구조 모델에서 계산되는 이론 측정값의 차이, 즉 실측치와 이론치 간의 오차 ε을 최소화하는 모델을 찾는 데에 있다. 즉 지하 전기비저항 분포를 ρ라고 하고, 현장 측정값을 g라고 하면, 오차 ε은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\varepsilon = F(\rho(x,y,z)) - g \tag{1}$$

여기서 전기비저항 분포를 $\rho(x,y,z)$로 나타낸 것은 3차원 탐사자료의 해석을 위함이므로 지하 전기비저항 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 이론 값을 의미하고, 함수 F는 주어진 지하구조 모형으로부터 측정값을 계산하는 수치 모델링을 의미하며, 대부분 유한차분 또는 유한요소 모델링 방법을 이용한다. 조사자료의 역산에 이용된 방법은 유한요소 수치 모델링 기법이다. 전기비저항 탐사자료의 역산은 오차 ε을 최소화하는 모델 $\rho(x,y,z)$를 찾는 데에 있다. 실제적으로는 오차의 제곱을 최소화하는 방법을 취하며, 따라서 최소자승 역산이라고 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 부드럽게 변화하도록 하는 것인데, 이를 평활화제한 최소자승역산이라 한다. 이는 다음의 방정식으로 표시된다.

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

위 식에서 λ는 상수로서, 오차의 최소화와 지하구조 모델에 가하는 제한, 두 항목 사이의 균형을 유지하는 역할을 하며 라그랑지 곱수(Lagrangian multiplier)라고 한다. λ가 작은 경우에는 주로 오차를 최소화하는 방향으로, λ가 큰 경우에는 지하 모델의 규칙성을 강조하는 방향으로 역산이 진행된다. 현재까지의 대부분의 전기비저항 역산은 이 알고리듬에 의존하고 있다.

한국자원연구소의 전기·전자탐사 연구팀은 역산에 있어서 분해능을 좌우하는 주요한 요소의 하나가 라그랑지 곱수 λ에 있음을 주목하고, λ를 상수가 아닌 공간 함수로서 개념을 새로이 설정하였다. λ를 지하구조 모델을 구성하는 각 블록의 분해능에 따라 능동적으

로 λ의 공간 분포를 계산하여 이를 역산에 이용하는 방법을 개발하였으며, 이를 ACB (Active Constraint Balancing) 법이라고 명명하였다. 즉 ACB 법을 이용한 역산은

$$\varepsilon^2 + \lambda(x,y,z)(\text{지하구조 } \rho(x,y,z)\text{의 불규칙성})^2 \simeq 0 \qquad (4)$$

와 같이 표시된다. ACB 법에서 상수가 아닌 공간함수 λ는 각 블록의 분해능을 계산하여 그 분해능의 고저에 따라 자동적으로 결정이 된다. 이와 같이 능동적으로 계산된 라그랑지 곱수 λ를 이용함으로써 역산결과 얻어지는 지하구조모형은 주어진 자료에 대해 최대한의 분해능을 갖는 영상이 된다. 이와 같은 접근은 2차원 탐사자료의 역산에서도 동일하게 이용되었으며, 단지 2차원이므로 $\rho(x,y,z)$ 및 $\lambda(x,y,z)$가 $\rho(x,z)$ 및 $\lambda(x,z)$로 표시됨이 다를 뿐이다.

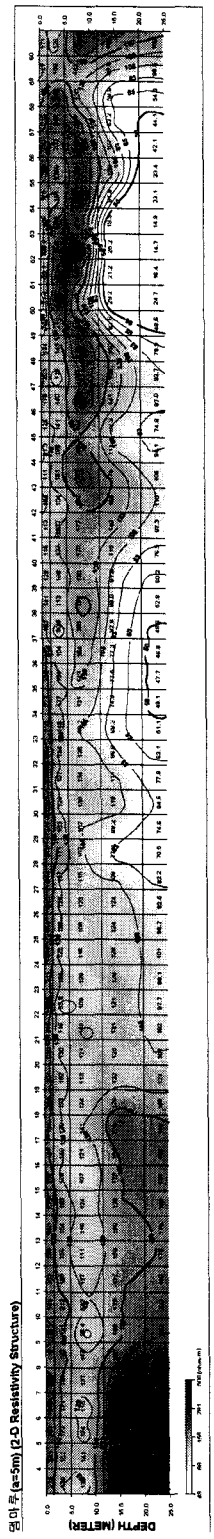
3. 제당 누수부위 조사를 위한 전기비저항 탐사

국내의 많은 제당에서 누수가 진행중에 있으며, 이와 같은 누수조사에 쌍극자배열 전기비저항 탐사가 많이 적용되고 있다. 이 절에서는 제체에 대한 전기비저항 탐사에 있어서 2차원 및 3차원 탐사에 대하여 수치모형 실험을 토대로 설명하고자 한다.

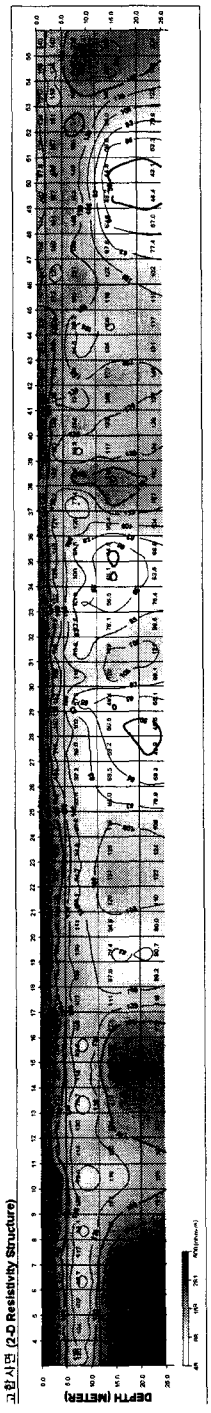
먼저 그림 1은 국내에서 수행된 농업용 제당에 대한 전기비저항 탐사결과의 예인데, 현장자료 획득이 이루어진 제당은 비교적 소규모로서, 제당의 마루 및 사면에 대하여 측선을 설정하고 측선을 따른 2차원 전기비저항 탐사가 수행된 결과이다. 현장자료 측정에 사용된 쌍극자 간격은 5 m이며 측선의 총연장은 마루의 경우 320 m 이고 사면의 경우에는 295 m 이다.

그림에서 뚜렷하게 보이는 이상대는 각 단면의 중앙부와 우측 하부의 저비저항 이상대이다. 한편, 좌측에서 우측으로 진행하면서 전기비저항 값의 분포는 불균질하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이와 같은 영역은 저비저항 이상대가 발달하는 영역과 연관성이 있는 것으로 보여 제체하부로의 누수가능 지역으로 해석되었다. 즉, 전반적으로 검은색 계열로 나타나고 있는 좌측의 영상에 대하여 우측으로 진행하면서 저비저항대로 변화하고 있으며 우측의 저비저항대 또한 이와 같은 형태의 전기비저항 구조를 보여주고 있다. 이와 같이 전기비저항 분포의 수평적 변화가 존재함은 제체 내부 중심점토의 변형이 있음을 시사하는 것으로 이에 의한 제당의 누수가 가능한 것으로 해석되었다.

이 논문에서는 이와 같은 제당누수에 대한 고찰을 위하여 제당의 형태를 유한요소 격자 시스템으로 구현하는 3차원 전기비저항 수치모델링을 실시하였다. 그림 2는 수치모형 실험을 위하여 설정한 제당모형으로서, 그림에서 제체의 높이는 15 m이며 상·하류의 구배는 1:2로 동일하다. 제체의 중심에는 10 ohm-m 정도의 값을 가지는 중심점토부가 존재하고 있으며, 이를 500 ohm-m 층이 피복하고 있다. 또한 제체의 중심점토부는 불균질한 영역을 가지고 있으며, 그 전기비저항 값은 50 ohm-m 및 200 ohm-m를 가지는 것으로 설정하였다. 이와 같은 제당 모형에 대하여 제당의 종단면을 따라 그림에서와 같이 7개 측선의 쌍극자배열 2차원 전기비저항 탐사가 수행되는 것을 가정하였다. 여기서, 쌍극자 간격은 5 m로 하였으며, 각 측선의 길이는 95 m로 동일하다.



(a)



(b)

그림 1. 국내 농업용 제당에서의 전기비저항 탐사결과 예. (a) 마루 (b) 사면

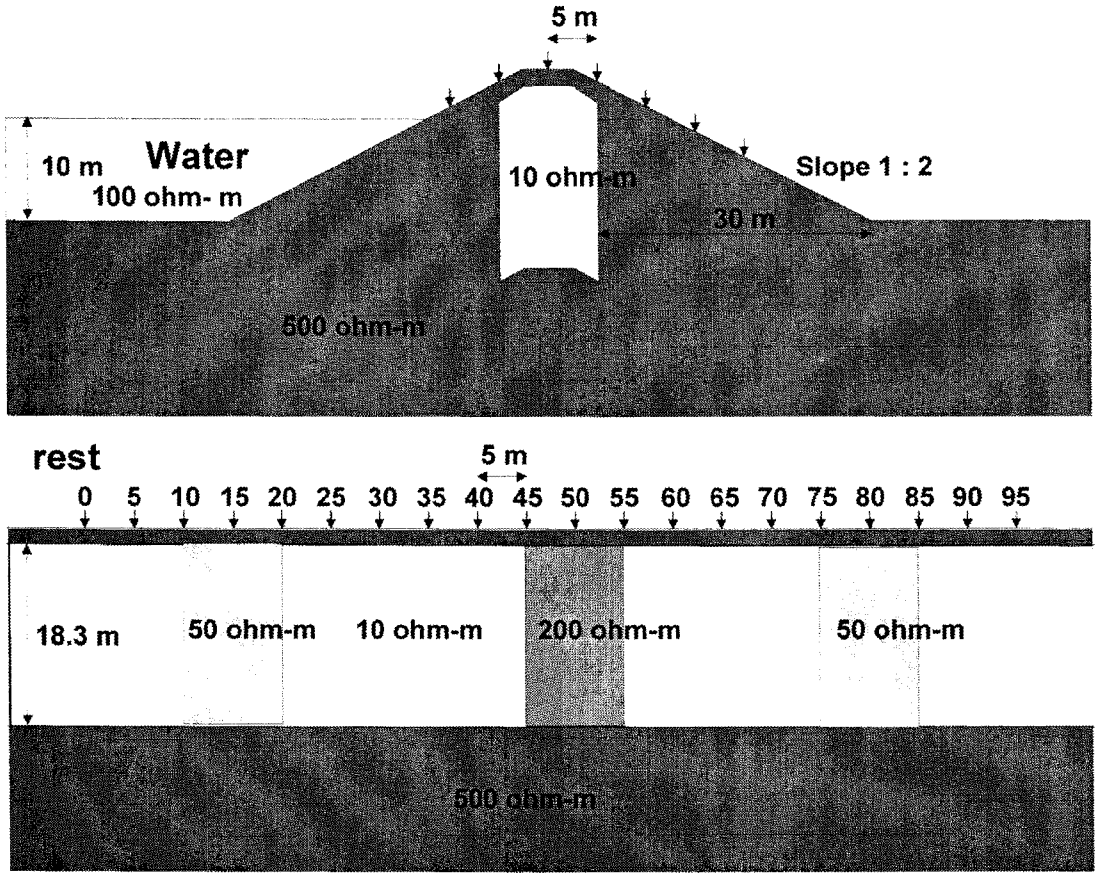
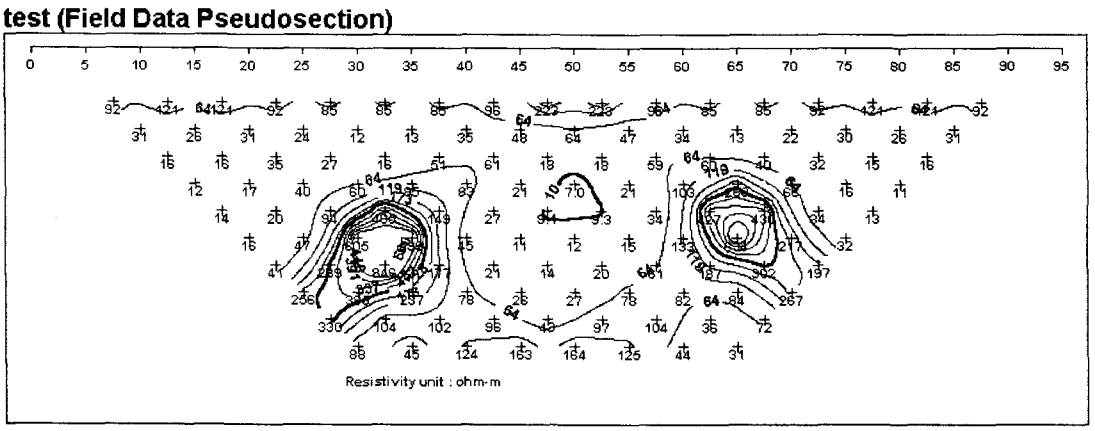
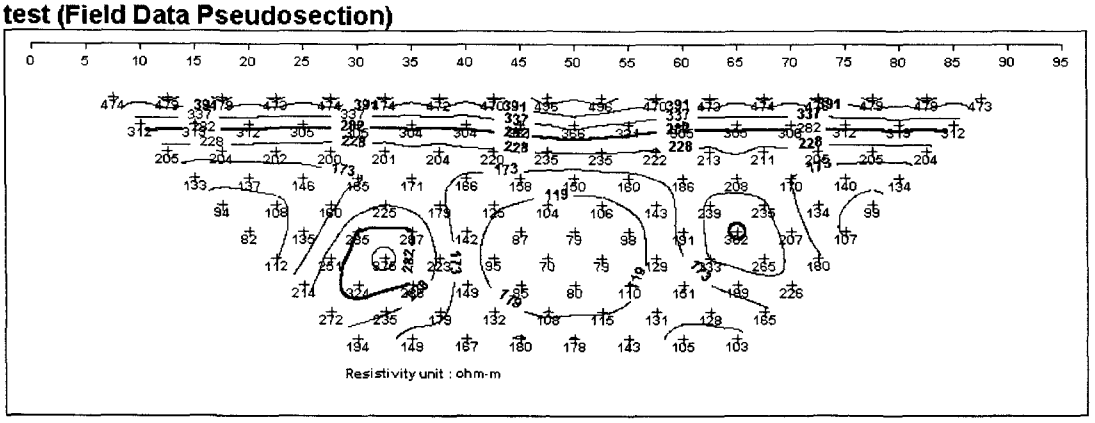


그림 2. 제당누수에 대한 수치모형 실험을 위한 제당의 모식도 및 측선의 배열. 제체의 중심부에 차수의 역할을 담당하는 중심점토 부분이 존재하고 있으며, 상류측에는 담수영역이 존재하고 있다. 또한 제체의 중심부에는 불균질한 영역이 존재하고 있다. 서로 5 m 떨어진 7개의 측선에 대하여 쌍극자배열 2차원 탐사가 수행되는 경우를 가정하였다.

그림 3은 그림 2와 같은 형태의 제체 구조에 대하여 일반적인 제당 누수조사 수행에서와 같이 제당의 마루 및 사면에 대하여 2차원 전기비저항 탐사를 수행하는 경우에 대한 수치모델링의 결과를 나타낸 것이다. (a)의 경우 제체의 정상부에서 쌍극자배열 2차원 전기비저항 탐사 결과인 겉보기 비저항 가단면도를 나타내고 있으며, (b)는 제체 사면에서의 겉보기 비저항 가단면도를 나타내고 있다. 제체의 정상부에서는 하부의 중심점토 영역의 영향으로 전반적으로 매우 낮은 값의 겉보기 비저항 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편 제체 사면에 대한 전기비저항 탐사결과인 (b)를 보면 제체 내부의 중심점토 영역에서 벗어나 있음으로 인하여 천부에는 비교적 고비저항의 값을 보이고 있으나, 전극전개수가 증가하면서 하부에는 낮은 겉보기 비저항 값을 보이고 있으며 이는 측선 하부가 아닌 제체 내 중심점토의 영향에 의한 것으로 설명된다. 즉, 측선을 따르는 2차원 탐사에 있어서 지하구조의 반응은 측선 하부의 전기비저항 구조뿐만 아니라 측선 주변의 전기비저항 구조에 의한 영향이 포함되므로, 해석시 이에 대한 고려가 이루어져야 할 것이다.



(a)

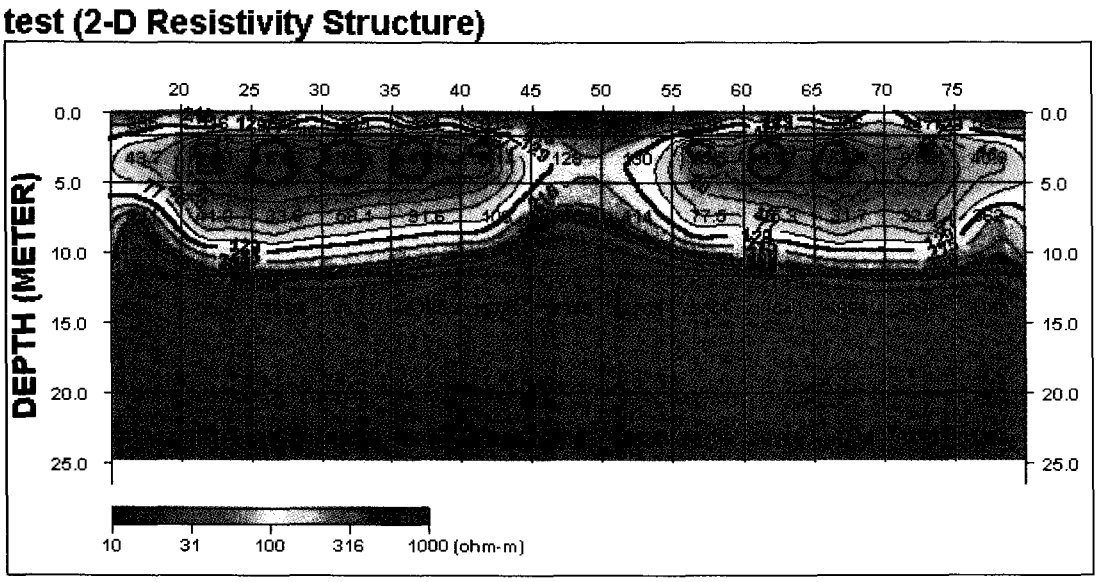


(b)

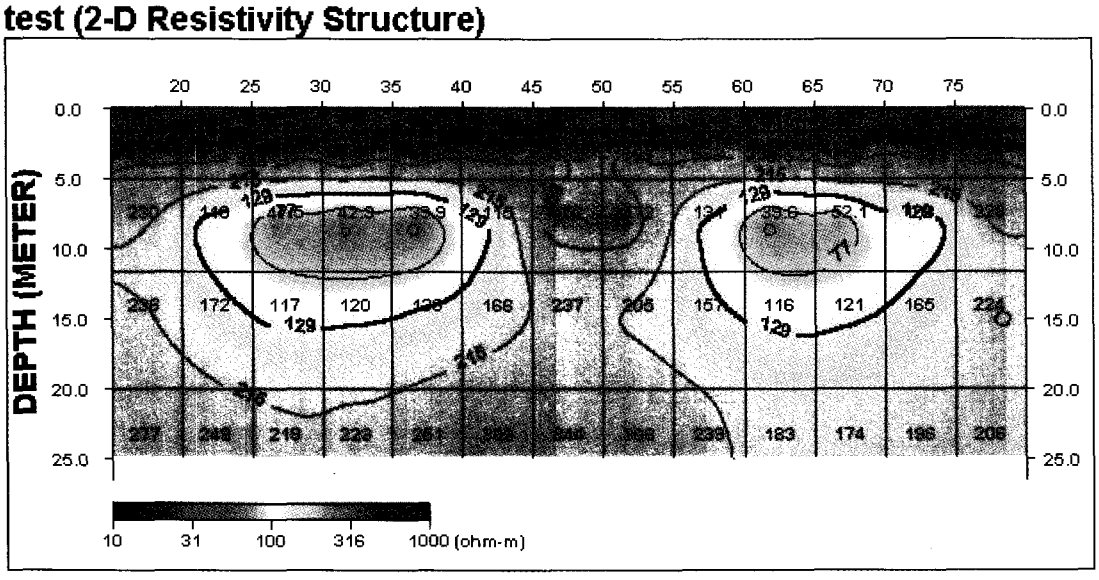
그림 3. 제당 모형에 대한 3차원 전기비저항 수치모델링 결과인 겉보기 비저항 가단면도.
(a) 제당 마루에서의 2차원 전기비저항 탐사결과
(b) 제당 사면에서의 2차원 전기비저항 탐사결과

한편 그림 4는 그림 3의 탐사자료에 대한 2차원 전기비저항 역산결과를 보여주고 있으며, 제체 정상부에서의 2차원 역산 결과는 전반적으로 중심점토의 전기비저항 값을 반영하여 저비저항대로서 나타나고 있으며, 그 하부에는 실제 전기비저항 값에 비하여 매우 높은 값인 5000 ohm-m이상의 값을 보이고 있다. 하부의 매우 높은 전기비저항 값은 제체의 형태가 횡단방향에 있어서 상류에는 물이 존재하고 있으며, 정상부를 중심으로 산모양의 고도구배에 의한 지형효과에 기인하는 것으로 파악된다. 즉, 측선을 따르는 방향으로의 지형변화는 거의 없음에 비하여 이에 수직인 방향으로는 상당한 지형변화가 존재하며, 2차원 해석시에는 이에 대한 고려가 불가능함에 기인하는 것으로 파악된다. 이와 같이 측선에 수직인 방향의 지형구배가 가지는 지형효과에 의한 전기비저항 영상의 왜곡은 제당에 대한 2차원 탐사뿐만 아니라 지반조사에서도 일반적으로 발생하는 것으로 그림 5에는 국내에서 수행된 지반조사를 위한 전기비저항 탐사에 의한 2차원 해석 결과 및 3차원 지형을 고려한 3차원 해석의 예를 보여주고 있다. 그림의 예는 측선방향의 고도변화는 심하지 않은 반면 이에 수직인 방향의 고도변화가 매우 심한 경우이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 2차원 해석을

수행한 경우 전반적인 전기비저항 값이 높은 반면 3차원 해석을 수행한 경우 전기비저항 값이 전반적으로 작은 값을 나타내고 있으며, 하부의 지하구조 또한 시추결과 및 야외지질조사 결과에 잘 부합하고 있다. 2차원 해석의 경우에는 이와 같이 측선에 수직인 방향으로의 고도변화를 고려하지 못함으로 인하여 하부의 지질구조에 왜곡이 포함되어, 3차원 해석의 결과와는 달리 전구간이 신선한 암반으로 나타남에 비하여 3차원 해석의 경우는 단면의 중앙부위에 이상대가 존재함을 잘 보여주고 있다. 따라서, 제체의 경우에 있어서도 이와 같은 변화를 고려하여야 할 것이다.

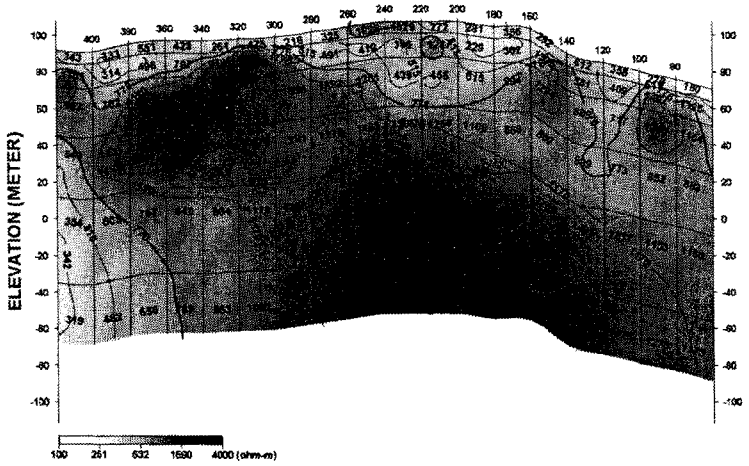


(a)

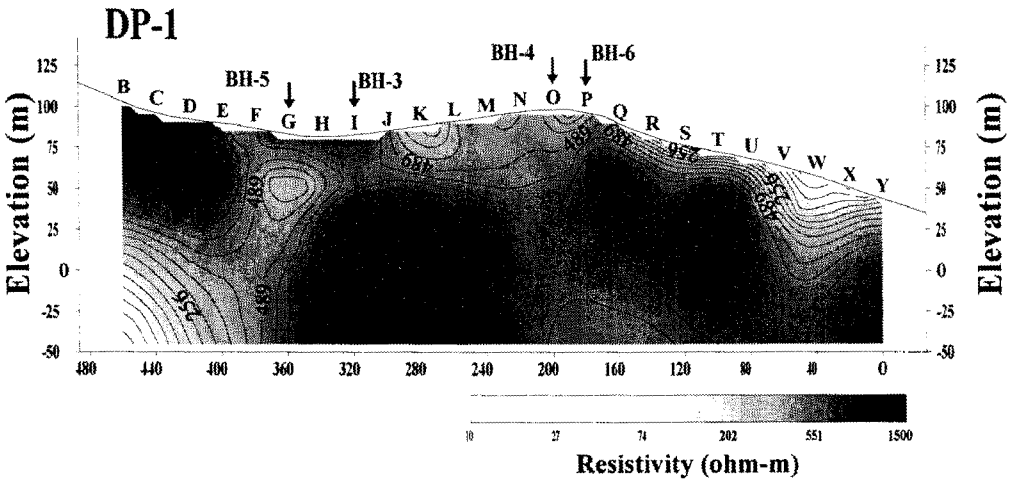


(b)

그림 4. 제당 모형에 대한 3차원 수치모델링 결과 (그림 1)의 2차원 전기비저항 역산 결과 (a) 제당 마루에서의 2차원 전기비저항 탐사결과 (b) 제당 사면에서의 2차원 전기비저항 탐사 결과



(a)



(b)

그림 5. 2차원 및 3차원 전기비저항 해석 영상의 비교. (a) 2차원 전기비저항 영상 (b) 지형을 포함한 3차원 전기비저항 역산에 의하여 획득된 (a) 단면에 해당하는 수직 절개 영상.

한편 제체 사면에 대한 2차원 역산 결과인 그림 4(b)를 보면 전반적으로 제체의 전기비저항 값에 비하여 낮은 값을 보이고 있으며, 이는 제체 중심부의 중심점토에 의한 영향이 포함되었기 때문으로 파악된다. 즉, 측선을 따르는 2차원 탐사에 있어서 지하구조의 반응은 측선 하부의 전기비저항 구조뿐만 아니라 측선 주변의 전기비저항 구조인 중심점토에 의한 영향이 포함되었으며, 이에 대한 영상이 2차원 전기비저항 영상에 나타나고 있으며, 중심점토 영역의 제체에 수직한 방향으로의 발달 양상은 이와 같은 2차원 탐사를 수행하는 경우 정확하게 파악할 수 없음을 말하여 주고 있다.

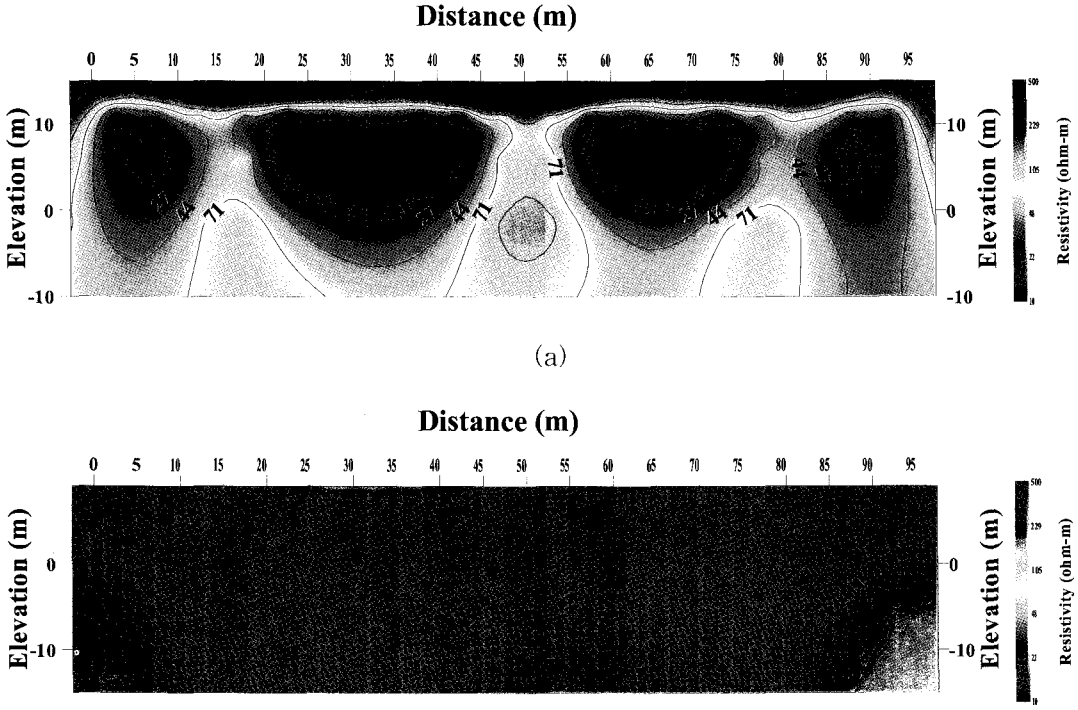
또한 그림 2에서 임의로 설정한 불균질한 영역에 대한 영상을 보면 먼저 중앙의 경우 그림 2에서 200 ohm-m의 전기비저항 값을 갖는 것으로 설정한 영역에 그림 4의 (a) 및 (b)에서와 같이 이를 반영하는 형태의 영상이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 양쪽에 위치하는 50 ohm-m의 불균질대는 두 영상에서 공히 나타나지 않고 있으며, 중심점토의 영향

에 의하여 가리워져 있음을 알 수 있다.

이와 같이 2차원 전기비저항 탐사가 수행된 경우에 대하여 여러 측선을 동원한 3차원 탐사가 수행된 경우를 상정하였으며, 그림 2에서의 7개 측선에 대하여 각 측선별로 2차원 탐사가 수행된 경우의 탐사자료를 이용하여 3차원 전기비저항 역산을 수행하였다. 그림 6은 이와 같은 3차원 전기비저항 역산 결과에 대한 수직 절개 영상을 나타낸 것으로 각 단면은 그림 4의 (a) 및 (b) 단면에 대응된다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 제당 마루 하부의 전기비저항 영상은 하부의 중심점토부분의 영상을 뚜렷하게 보여주고 있으며, 특히 지하구조 모형에서 설정한 바와 같이 제체 내의 불균질한 부분의 영상이 중앙부위는 물론이고 영상의 좌우측에 나타나고 있다. 또한 그 형태는 실제 구조와 유사하게 나타나고 있다. 한편 (b)를 보면 그 전기비저항 값은 500 ohm-m 내외의 분포를 가지며 거의 균질한 영역임을 보여주고 있고, 제체 내 중심점토부분의 영향이 거의 나타나지 않는 상당히 정확한 영상을 보여주고 있다. 또한 이들 전기비저항 영상을 종합할 때 제체 내 중심점토부분의 제체에 수직인 방향으로의 전기비저항 분포를 비교적 정확히 영상화하고 있음을 알 수 있으며, 따라서, 3차원 전기비저항 탐사를 통하여 제채내 전기비저항 구조의 3차원적 분포를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 제체에 대한 3차원 전기비저항 모형실험 결과를 보면, 제체에 있어서 일반적으로 수행되는 2차원 전기비저항 탐사의 경우 제채의 특수한 형태 및 제체 내부의 매우 저비저항값을 가지는 중심점토의 영향으로 중심점토의 제체를 횡단하는 방향으로의 발달형태를 정확히 영상화하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 또한, 제체 내의 불균질한 영역에 대한 영상획득에 있어서도, 비교적 전기비저항 대비가 큰 부분의 경우 정확한 영상화가 가능하나 그 차이가 적은 경우 구조를 제대로 파악하기 어려움을 알 수 있다. 이와 같은 점에 대하여 3차원 탐사를 수행하는 경우 제체의 중심점토의 발달형태를 종단 및 횡단방향에서 모두 정확하게 영상화가 가능함을 알 수 있으며, 특히 2차원 탐사에 비하여 3차원 탐사를 수행함으로써 더욱 많은 제체 내 전기비저항 분포에 대한 정보가 탐사자료의 해석에 투입될 수 있음으로 인하여 비교적 전기비저항 대비가 크지 않는 부분에 있어서도 2차원 탐사에서 보다 신빙성 높은 영상을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 제체에 대한 안정성 및 누수 부위 조사를 위한 전기비저항 탐사의 적용에 있어서 격자망의 측점 또는 측선을 이용한 3 차원 전기비저항 탐사 및 해석이 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보이며, 특히 제체 전구간에 있어서 정밀한 영상화가 필요한 부분에 대하여 3차원 탐사를 동원함으로써, 2차원 탐사와 3차원 탐사를 효과적으로 병용할 수 있을 것으로 판단된다.



(a)

(b)

그림 6. 제당 모형에 대한 3차원 수치모형 실험. 제당 표면에서 5 m 간격으로 설정한 7개 측선에 대한 전기비저항 탐사결과로부터 획득된 3차원 전기비저항 영상. (a) 제당 마루 하부의 전기비저항 영상 (b) 제당 사면 하부의 전기비저항 영상

4. 결 론

국내에 산재하는 각종 제당은 누수가 진행중이거나 취약한 것으로 보고되고 있으며, 이에 대한 유지/보수를 위하여 전기비저항 탐사가 많이 적용되고 있다. 제당에 대한 전기비저항 탐사의 수행은 보통 2차원 탐사 및 해석에 의존하고 있는 바, 본 논문에서는 최근 지반조사 분야에서 효율적으로 적용되고 있는 3차원 전기비저항 탐사의 적용 및 해석에 대하여 설명하고, 제체에 대한 조사를 수행하는 경우에 대하여 수치모형 실험을 통하여 3차원 전기비저항 탐사가 제체 내부의 중심점토 및 불균질대에 대한 영상을 획득하는데 효과적인 방법임을 보였다. 제체에 대한 전기비저항 탐사 수행시에는 지반조사 등의 분야와는 달리 격자상의 측선 설정이 어려운 단점은 있으나, 제체라는 특별한 형태의 전기비저항 구조 모형 설정을 통하여 더욱 정확한 영상화가 가능하며, 특히 제채내 중심점토 부분의 영상을 획득하는데 3차원 탐사가 상당히 효과적임을 알 수 있었다. 향후 제체에 대한 탐사에 있어서 3차원 탐사의 적용은 2차원 탐사에 의하여 일차적으로 파악된 이상대 부분에 대하여 정밀 영상화의 방편으로 수행될 수 있을 것으로 기대되며, 특히 최근의 3차원 전기비저항 탐사가 다중채널 전기비저항 탐사기기를 사용하게 됨에 의하여 탐사수행 시간이 절감되는 방향으로 발전할 것으로 예상됨에 비추어 볼 때, 현실적으로 그 적용성도 높은 것으로 판단된다. 향후 국내 제당누수 조사에서의 3차원 전기비저항 탐사의 적용이 기대된다.