

3차원 전기비저항탐사에 의한 석회암 공동탐지

Detection of Limesilicate Cavities by 3-D Resistivity Survey

박삼규¹⁾, Sam-Gyu Park, 이명종¹⁾, Myeong-Jong Yi, 김창렬¹⁾, Changryol Kim, 손정술¹⁾, Jeong-Sul Son, 김정호²⁾, Jung-Ho Kim, 조성준¹⁾, Seong-Jun Cho, 서구원³⁾, Goo-Won Seo

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), samgyu@kigam.re.kr

²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원, Principle Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM)

³⁾ 한국농촌공사 전라남도본부 환경지질사업부 과장, Section Chief, Environmental & Geological Engineering Division, Korea Rural Community & Agriculture Corporation (KRC)

SYNOPSIS : In this study, we examined the applicability of three-dimensional electrical resistivity survey to detect underground cavities of ground subsidence area at the field test site, located at Yongweol-ri, Muan-gun in Korea. Underground cavities are widely present within the limesilicate bedrock overlain by the alluvial deposits in the area of the test site where the ground subsidences have occurred in the past. The limesilicate cavities are mostly filled with groundwater and clays in the test site. Thus, cavities have low electrical resistivity compared to the surrounding host bedrock. The results of the study have shown that the zones of low resistivity correspond to the zones of the cavities identified in the boreholes at the site, and that the three-dimensional electrical resistivity survey used are very effective to detect underground cavities.

Key words : Limesilicate cavities, 3-D resistivity, Imaging technology, Ground subsidence

1. 서 론

최근 들어 사회 기반시설의 확충을 위하여 불가피하게 석회암 지대에 건설되는 철도 및 도로의 교량, 터널 등 대형구조물 건설이 증가하고 있다. 이러한 석회암 지대는 지하수에 의한 용식작용으로 공동이 형성되어 있는 경우가 많다. 석회암 공동이 발달되어 있는 상부에 대형 구조물을 시공하는 과정에서 자연붕락에 의한 지반침하 또는 함몰 등이 발생하면 실시설계를 변경해야하고 때로는 건설공사까지 중단해야 하는 어려움이 따르며 이로 인하여 인명 및 재산피해가 발생하는 사례가 국내외에서 보고되고 있다(전석원 등 2005). 우리나라의 경우 석회암은 경기육괴, 영남육괴가 발달한 경기, 충청, 전라, 경북지방의 결정 편암계에 험재 되어 널리 분포하고 있어 석회암 지역에서의 건설공사시 공동분포에 대한 정밀조사가 요구되고 있다. 석회암 공동탐지를 위해서 일반적으로 물리탐사 및 시추조사가 수행되고 있으나 넓은 지역에 분포하고 있는 공동의 분포범위 및 형태를 공간적으로 파악하기에는 한계점이 있어 새로운 조사기법 개발이 필요하다.

국내외에서 지반침하지역 공동탐지에 이용되고 있는 물리탐사는 전기비저항탐사, GPR(Ground Penetrating Radar)탐사, 전자탐사, 고정밀 중력탐사, 탄성파탐사, 각종 토모그래피탐사 등이 있다. 이들 탐사법 중에

지표부근의 공동탐지에는 전기비저항탐사, 고정밀 중력탐사(Yuhr et al., 1993; Dourado et al., 2001), 탄성파탐사 등이 이용되고 있으며, 물리탐사기법 중 최고 분해능의 지하영상을 제공하는 GPR 탐사는 지표 극천부에 분포하는 공동 탐지 및 이와 수반되는 토양층 교란 조사 등에 응용되고 있다. 한편, 지표 탐사의 경우보다는 응용빈도가 낮으나 비교적 심부에 위치하는 공동 탐지를 위하여 시추공 탄성파 토모 그레피, 전기비저항 토모그래피 및 레이다 토모그래피(Kim et al., 2004) 기술이 이용되고 있다. 이와 같은 다양한 물리탐사법이 석회암의 공동탐지에 이용되고 있지만 주로 2차원탐사 결과로부터 해석하고 있어 공간적으로 분포하고 있는 지하공동을 파악하는데 한계점을 가지고 있다. 최근 들어 전자기기 및 컴퓨터 발달에 힘입어 3차원탐사 및 해석기술이 발달되면서 지반구조를 3차원적으로 영상화할 수 있는 기법이 개발되어 지반조사 분야뿐만 아니라 환경, 지질재해분야의 조사 및 유지관리기술로도 널리 이용되고 있다.

이에 본 연구는 석회규산염암 내에 발달되어 있는 공동분포 지역을 실험장으로 선정하여, 2차원과 3 차원 전기비저항탐사를 실시하고 그 결과로부터 석회암 내에 발달되어 있는 지하공동의 공간적인 분포 형태를 영상화하여 이를 검증하기 위하여 동일지역에서 수행한 시추결과와 비교분석함으로써 3차원 전 기비저항탐사의 공동탐지 유용성을 검토한다.

2. 실험장 개요

실험장은 무안군 용월리에 위치하고 있으며 과거에 석회암 공동의 함몰에 의한 지반침하가 발생한 이력이 있는 지역이다(그림 1참조). 이 지역의 지질특성은 상부에 대부분 논토양을 포함한 제 4기 충적퇴적층으로 덮여 있으며, 그 하부에 석회 규산염암이 분포하고 있다. 이 석회암은 무안읍 엄다면

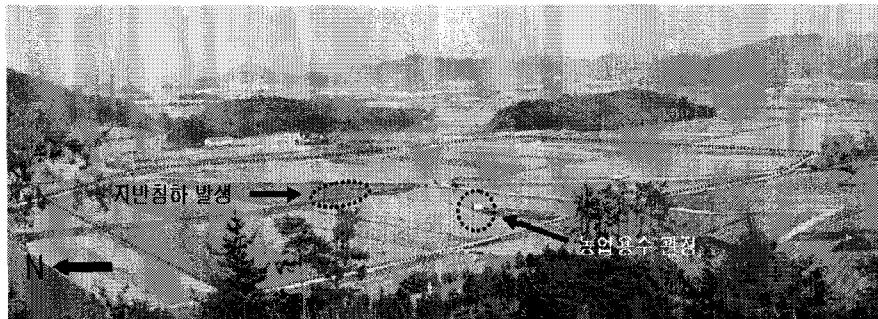


그림 1. 무안 용월리의 실험장 전경

에서 복길리에 이르는 약 18 km가 넘는 구간에 걸쳐 800~1,500 m의 폭으로 분포하고 있으며, 북북동-남남서 방향으로 발달하고 있는 광주 단층대 서측 인근에 위치하고 있다(황재하 외, 2000). 실험장은 단층 파쇄대를 따라 유동하고 있는 지하수의 작용으로 석회규산염암이 용식되어 형성된 공동이 비교적 소규모로 다양한 심도에서 넓은 지역에 걸쳐 발달하고 있어 지하수의 흐름이 용이하여 쉽게 침식될 수 있는 지질 구조적 특징을 갖고 있다. 실험장 내에는 농업용수를 위한 관정이 개발되어 있으며 농작물의 용수공급을 위하여 지하수를 양수하고 있다. 농번기에는 이 지역 농업용수의 상당량을 지하수에 의존하고 있으며, 지하수의 과잉 양수로 인하여 지하 공동 내에 채워져 있는 지하수위가 하강함으로 지표부에서 수차례 지반 함몰이 발생하였다. 그래서 2004년과 2005년에 무안군에서 지반침하의 원인 규명 및 대책수립을 위하여 한국농촌공사에 조사를 의뢰하여 시추조사를 수행한 적이 있으며, 조사 결과로부터 많은 공동이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다(농업기반공사, 2004).

실험장에 분포하고 있는 석회규산염암 공동은 기존의 조사결과에 의하면 망구조로 이루어져 있으며 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있는 것으로 알려졌다. 그림 2는 실험장 내에 있는 시추공을 이용하여 공동의 형태 및 크기를 초음파 탐사 시스템으로 파악한 결과를 나타낸다. 시추조사 결과에 의하면 조사공은 다수의 석회규산염암 공동이 확인된 것으로 이 중 9.5~10.7 m 구간에서 석회규산염암 공동에 대한 정보를 얻기 위하여 심도 9 m에서 11 m 까지 10 cm 간격으로 자료를 획득하여 3차원 공간상에서 면으로 도시한 결과이다. 그림 2는 실제 심도와 공동의 크기가 같은 축척으로 도시되어 있으며 그림 중의 (a), (b), (c)는 서로 다른 각도에서 공동의 영상을 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 시추 주상도 상에

서는 수직방향으로 1 m가 넘는 공동이 존재하는 것으로 파악되었으나, 실제로 공동의 수평적인 방향으로는 수직방향에 비해 그리 크게 형성되어 있지 않음을 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 용월리 실험장의 석회규 산염암 공동은 좁은 폭을 가진 네트워크 형태의 작은 석회규산염암 공동들의 존재 할 것으로 판단된다.

용월리 실험장의 시추조사에 의하면 논이 위치하고 있는 평지는 깊이 4~6 m 내외의 토사층이 분포하고 있으며, 대부분 점토질 흙으로 구성되어 있다. 석회암 공동은 다양한 깊이에서 발견되기는 하지만 대부분의 공동이 지표부근의 토사층 하부에 분포하는 경우가 많다. 지표부근에 분포하고 있는 점토질 흙이 석회규 산염암 공동의 상부에 놓일 경우, 지하공동 내의 지하수위가 하강하게 되면 지반의 역학적 평형상태가 깨어져 지하수위 하강으로 인한 지반합물이 발생될 것으로 생각된다. 이 지역을 포함하여 인근 무안읍 시가지 지역은 지하수 관정이 개발되어 지하수의 과잉 양수로 인하여 석회규산염암 공동 내의 지하수위가 하강함으로써 지표부에서 수차례 지반 합물이 발생한 이력을 가지고 있다. 용월리 실험장 내에서 발생된 지반침하는 주로 농업용수를 위한 관정 주위에 국한되어 있지만, 실제의 석회규산염암 공동은 보다 넓은 지역에 걸쳐 분포할 것으로 생각된다.

그림 3은 지하공동 상부의 토사층 특성에 따른 지반침하의 유형을 나타내고 있다. 사질토의 경우는 하부 공동이 점차 봉락됨에 따라 그 영향이 지표까지 바로 전달되어 점성토에 비해 상대적으로 완만하고 서서히 침하가 일어나는 경향을 보인다. 반면에 점성토의 경우는 사질토에 비해 그 자체의 역학적 지지력이 어느 정도 있으므로, 하부 공동의 봉락 초기에는 그 영향이 지표까지 바로 나타나지 않다가 공동과 점성토 층의 하부의 봉락이 어느 정도 진행되고 나서 지표에서 함몰형의 지표 봉락이 발생한다. 용월리 실험장의 경우는 그림 (b)에 속하는 경우로 상당한 위험성을 가지고 있다.

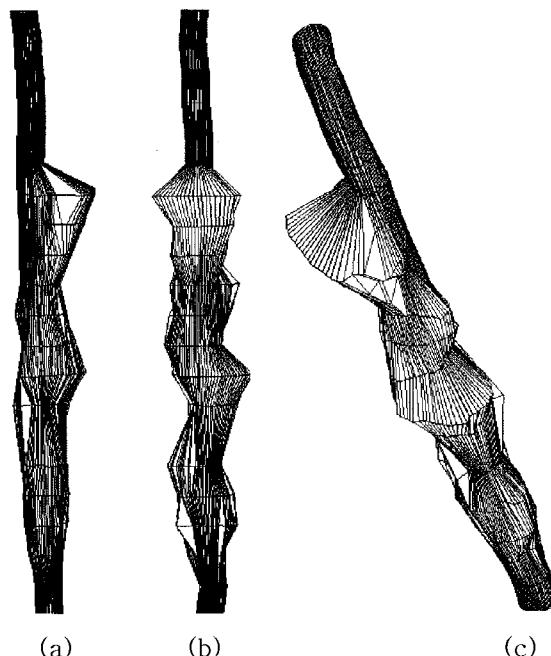


그림 2. 시추공 내에 분포하고 있는 공동의 3차원적인 형상, (a), (b), (c)는 서로 다른 각도에서 공동의 영상을 보여주고 있다.



(a) 사질토의 지반침하 형태

(b) 점성토의 지반침하 형태

그림 3. 지하공동 상부의 토사층 특성에 따른 지반침하의 유형

3. 현장실험 방법 및 결과

3.1 2차원 전기비저항탐사

용월리 실험장의 전기비저항 탐사축선 및 시추 주상도를 각각 그림 4와 그림 5에 도시한다. 전기비저항탐사는 시추조사 결과로부터 지하공동이 많이 발견된 시추공(BH-75, 92, 93)을 중심으로 넓은 영역에 걸쳐 2차원 전기비저항탐사를 수행하였다. 탐사장비는 미국 AGI사의 Super sting R8/IP를 사용하였으며, 탐사축선은 실험 대상지가 농경지인 연유로 축선 설치에 제약이 있어 주로 농로 및 논두렁을 이

용하였다. 탐사시 전극배열은 동일 측선에서 Dipole-dipole array와 Modified pole-pole array의 2가지 배열을 사용하였으며, 각 배열의 전극간격을 5 m로 하여 최대 약 35 m까지의 가탐 심도 자료를 취득하였다.

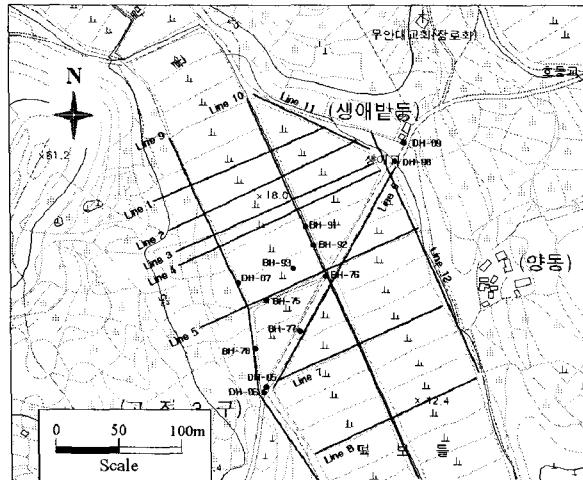


그림 4. 실험장 내의 탐사측선 및 시추 위치도

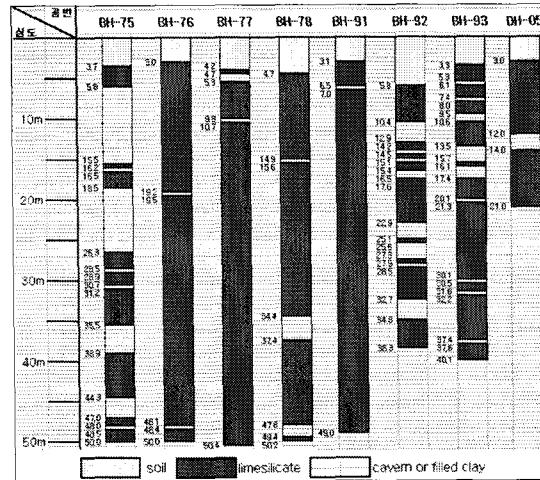


그림 5. 실험장 내의 시추 주상도

각 측선별로 두 종류의 전극배열로부터 취득된 자료를 통합하여 자료의 정확도를 최대한 높이도록 하였으며, 통합된 자료는 역해석 과정을 거쳐 전기비저항 분포 영상을 도출하여 지하공동 분포 해석에 사용하였다. 그림 6은 측선 5번의 2차원 전기비저항 탐사 결과를 도시한 것이다. 이 전기비저항 영상에서 청색계열은 저비저항을 나타내고, 적색계열은 고비저항을 나타내고 있다. 지표부근의 토사 및 풍화토에서는 저비저항이 분포하고 있으며, 전기비저항 영상의 오른쪽 아래와 같이 기반암에서는 상대적으로 고비저항을 나타내고 있다. 탐사측선 상의 시추공 75번은 그림 5에서 알 수 있듯이 지하공동이 많이 분포하고 있으며, 이 위치에 저비저항대가 지표에서 하부까지 분포하고 있다. 실험장 내의 시추조사 결과에 의하면 대부분의 지하 공동은 점토로 충전되어 있으며, 지하수위가 지표근처에 형성되어 있는 점을 고려하면 지표에서 심부까지 분포하는 저비저항대는 지하 공동이 존재할 가능성이 높을 것으로 생각된다.

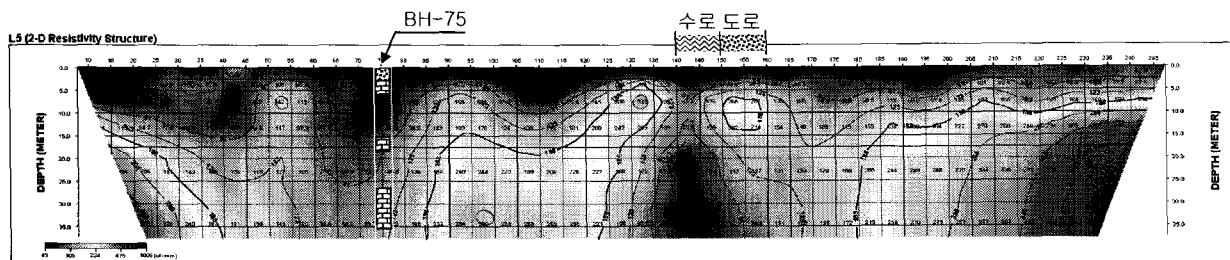


그림 6. 측선 5의 전기비저항 분포도

그림 7은 실험장 내에서 수행한 2차원 전기비저항 탐사 결과를 펜스 다이어그램으로 나타낸 것이다. 실험장 북동쪽의 하부에는 기반암의 영향으로 전기비저항이 상대적으로 높게 분포하고 있으며, 그 외의 일부 영역에서는 낮은 전기비저항이 나타나고 있다. 그림 8은 각 탐사 측선의 결과를 바탕으로 심도별 전기비저항 영상을 나타낸 것 중 심도 10 m에서의 전기비저항 분포와 석회규산염암 공동이 많이 발견된 시추공의 위치를 도시한 것이다. 탐사 지역의 대부분은 농경지로 표토층은 낮은 전기비저항 값을 보일 것이나, 심도 10 m 부근에서 전기비저항이 50 ohm-m 이하로 낮게 나타나는 것은 석회규산염암 공동과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다. 시추조사에 의하면 이 지역에 발달되어 있는 공동은 대부분

점토 및 지하수로 채워져 있기 때문에 석회규산염암 공동이 분포하는 곳은 상대적으로 전기비저항이 낮을 것으로 판단되며, 이는 전기비저항 영상 결과와 시추 주상도를 비교하면 심도 10 m 부근에서 공동이 다수 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2 3차원 전기비저항탐사

2차원 전기비저항탐사 결과를 바탕으로 50 ohm-m 이하의 저비저항대 영역을 중심으로 석회규산염암 공동의 분포형태를 3차원적으로 파악하기 위하여 3차원 전기비저항탐사를 실시했다. 그림 9는 3차원 전기비저항탐사 측선과 영역을 표시한 것이다. 3차원 전기비저항탐사에 있어서 측정방법은 2차원 전기비저항탐사와 동일하다. 이것은 전기비저항탐사에 있어서 전류전극으로부터 전류를 흘려 보내고 전위전극에서 전위차를 측정할 때 지표면에서는 공간적으로 분포하는 전위차를 측정하기 때문이다. 다만 3차원 전기비저항 역해석을 위하여 전기비저항탐사 측선을 가로와 세로로 다수 조밀하게 배열해야 할 필요가 있으며, 측선간격은 측점간격을 고려할 필요가 있다. 용월리 실험장에서는 전극간격을 5 m로 하였으며 측선간격을 10 m로 설정하여 동서방향으로 10개 측선을 설치하고, 남북방향으로 7개의 측선을 설치하여 전기비저항탐사를 수행했다.

그림 10은 실험장에서 저비저항대가 분포하고 있는 영역에서 실시한 17개의 탐사측선 자료를 이용하여 3차원 전기비저항 역해석을 수행한 결과이다. 전체적으로 저비저항이 동서방향으로 분포하고 있으며, 이것은 2차원 전기비저항탐사로부터 얻은 심도별 전기비저항분포도와 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 저비저항의 분포특성이 지표에서 깊이방향으로 연결성을 가지고 있는데 이러한 영역은 석회규산염암 내에 공동이 표토층 하부에 존재할 가능성이 높아 지반함몰의 위험성을 가지고 있다.

그림 11은 3차원 전기비저항 분포도로부터 석회규산염암 공동분포를 영상화 한 것이다. 이것은 시추조사와 전기비저항 탐사 결과를 비교분석하여 심도 6 m 이하에 분포하고 있는 저비저항대가 석회규산염암의 공동일 것으로 판단한 것이다. 3차원 전기비저항탐사 영역이 논바닥임을 고려하면 지표부근은 낮은 전기비저항이 분포하고 있으며, 석회규산염암 공동은 대부분 지하수와 점토로 채워져 있기 때문에 상대적으로 낮은 전기비저항을 나타내고 있다. 이러한 점을 고려하면 그림 11에서 석회규산염암 공동이 지표부근에 분포하고 있어 표토층과 연결성을 가지고 있음을 알 수 있으며, 이것은 시추조사로부터 석회규산염암 공동이 지표부근에 분포하고 있음과 일치하고 있다. 따라서 3차원 전기비저항 탐사 결과로부터 석회규산염암 공동의 분포 범위 및 형태를 공간적으로 파악하는데 유용함을 알 수 있다.

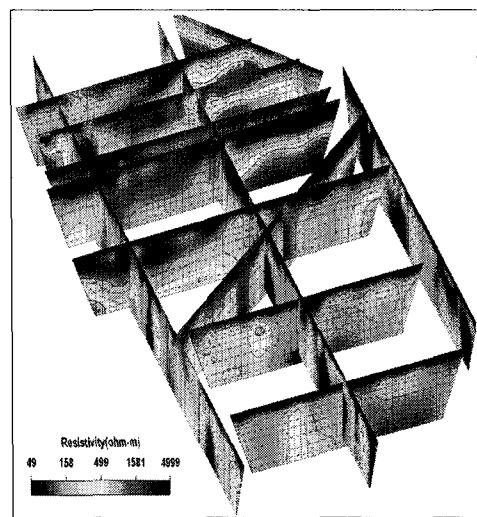


그림 7. 전기비저항 영상의 펜스 다이어그램

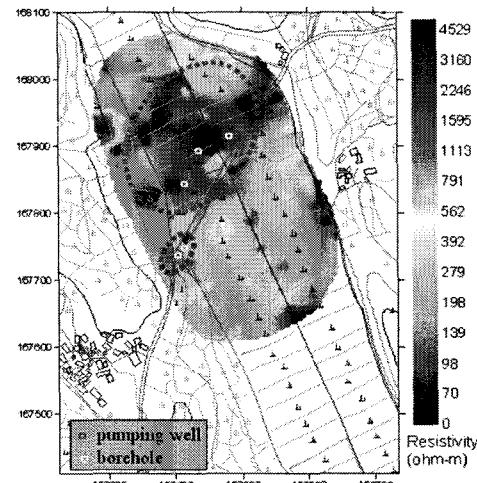


그림 8. 심도 10 m에서의 전기비저항 분포도

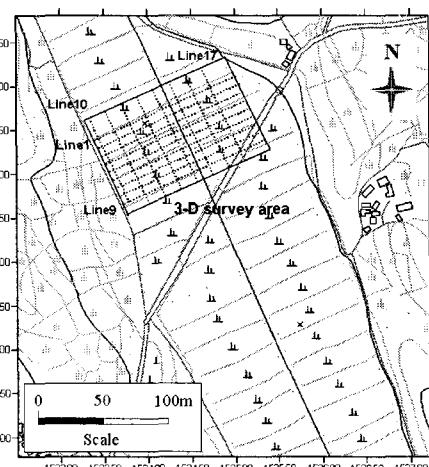


그림 9. 3차원 전기비저항 탐사 영역

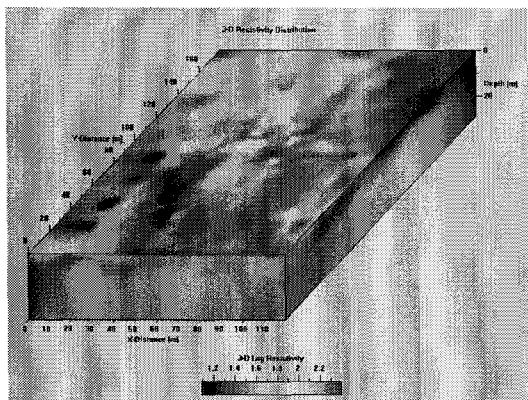


그림 10. 3차원 전기비저항 분포도

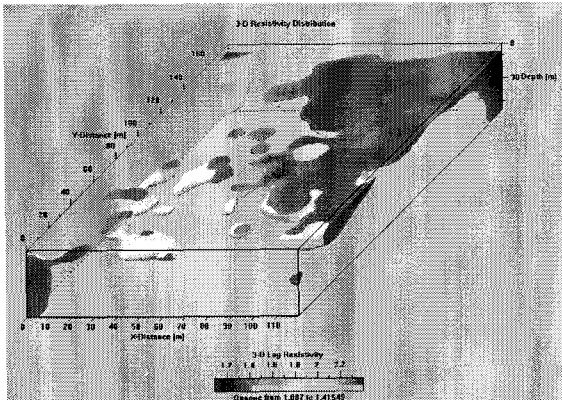


그림 11. 석회규산염암 공동의 영상화

4. 결 론

석회암 공동은 오랫동안 지표수나 지하수에 의해 지속적으로 화학적 풍화작용을 받아 생성되고, 공동의 규모 및 형태는 석회암 내에 발달되어 있는 균열 및 기타 불연속면의 발달상태에 따라 달라진다. 따라서 실제의 석회암 공동은 매우 불규칙하게 발달되어 있어 지반조사에서 정확한 공동의 규모 및 형태를 파악하기가 쉽지 않다. 이번 실험장은 석회규산염암 공동이 표토층 하부에 망구조로 넓게 분포하고 있어 3차원 전기비저항탐사 결과로부터 공동의 분포범위 및 형태를 영상화 할 수 있었다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 실험장 내의 석회규산염 공동은 망구조로 표토층 하부에 넓게 분포하고 있어 지하수위 하강으로 인하여 함몰이 발생하는 것으로 판단된다.
- 2) 2차원 전기비저항탐사와 시추조사를 비교분석한 결과 공동이 형성되어 있는 영역은 저비저항을 나타내고 있으며, 그 이유는 공동 내에 지하수와 점토로 충전되어 있기 때문에 $50 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ 이하의 저비저항을 나타내고 있다.
- 3) 과거의 지반함몰 위치 및 메커니즘을 고려할 때 저비저항대가 지표에서 심부로 연결성을 가지고 있는 영역은 지하수위가 하강하면 공동이 함몰될 위험성이 높은 것으로 판단된다.
- 4) 전기비저항탐사와 시추조사 결과를 바탕으로 전기비저항이 $50 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ 이하의 저비저항대가 공동임을 가정하여 3차원 전기비저항탐사 결과로부터 공동의 분포범위 및 형태를 영상화 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 전석원, 이희광(2004), “국내지반침하 조사 및 보강사례”, 지반침하 조사, 설계, 시공에 관한 심포지엄, 한국지질자원연구원, pp. 2~21.
2. 농업기반공사(2004), “무안 성남 주거지 지반침하지역 3차 물리탐사 및 암반공학 조사”, p. 245.
3. 황재하, 최범영, 김복철, 기원서, 송교영(2000), 무안 지질도록보고서, 한국지질자원연구원, p.58.
4. Dourado, J.C., Filho, W. M., Braga, A. C. O., and Nava, N.,(2001), "Detection of Cavities in Sandstone Using Gravity, Resistivity and GPR Methods", *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 19, pp.19~32.
5. Kim, J.-H., Cho, S.-J., and Yi, M.-J.,(2004), "Borehole radar survey to explore limestone cavities for the construction of a highway bridge", *Exploration Geophysics (Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists)*, Vol. 35, No. 1, pp.80~87.
6. Yuhr, L., Bension, R.C., and Butler, D.,(1993), "Characterization of Karst Features Using Electromagnetics and Microgravity: a Strategic Approach", *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, San Diego, California, USA, pp.209~228.