

물리탐사 기술의 석회암 지반침하 지역 공동탐지 적용성 연구

김창렬^{1*} · 김정호¹ · 박삼규¹ · 박영수² · 이명종¹ · 손정술¹ · 임형래²

¹한국지질자원연구원 지반안전연구부

²한국지질자원연구원 지질기반정보연구부

Application of Geophysical Methods to Cavity Detection at the Ground Subsidence Area in Karst

Changryol Kim^{1*}, Jung-Ho Kim¹, Sam-Gyu Park¹, Young-Soo Park²,
Myeong-Jong Yi¹, Jeong-Sul Son¹ and Heong-Rae Rim²

¹Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Geology and Geoinformation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요 약: 국내 지반침하의 주요 원인 중의 하나인 석회암 공동에 대한 조사는 단순한 지반침하 원인의 규명 이외에 지반 침하 지역 또는 예상지역의 보강 설계 및 사후 관리에 이르기까지 폭넓은 지반 정보를 제공하는 역할을 수행한다는 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 지반침하지역 공동탐지에 유용하게 사용되는 물리탐사기법으로 한 종류의 지반 물성을 이용하는 단위 물리탐사기술보다는 여러 가지 물성의 지하를 조명하는 복합 물리탐사기술에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 지반침하조사 시 지하공동 탐지를 위한 복합 물리탐사 시스템 구축의 일환으로 전라남도 무안군 무안읍 용월리에 과거 석회암 공동에 의한 지반침하 경력이 있는 지역을 현장 실험장으로 이용하여 다양한 종류의 물리탐사를 실시하였다. 그 중 전기비저항탐사, 전자탐사 그리고 고정밀 중력탐사 결과로부터 지하 공동의 위치 및 분포를 추정·해석하고, 시추조사 결과와 비교함으로써 단위 물리탐사 기술의 공동탐지 적용성에 대하여 고찰하였다. 시추조사결과, 실험장 지역 기반암내 공동은 대부분 지하수 또는 물로 포화된 점토로 채워져 있어 주위 기반암에 비하여 매우 낮은 전기비저항 및 밀도를 가지며, 넓은 지역에 걸쳐 망구조로 분포하고 있는 것으로 해석된다. 실험장에 적용한 전기비저항, 전자 및 고정밀 중력 탐사 결과, 저비저항대와 음의 중력 이상대 분포 지역이 시추 조사에서 확인된 지하 공동의 분포 위치와 상당 부분 일치함을 보여 이들 각 탐사방법들이 지하 공동 분포 파악에 효과적임을 입증되었다. 또한 개별 탐사 기법 해석과 아울러 각종 탐사결과를 종합함으로써 보다 정확한 지하공동의 분포 해석이 가능하였으며, 특히 국내에서의 사용이 미비하였던 고정밀 중력탐사기법이 지하공동 탐지에 매우 유용함을 확인하였다.

주요어: 지반침하, 복합물리탐사, 지하공동, 고정밀 중력탐사

Abstract: Investigations of underground cavities are required to provide useful information for the reinforcement design and monitoring of the ground subsidence areas. It is, therefore, necessary to develop integrated geophysical techniques incorporating different geophysical methods in order to accurately image and to map underground cavities in the ground subsidence areas. In this study, we conducted geophysical investigations for development of integrated geophysical techniques to detect underground cavities at the field test site in the ground subsidence area, located at Yongweol-ri, Muan-eup, Muan-gun, Jeollanam-do. We examined the applicability of geophysical methods such as electrical resistivity, electromagnetic, and microgravity to cavity detection with the aid of borehole survey results. The underground cavities are widely present within the limestone bedrock overlain by the alluvial deposits in the test site where the ground subsidences have occurred in the past. The limestone cavities are mostly filled with groundwater or clays saturated with water in the site. The cavities, thus, have low electrical resistivity and density compared to the surrounding host bedrock. The results of the study have shown that the zones of low resistivity and density correspond to the zones of the cavities identified in the boreholes at the site, and that the geophysical methods used are very effective to detect the underground cavities. Furthermore, we could map the distribution of cavities more precisely with the study results incorporated from the various geophysical methods. It is also important to notice that the microgravity method, which has rarely used in

Korea, is a very promising tool to detect underground cavities.

Keywords: ground subsidence, integrated geophysical methods, underground cavity, microgravity

2006년 10월 17일 접수; 2006년 11월 20일 채택

*Corresponding author

E-mail: ryol1102@kigam.re.kr

Address: Engineering Geophysics Group,

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,

30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea

서 론

지반침하는 석회암 지역의 자연공동, 광산채굴에 의한 인위적인 공동 등 지하공동 부존지역 침하와 매립지 또는 간척지 등에서와 같이 연약지반에 의한 침하의 두 유형으로 분류할 수 있다. 지하공동에 의한 지반침하는 통상적으로 급속히 발생하는 경우가 많으므로 재산피해가 심각할 뿐만 아니라 인명피해 가능성 또한 높다. 간척지와 같은 연약지반에 의한 지반침하는 서서히 발생하는 경우가 많으며 간척지 공단과 같이 광역적으로 발생하는 경우는 경제적인 손실이 막대하다. 전 세계적으로도 이와 같은 지반침하 문제는 큰 이슈로 되어있으며, 지구물리학뿐만 아니라 지질학, 수리지질학, 암반공학 등의 다양한 분야에서 중요한 문제의 하나로서 인식되고 있는 상황이다. 특히 지구물리탐사 기술은 지반침하 원인 규명뿐만 아니라 지반침하 지역에 대한 지반보강 또는 지반개량 이후 시공 효과에 대한 평가를 위하여 응용됨으로써 지반침하의 사전 감시, 조사/평가, 보강이후 보강상태 검증 등의 사후 관리에 이르기까지 폭넓게 응용되고 있다.

국내외의 경우 물리탐사에 의한 지반침하지역 공동 탐지에는 다양한 종류의 탐사기술이 응용되고 있는 상황이며, 특히 전기비저항 탐사, GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사, 전자탐사, 고정밀 중력(Microgravity)탐사, 탄성과 탐사, 각종 토모그래피 탐사 등이 많이 이용되고 있다. 특히 중력탐사법에 있어서는 국외의 경우 최근 고정밀 중력탐사기술이 개발되면서 활발히 연구되고 있으나(Dourado *et al.*, 2001; Debeglia *et al.*, 2006; Yuhr *et al.*, 1993), 국내의 경우는 현재까지는 이론적인 연구에 주안점을 두고 실제 지반침하 문제나 지하공동탐지 등의 이용에는 거의 시도되지 못하고 있는 실정이다. 물리탐사기법 중 최고 분해능의 지하영상을 제공하는 GPR 탐사는 지표 극천부에 분포하는 공동 탐지 및 이와 수반되는 토양층 교란 조사 등에 응용되고 있다(김정호 등, 2004; Dourado *et al.*, 2001). 한편, 지표탐사의 경우보다는 응용빈도가 낮으나 비교적 심부에 위치하는 공동 탐지를 위하여 시추공 탄성과 토모그래피(Gritto and Majer, 2000), 전기비저항 토모그래피(Kim *et al.*, 2004b; Yi *et al.*, 2004) 및 레이더 토모그래피(Kim *et al.*, 2004a) 기술이 이용되고 있다. 이와 같은 다양한 물리탐사법 가운데 GPR 및 전기비저항 영상화 기술은 해석 기술 또한 최근에 급속히 발전하여 3차원 영상화로까지 기술개발이 이루어졌다. 한편, 전기비저항 탐사와 동일한 물성인 전기전도도를 대상으로 하는 전자탐사의 경우 다른 탐사법에 비하여 공동 탐지에 대한 응용 연구가 활발하지 못하며, 이는 지반침하지역 지하공동의 경우 비교적 다루기 힘든 3차원 이상대로서 정량적 해석이 용이하지 않는 점에 기인하고 있다.

현재까지 지반침하지역 공동탐지를 위한 물리탐사에는 주로 한 종류의 물리탐사기술을 이용한 단위 물리탐사법에 의한 접근이 주를 이루고 있으나, 단위탐사법의 반응은 지하물성과 구

조에 따라서 달라지므로 적용환경에 제약이 따른다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 다양한 탐사법을 이용하여 다각도로 여러 가지 물성의 지하를 조명하는 복합 물리탐사에 대한 연구가 필요하다(김정호 등, 2004). 지금까지 다수의 지반침하에 대한 연구, 그리고 사례연구가 수행되어 왔으나 지하공동 탐지에 있어 복합 물리탐사기법 사용에 대한 연구는 국내 외적으로도 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 지반침하조사 시 지하공동 탐지를 위한 복합 물리탐사 시스템 구축의 일환으로 과거 지하공동에 의한 지반침하가 발생한 전력이 있는 지역을 현장 실험장으로 사용하여 다양한 물리탐사를 실시, 지하 공동의 위치 및 분포를 추정·해석하여 단위 물리탐사 기술의 공동탐지 적용성에 대하여 고찰하였다.

현장 실험장

복합물리탐사 기술을 지반침하지역 공동탐지에 적용하기 위하여 전남 무안군 무안읍 용월리 덕보들 지역을 탐사 적용성 연구를 위한 실험 대상으로 선정하였다. 이 지역은 제4기 충적퇴적층으로 덮여 있으며, 그 하부에는 선캄브리아시대의 편암 및 화강편마암을 부정합으로 덮으면서 대상으로 분포하고 있는 시대미상의 변성퇴적암류 내에 협재하고 있는 석회암이 분포하고 있다. 이 시대미상의 변성퇴적암류는 북북동-남남서 방향으로 발달하고 있는 광주 단층대 서측 인근에 위치하고 있다(황재하 등, 2000). 따라서 용월리 현장 실험장 지역은 광주 단층과 이에 수반되는 파쇄대를 따라 유동하고 있는 지하수의 작용으로 석회암이 용식되어 넓은 지역에 걸쳐 지하 공동이 형성될 수 있는 지질 구조적 특징을 가지고 있으며, 시추조사결과 다수의 공동이 발달하고 있음이 확인되었다(김정호 등, 2004). 인근 무안읍 시가지에서 발생한 지반침하 사례(김정호 등, 2004)에서와 같이 용월리 덕보들 지역은 지하수의 과잉 양수로 인하여 석회암 공동 내의 지하수위가 하강함으로써 지표부인 농토양을 포함한 지반 함몰이 발생한 전력이 있으며, 또한 이 지역은 거의 농토양으로 덮여 있어 지형변화가 매우 완만하여 각종 물리탐사 수행이 용이하다는 장점이 있어 현장 실험장으로 선정되었다(Fig. 1).

기존 시추조사 및 지질조사에 의하면 무안군 용월리 현장 실험장은 최상부의 점토질 농토양을 포함하는 토사 및 풍화토가 약 3~6 m의 두께로 발달하고 있으며, 그 하부에 기반암인 석회암이 분포하고 있다. 기반암내에 분포하고 있는 석회암 공동은 비교적 소규모 또는 다양한 규모의 공동이 근집하고 있는 형태로 다양한 심도에서 발달하고 있으며, 이들 공동은 망구조로 넓은 지역에 걸쳐 분포하고 있을 것으로 예상된다(Fig. 2 및 Fig. 3에 현장 실험장에 설치된 시추공 위치 및 시추 주상도를 각각 도시하였다). 현재까지 지반침하가 발생된 영역은 농업용수를 위한 관정 주위에 국한되어 있지만, 실제의 석회암 공동은 보다 넓은 지역에 걸쳐 분포할 것으로 생각된다.

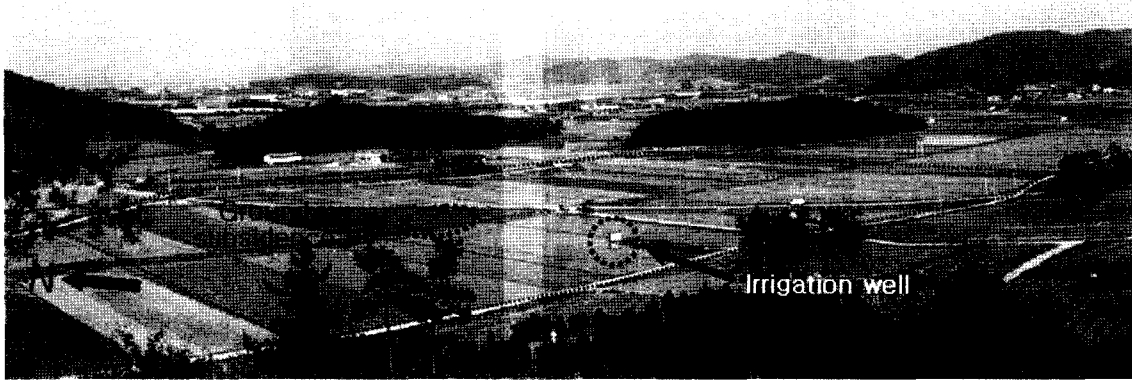


Fig. 1. Photographic view of the study site. Ground subsidence (left dotted circle) has occurred in the middle of the rice paddies in the past, and the pumping well for irrigation (right dotted circle) is situated approximately 50 m southwest of the ground subsidence location in the site.

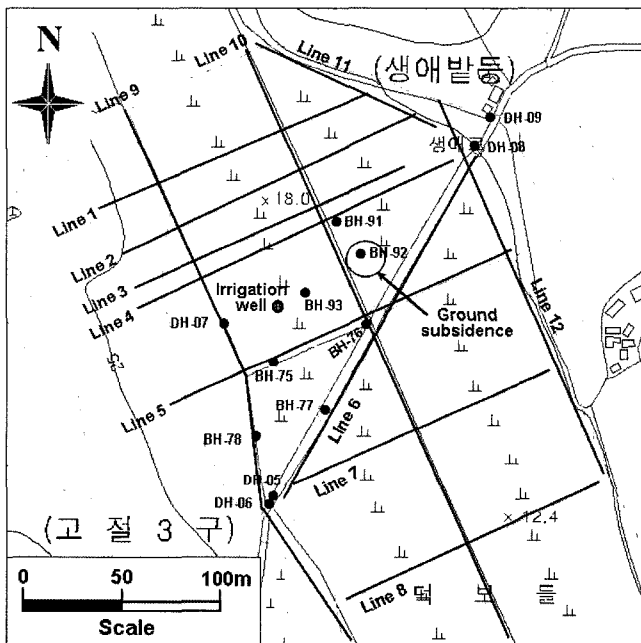


Fig. 2. Location map of the resistivity survey lines and boreholes in the study site.

용월리 덕보들 현장 실험장에서는 복합물리탐사 기술을 지하공동 탐지에 이용하기 위하여 다양한 종류의 물리탐사를 실시하였으며, 본 연구에서는 그 중 전기비저항탐사, 전자탐사 및 고정밀 중력탐사 결과로부터 지하 공동의 위치 및 분포범위를 해석하고 시추조사 결과와 비교함으로써 지반침하지역 공동조사에 있어서 단위 물리탐사 기술의 적용성에 대하여 검토하였다.

전기비저항탐사

현장 자료 획득 및 처리

현장 실험장에서 실시한 전기비저항탐사의 측선 위치를 Fig. 2에 도시하였다. 전기비저항탐사는 시추조사 결과(Fig. 3 참조)

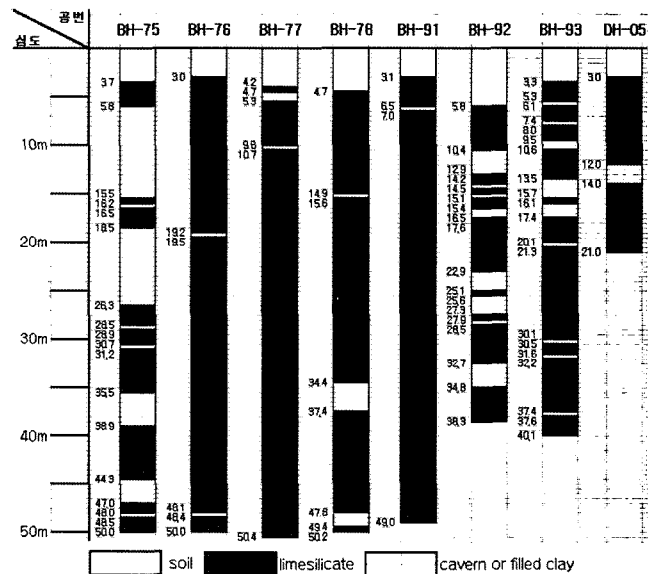


Fig. 3. Borehole logs showing the distribution of the underground cavities in the study site (from Kim *et al.*, 2004).

로부터 지하공동이 많이 발견된 시추공(BH-75, 92, 93)을 중심으로 넓은 영역에 걸쳐 수행하였다. 탐사장비는 미국 AGI사의 Super sting R8/IP를 사용하였으며, 탐사측선은 실험 대상지가 농경지인 연유로 측선 설치에 제약이 있어 주로 농로 및 논두렁을 이용하였다. 탐사 측선은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 총 12 개이며, 총 연장 3,200 m에 이른다. 자료취득 시 전극 배열은 동일 측선에서 쌍극자 배열(Dipole-dipole array)과 변형된 단극 배열(Modified pole-pole array)의 2가지 배열을 사용하였으며, 각 배열의 전극간격을 5 m로 하여 최대 심도 약 35 m까지의 전기비저항 자료를 취득하였다. 또한, 각 측선별로 두 종류의 전극 배열로부터 취득된 자료를 통합하여 자료의 정확도를 최대한 높이도록 하였다. 통합된 자료는 한국지질자원연구원에서 개발한 소프트웨어 DIPROfWin을 사용하여 역해석 과정을 거쳐 2차원 지하 전기비저항 영상을 도출, 지하공동 분포 해석에 사용하였다.

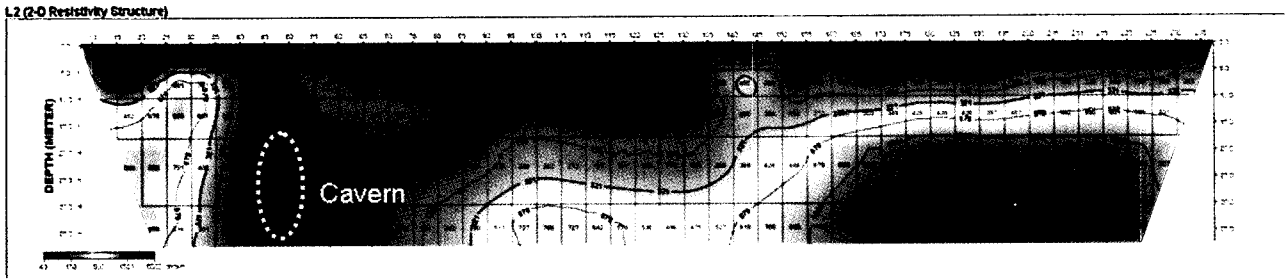


Fig. 4. 2-D resistivity image of the survey line 2.

탐사 결과 및 해석

Fig. 4는 탐사 축선 Line 2에서 취득한 자료를 2차원 전기비저항 영상 단면으로 표시한 것이다. 해석 결과, 지표부근의 토양 및 기반암의 풍화토는 저비저항(40 ~ 60 Ohm-m)를 나타내고 있으며, 탐사 지역 하부의 신선한 기반암에서는 영상 단면의 오른쪽 하부와 같이 상대적으로 고비저항(1,000 Ohm-m 이상)을 나타내고 있다. 축선 거리 45 m 부근의 하부에서 심부까지 저비저항대가 분포하고 있는 곳은 지하 공동(소규모 또는 다양한 규모의 공동이 균집을 이룬 형태)이 형성되어 있을 것으로 판단되는 부분이다. 조사지역에서의 시추 자료에 의하면, 대부분의 지하 공동은 지하수로 포화된 점토로 충전되어 있으며 지하수위가 지표 근처에 형성되어 있어 석회암 기반암 내에 지하 공동이 분포하고 있을 경우는 고립된 형태의 저비저항대가 지표 또는 기반암 상부에서부터 기반암 내의 어느 정도의 심도까지 분포할 것으로 해석된다.

현장 실험장 하부 지반의 전체적인 전기비저항 분포를 조사하기 위하여 탐사 축선 전체의 2차원 전기비저항 영상을 Fig. 5에 펜스 다이어그램으로 나타내었다. 실험장 북동쪽의 하부는 기반암의 영향으로 전기비저항이 상대적으로 높게 분포하고 있으며, 그 외의 지역은 상대적으로 낮은 전기비저항이 나타나고 있다. 특히, 상부 지표면 부근은 점토성분의 농도양 및 풍화토의 영향으로 저비저항을 나타내고 있으며, 기반암이 분포하는 심도에서는 부분적으로 고립된 형태의 저비저항대가 분포하고 있는 것이 관찰된다. 이 저비저항대는 Fig. 4에서와 같이 지하수로 포화된 점토로 충전되어 있는 공동에 의한 것으로 판단되며, 이러한 지하공동에 의한 저비저항대가 조사 지역 전역에 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 각 탐사 축선의 결과를 바탕으로 심도별 전기비저항 영상을 나타낸 것 중 심도 10 m에서의 전기비저항 분포와 석회암 공동이 많이 발견된 시추공의 위치를 도시한 것이다. 탐사 지역의 대부분은 농경지로 표토층은 낮은 전기비저항 값을 보일 것이나, 심도 10 m 부근의 기반암 분포 심도에서 전기비저항이 50 ohm-m 이하로 낮게 나타나는 것은 석회암 공동과 밀접한 관계가 있다. 조사 지역에 발달되어 있는 공동은 대부분 점토 및 지하수로 채워져 있기 때문에 석회암 공동이 분포하는 곳은 상대적으로 전기비저항이 낮을 것으로 판단되며, 이는 Fig. 3의 시추 주상

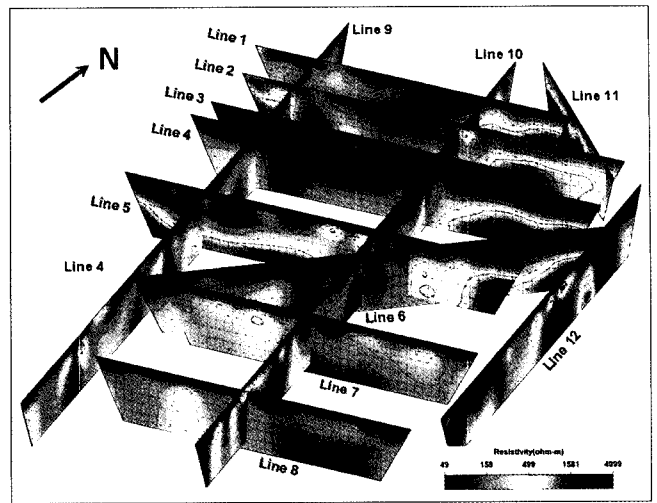


Fig. 5. Fence diagram of the 2-D resistivity data showing the resistivity distribution of the subsurface in the site (modified from Park et al., 2006).

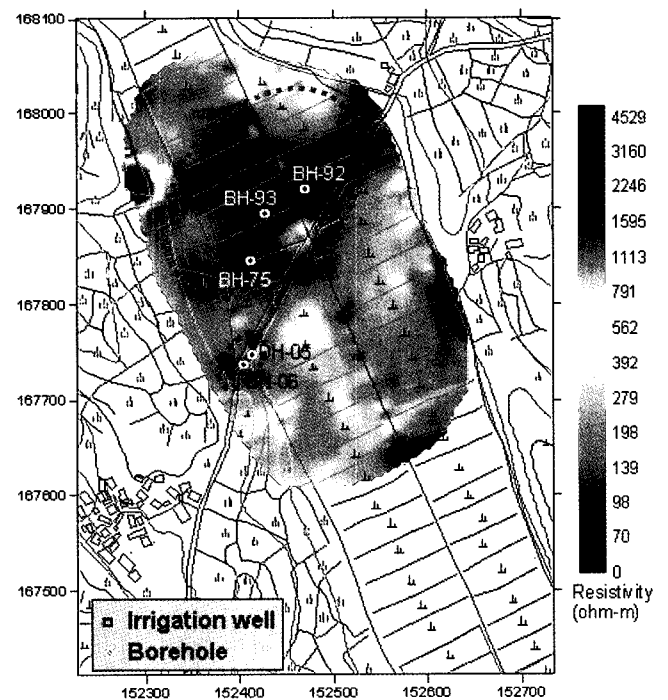


Fig. 6. Resistivity map at the depth of 10 m derived from the resistivity fence diagram in Fig. 5. Dotted circles depict the areas of underground cavities (modified from Park et al., 2006).

도와 비교하면 심도 약 10 m 부근에서 공동이 다수 분포하고 있는 것을 보아 확인할 수 있다. 저비저항대가 분포하고 있는 조사 지역 중앙부에는 석회암 공동이 많이 발견된 시추공 BH-75, BH-92 및 BH-93이 위치하고 있으며 이들 간의 상관성이 뚜렷하게 나타난다. 기존의 시추 조사는 대부분 지반침하가 발생한 장소 부근에서 수행되었기 때문에 주로 농업용수를 위한 관정 주위에 집중되어 있다. 이것은 이 지역에서의 지반침하는 지하수의 과잉양수로 인하여 지하수위의 하강으로 지표 부근의 지반을 지지하고 있던 부력의 손실로 인해 발생(Crawford *et al.*, 1999)했을 가능성이 높기 때문이다. 그러나 현재까지 지반침하가 발생되지 않았다 하더라도 Fig. 6에서 타원으로 표시한 저비저항대 영역은 석회암의 공동이 존재할 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다. 박삼규 등(2006)은 이 저비저항대를 포함하여 석회암 공동이 많이 발견된 조사 지역 중앙부에서 3차원 전기비저항 탐사를 수행, 지하공동의 분포 범위 및 형태를 공간적으로 파악한 탐사 결과를 보고하였다.

전자탐사

현장 자료 획득 및 처리

탐사자료는 미국 Geophex사의 고정 송수신 간격의 다중주파수 소형 루프 전자탐사 장비인 GEM-2H 센서(송수신기 간거리 2.05 m)를 사용하여 취득하였다. GEM-2H는 주어진 주파수 대역 내에서 다수의 송신주파수를 선택하여 지반의 수직적인 전기전도도의 변화양상을 탐지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 탐사자료 측정 위치의 측량을 위하여 미국 Trimble사의 PathFinder GPS를 이용하여 자료획득과 동시에 위치정보를 기록하였으며, 차후의 자료처리 과정에서 보간을 통하여 탐사자료의 위치를 계산하였다. 현장 탐사 수행 시 용윌리 실험장은 농번기인 관계로 자료획득은 탐사가 가능한 논두렁 부분과 인근 밭에서 수행하였으며, 총 측선 길이는 약 5,000 m에 이른다.

전자탐사 자료의 취득과 함께, 측정 위치 측정을 위해 GPS를 동시에 사용하는 방법은 탐사 효율을 향상시키는 효과는 있으나 GPS 장비 본체, 안테나 및 연결 케이블 등은 모두 전기전도도가 높은 금속성 물질을 포함하므로 원리적으로 전기전도도가 높은 물체에 강하게 반응하는 특징을 갖는 전자탐사의 자료를 왜곡시키게 된다. 따라서 탐사자료의 정확한 해석을 위해서는 GPS 장비에 의한 영향을 보정하는 것이 필요하다. 이를 위해 GPS를 이용하는 경우와 GPS를 이용하지 않는 경우의 자료를 획득하여 이의 차이를 탐사결과에서 보정하였다. 동상 성분의 경우에는 주파수가 증가함에 따라서 GPS에 의한 영향이 증가하는 양상이 나타나는 반면, 이상성분의 경우에는 그 영향이 주파수 변화와 무관하게 일정한 양상을 보인다. 실제 탐사결과에서도 동상성분의 경우에는 지층에서의 반응보다는 주변의 전도성 이상체에 의한 영향이 크게 나타나는 양상이 확인된다. 또한, 동상성분의 경우에는 이상 성분과 비교하

여 송신원에 의한 일차장 효과를 완전히 제거하기 힘들기 때문에 정확한 이차장의 값을 측정하기에 어려움이 있어, 이상성분의 자료만을 이용하여 자료해석을 수행하였다.

GPS 장비에 의한 영향을 보정한 탐사자료에 대하여 고주파수의 파형으로 보이는 전도성 고립 이상체의 반응과 전기적 잡음의 영향을 제거하기 위하여 FIR (Finite Impulse Response) 필터를 이용한 평활화 필터링을 수행하였으며, 필터링된 자료에 대하여 1차원 역산을 수행하였다. 측정별 1차원 역산을 통해 계산된 각각의 심도별 전기비저항 분포를 이용하여 자료해석을 수행하였다. 탐사자료의 1차원 역산 수행은 3930, 5910, 8910, 13590, 그리고 21150 Hz의 5개 주파수 자료를 사용하였다.

탐사 결과 및 해석

Fig. 7은 지표 하부의 심도 7.0 m와 10.5 m의 전기비저항 분포도에서 공동 부존 가능성이 높은 지역을 나타낸 것이다. 실선으로 표시된 A 지역의 경우에는 심도 약 15 m의 깊은 곳까지 주변 지역보다 상대적으로 낮은 전기비저항 값을 보이는 지역으로 전기비저항 탐사결과에서와 같이 그 주변과 뚜렷한 비저항의 차이를 나타내지는 않지만 기반암이 석회암이라는 점을 고려한다면, 공동의 분포 가능성이 높은 것으로 추정된다. 전자탐사 기법은 공간적인 분해능이 매우 낮으므로, 탐사자료의 직접적인 해석을 통한 소규모의 단일공동을 찾아내는 것은 매우 어려우나, 저비저항대의 분포를 통해 간접적으로나마 공동의 분포양상을 짐작할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 그림에서 A의 지역인 경우에는 석회암 공동의 함몰로 인한 지반침하의 이력이 있었던 지역이며, 시추조사 결과 다수의 공동이 확인되었던 지역으로 전자탐사 결과를 통해 유추한 공동발달의 가능성이 높은 지역이라는 해석과도 일치하고 있다. 이러한 A 지역의 해석결과를 바탕으로 저비저항대가 나타나는 지역 하부에 석회암 공동이 분포할 가능성이 높은 지역을 B와 C로 표시하였다. B와 C지역 역시 주변부보다 낮은 전기비저항 분포를 보이며, 그 심도가 비교적 깊은 심도까지 연속되어 나타나는 양상을 보이므로, 기반암의 심도가 비교적 일정하게 나타난다고 가정할 경우, 공동의 형성 및 내부의 전도성 충전물에 의한 저비저항 이상대로 생각된다(C지역은 전기비저항탐사가 수행되지 않은 지역임). A, B, 그리고 C 사이의 지역에서 비교적 얇은 심도에서부터 깊은 심도의 전기비저항 분포 영상에서 고비저항대의 이상대가 강하게 나타나는 양상이 특징적으로 나타나는 사실로 미루어 보아, 기반암의 심도가 비교적 얇으며 비교적 풍화의 영향을 덜 받았거나, 지하수에 의한 침식을 적게 받아 지하 공동이 매우 적게 분포하고 있는 지역일 것으로 추정된다. 전기비저항탐사 해석단면에서도 이 지역의 경우는 기반암의 심도가 비교적 얇게 해석되고 있는 점으로 보아, 비교적 신선한 석회암이 하부에 존재하는 것으로 추정된다.

용윌리 실험장에서의 전자탐사 해석결과, 기반암이 분포하

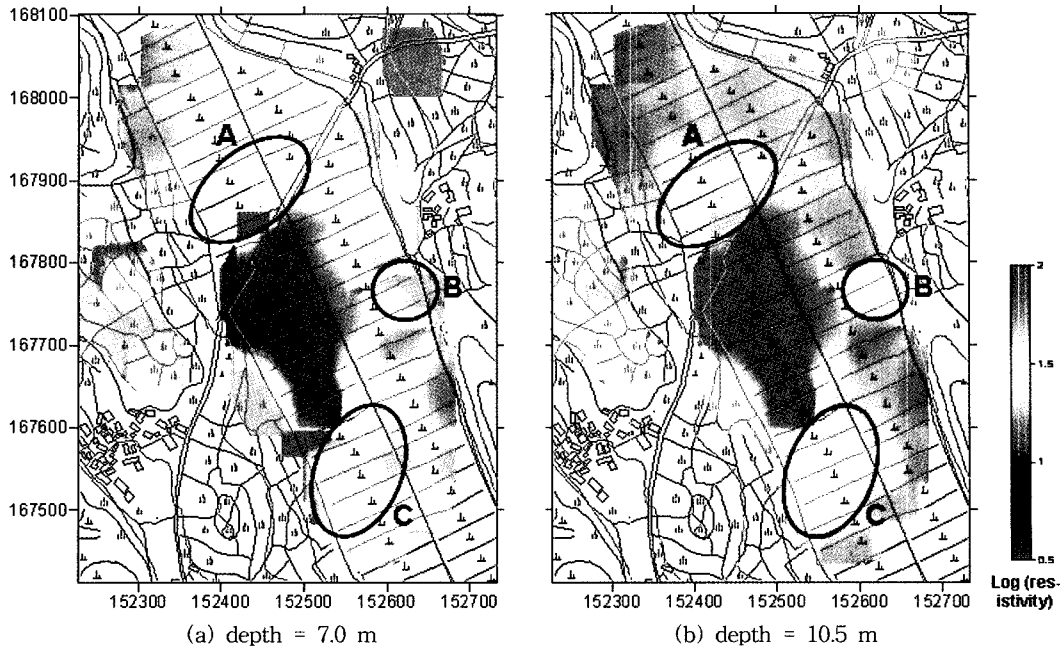


Fig. 7. Resistivity maps at the depth of (a) 7.0 m and (b) 10.5 m, respectively. Zones A, B, and C are the likely zones of cavities present at each depth.

는 심도에서 저비저항의 이상대로 나타나는 지역의 경우에는 하부에 공동이 발달해 있을 가능성이 높은 지역으로 추정되며, 일부 지역은 시추조사에서 다수의 공동이 확인된 지역과도 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 전자탐사 기법은 특성상 전자 탐사만으로 공동의 직접적인 해석에는 어려움이 있으나, 다른 물리탐사기법에 비해 장비가 간단하고 탐사 시간이 절약되어 실험장 지역에서와 같이 공동으로 인한 비저항 이상대가 탐사 결과에 영상화되는 경우에는 이상대의 분포를 통해 공동의 전반적인 분포양상을 추정하는 데 유용하게 이용될 수 있다.

고정밀 중력 탐사

현장 자료 획득 및 처리

탐사장비는 정밀도 10 μ Gal인 Scintrex AutoGrav CG-3를 사용하였으며, 중력 자료 측정의 위치 좌표는 Trimble GPS 5700과 Leica Total Station 1100 광과측량기를 사용하여 측량 오차를 3 mm 이내로 유지하여 측량에 의한 중력 값 오차를 1 μ Gal 이내가 되도록 하였다. 접근이 가능한 논두렁 등의 소로와 농로를 이용하여 측선 형태로 탐사를 수행하여 총 800여개의 측정점에서 자료를 취득하였다. 측정 간격은 5 m, 측선 간격은 약 30 m 정도로서 측선 간격이 측정 간격에 비하여 상대적으로 넓어 보다 정밀한 3차원 해석에는 약간의 어려움이 존재한다. 취득된 자료는 계기보정, 조석보정, 위도보정, 프리에어보정, 부계 보정 등 여러 단계의 중력보정을 위한 자료처리 과정을 거쳐 부계 중력 이상(Fig. 8(a))을 도출한 후, 심부 지각 특성에 의한 광역 중력은 2차 polynomial fitting을 이용하

여 광역이상을 분리, 잔여 부계 중력 이상(Fig. 8(b))을 구하여 지하공동의 분포 및 위치 해석에 사용하였다.

탐사 결과 및 해석

지하공동 분포 해석을 위한 잔여 부계 중력 이상도와 함께 시추 조사 결과 공동이 많이 발견된 시추공의 위치를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 현장실험장 중앙부의 측선 E6 ~ W6 주위의 붉은색 타원은 음의 중력이상대를 표시한 것으로 하나의 공동이라기보다는 소규모 또는 여러 규모의 공동들이 군집한 상태로 발달하거나 서로 연결되어 넓게 발달하고 있어 주위의 기반암보다 밀도가 현저히 작아 공동이 발달한 지역이 저중력의 이상대로 탐지된 것으로 판단된다. 시추조사에서도 다수의 공동이 발견된 시추공(BH-75, 92, 93)이 이 지역에 분포하고 있다. 또한, 현장실험장 북서부의 측선 E1 및 E4의 중심부, 그리고 현장실험장 중앙 음의 중력이상대 동쪽 인근의 측선 W8 중심부에도 음의 저중력 이상대가 분포하는 것으로 보아 이들 지역에도 석회암 공동이 발달하고 있는 것으로 생각된다. 현장실험장에서의 저중력 이상대는 공동이 분포하고 있는 지역으로 탐사자료는 지하 공동의 수평적 분포 추정에 유용한 정보를 제공하지만 지하 공동의 수직적인 위치의 추정에는 한계가 있다. 그러나 이러한 지하 공동의 수직적인 위치, 크기 및 분포는 중력 역산해석 프로그램을 이용하면 추정이 가능하다(임형래 등, 2003). 용월리 현장 실험장의 저중력 이상대 하부 기반암의 보다 정밀한 공동 발달 상태를 파악하기 위해서는 좀 더 좁은 측정 간격의 정밀 격자망 탐사가 필요할 것으로 판단된다.

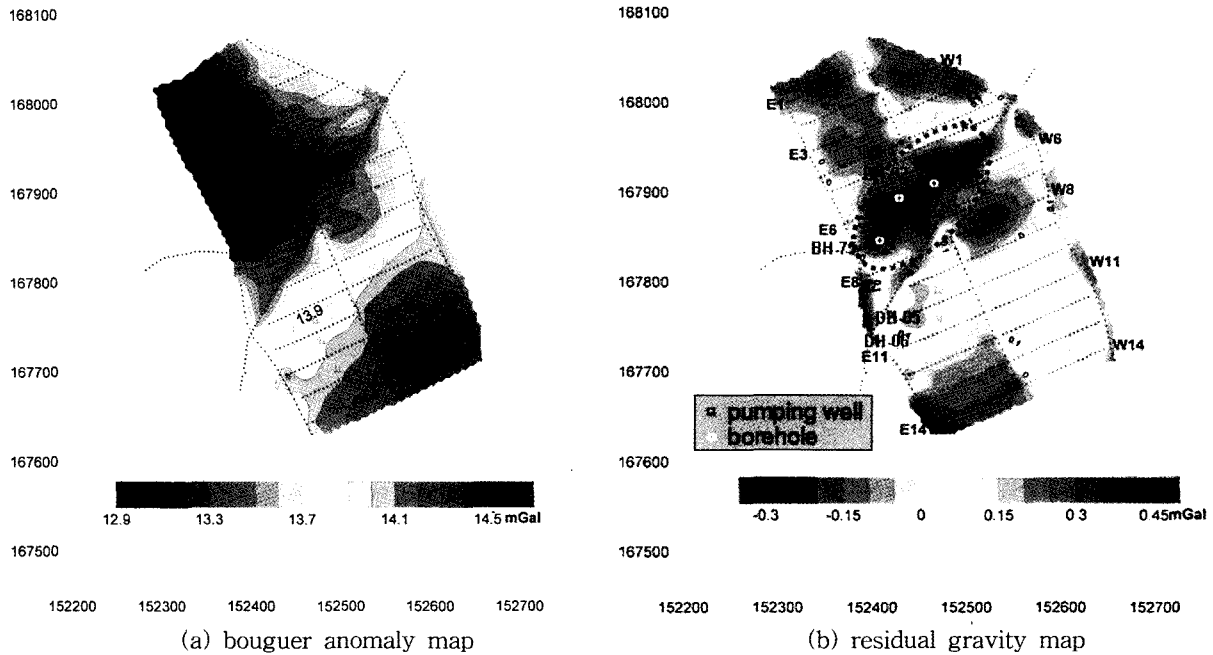


Fig. 8. (a) Bouguer anomaly map and (b) residual gravity map (dotted circle shows the likely area of limestone cavities underneath).

결론

전라남도 무안군 무안읍 용월리 덕보들 현장 실험장에서 물리탐사 기술을 지반침하지역 공동 탐지에 이용하기 위한 복합 물리탐사 시스템 구축의 일환으로 다양한 종류의 물리탐사를 실시하였다. 그 중 전기비저항탐사, 전자탐사 및 고정밀 중력탐사 결과로부터 지하 공동의 위치 및 분포범위를 해석하고 시추조사 결과와 비교함으로써 단위 물리탐사 기술의 적용성에 대하여 고찰하였다.

용월리 실험장에 적용한 전기비저항탐사 및 전자탐사 결과, 실험장의 중앙 지역은 전기비저항이 매우 낮은 이상대가 상당히 넓은 면적으로 분포하고 있으며, 또한 고정밀 중력탐사에서 음의 중력 이상대로 나타나고 있다. 실험장 중앙 지역의 눈토양에서 과거에 발생한 지반 침하 경력, 그 주변에 위치한 농업용수 관정에서 농번기 시 다량의 지하수 양수, 그리고 시추공 BH-75, 92, 93 등에서 확인된 지하공동 조사결과 등을 종합하여 볼 때 이 지역의 공동은 대부분 5 내지 6 m 심도 이하에 분포하고 있는 석회암 기반암 내 공동이 지하수 및 점토로 채워져 있어 주위 기반암에 비하여 낮은 전기비저항 및 밀도를 가지며, 넓은 지역에 걸쳐 망구조로 분포하고 있는 것으로 해석된다. 이 지역 이외에서도 북서쪽 및 남동쪽의 지역에서 각 탐사 별로 저비저항 또는 저중력대의 이상대가 비교적 소규모로 분포하고 있으나, 실험장 중앙에 위치한 지역에서 같이 모든 탐사에서 동일한 결과를 나타내지는 않고 있다. 이는 이들 지역이 주로 탐사 지역의 경계부에 위치하고 있어 탐사

자료가 풍부한 중앙 지역과 비교하여 상대적으로 탐사 자료의 밀도가 적어 보다 정확한 해석을 위한 물성 정보가 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이들 지역에서도 석회암 공동이 분포할 가능성은 다른 지역에 비하여 상당히 높을 것으로 판단되며, 향후 추가 탐사 및 시추조사를 통하여 공동 존재 여부 및 분포 상황을 확인할 수 있을 것이다. 전기비저항탐사, 전자탐사 및 고정밀 중력탐사 등의 단위물리탐사 결과에서 저비저항대와 음의 중력 이상대의 분포 지역이 시추 조사에서 확인된 지하 공동의 분포 위치와 상당 부분 일치함을 보임으로서 이들 각 탐사법들이 지하 공동 분포 파악에 효과적임이 입증되었다. 또한 각 탐사 기법별 해석과 아울러 각종 탐사결과를 종합함으로써 더욱 정확한 지하공동의 분포 해석이 가능하였으며, 특히 국내에서 거의 사용되지 않았던 고정밀 중력탐사법의 지하공동 탐지 적용이 매우 유용하게 사용될 수 있음을 확인한 것은 간과할 수 없는 성과이다.

지반침하 원인 중 가장 큰 비중을 차지하는 지하공동에 대한 정확한 조사는 단순히 지반침하의 원인과 현상 규명이라는 점 이외에 지반보강의 설계를 위한 기초적인 정보를 제공함과 동시에 지반보강 상태 평가 등 사후 감시에도 기여할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 통상적인 2차원적인 지반조사의 범주에서 벗어나 고밀도, 고정밀의 3차원적인 조사기술이 필요하며, 지하공동이 가지는 다양한 물성 변화를 이용하고 지표 및 시추공 등을 망라한 다양한 물리탐사에 대한 연구가 필요하다. 따라서 여러 단위 물리탐사법을 결합하여 보다 다양한 물성으로 지하를 조망하는 복합 물리탐사 시스템 기술의 개발이 필

요한 상황이며, 현재 한국지질자원연구원에서 이를 위한 기술 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 정밀 영상화 융합기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다. 논문 심사애 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김정호, 박삼규, 황세호, 이명종, 박권규, 박인화, 손정술, 신제현, 성낙훈, 정지민, Adepelumi, A. A., 한공창, 신중호, 박찬, 박의섭, 천대성, 전양수, 2004, 무안 성남 주거지 지반침하지역 3차 물리탐사 및 암반공학 조사, 한국지질자원연구원 연구보고서, 농업기반공사 전라남도 본부, 245p.
- 박삼규, 김창렬, 손정술, 김정호, 이명종, 조성준, 2006, 3차원 전기비저항탐사에 의한 석회규산염암의 공동탐지, 자원환경지질, **39**, 597-605.
- 임형래, 박영수, 임무택, 권병두, 2003, Euler Deconvolution에서 윈도우 크기 결정 문제, 제80회 한국지구시스템공학회 춘계학술발표논문집, 한국지구시스템공학회, 한국지질자원연구원, 2003년 4월 22-23일, 83-86.
- 황재하, 최범영, 김복철, 기원서, 송교영, 2000, 무안 지질도폭보고서(1:25,000), 한국지질자원연구원, p.58.
- Crawford, N. C., Lewis, M. A., and Webster, J. A., 1999, Microgravity techniques for subsurface of sinkhole collapses and for detection of groundwater flow paths through karst aquifers, in Beck, Pettit & Herring, Ed., *Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst*, Balkema, Rotterdam, 203-218.
- Debeglia, N., Bitri, A, and Thierry, P., 2006, Karst investigations using microgravity and MASW; Application to Orléans, France, *Near Surface Geophysics*, **4**, 215-225.
- 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*, **19**, 19-32.
- Gritto, R., and Majer, E. L., 2000, Seismic Mapping of Sub-surface Cavities, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, EEGS*, Wheat Ridge, Colorado, USA, 1215-1244.
- Kim, J.-H., Cho, S.-J., and Yi, M.-J., 2004a, Borehole radar survey to explore limestone cavities for the construction of a highway bridge, *Exploration Geophysics (Bulletin of the Australian Society of Exploration Geophysicists)*, **35**, 80-87.
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., Cho, S.-J., and Son, J.-S., 2004b, Application of Crosshole Resistivity Anisotropy Tomography to the Safety Analysis of a High Storied Building over Abandoned Old Mine: CD-ROM, *66th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts*, Houten, Netherlands.
- Yi, M.-J., Kim, J.-H., Son, J.-S., and Cho, S.-J., 2004, 3-D Anisotropic Inversion of Resistivity Tomography Data in the Abandoned Mine Area: CD-ROM, *66th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts*, Houten, Netherlands.
- Yuhr, L., and 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, EEGS*, Eaglewood, Colorado, USA, 209-228.