시추공 전기비저항 토모그래피를 이용한 비저항 영상화: 과잉취수에 의한 석회암 지반침하 지역 사례

송성호^{1,*} · 이규상¹ · 엄재연¹ · 서정진²

¹한국농어촌공사 농어촌연구원, 426-908, 경기도 안산시 상록구 해안로 870

²한국농어촌공사 환경지질처, 437-703, 경기도 의왕시 안양판교로 98

Resistivity Imaging Using Borehole Electrical Resistivity Tomography: A Case of Land Subsidence in Karst Area Due to the Excessive Groundwater Withdrawal

Sung-Ho Song^{1,*}, Gyu-Sang Lee¹, Jae-Youn Um¹, and Jung-Jin Suh²

¹Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Gyeonggi 426-908, Korea

²Office of Environmental Geology, Korea Rural Community Corporation, Gyeonggi 437-703, Korea

Abstract: Electrical resistivity tomography surveys using boreholes were applied to reveal the cause of a catastrophic land subsidence accompanied by the excessive groundwater withdrawal in urban karst area and to map the connectivity of disseminated cavities over the study area. In order to understand the hydrogeological characteristics, resistivity using ex-situ core samples, groundwater level for five boreholes, and hydraulic conductivity using slug test were measured. The hydraulic conductivity variation ranging from 0.8 to 9.3×10^{-4} cm/s for five boreholes and a gentle slope of groundwater level indicated that there is no significant characteristics of hydraulic heterogeneity. Core samples of the lime-silicated rock were classified as three groups including cracked, weathered, and fresh and measured the resistivity values ranged from 103 to 161, 218 to 277, and 597 to 662 ohm-m, respectively. Drilling results that showed the cavity filled with clay materials and tomogram for this region indicated resistivity value lower than 50 ohm-m. From the inverted resistivity results for each section with five boreholes, cavity and fractured layer were distributed along the depth between 10 and 20 m overall area and cavities ranging from 4 to 6 m filled with clay materials.

Keywords: cavity in karst area, land subsidence, electrical resistivity tomography, hydraulic conductivity

요 약: 석회암 공동이 발달한 도심지역에서 지하수위 하강에 수반되어 발생한 함몰형 지반침하의 원인 규명 및 공동의 분포 특성 파악을 위하여 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피탐사를 실시하였다. 이때 지하수 수리지질 특성을 파악하기 위하여 시추코어의 비저항 측정, 지하수위 측정 및 수리전도도 해석을 병행하였다. 연구 지역에서의 완전한 지하수위 분포 특성과 $0.8-9.3 \times 10^{-4}$ cm/s 범위의 수리전도도 분포로부터 연구지역의 수리지질 특성은 불균질성이 크지 않은 것으로 나타났다. 시추코어를 이용한 전기비저항 측정 결과 연구지역의 석회암은 파쇄가 많은 경우, 변질이 심한 경우 및 신선한 경우로 나뉘지며, 전기비저항은 각각 103-161, 218-277 및 597-662 ohm-m의 범위로 나타났다. 시추결과 점토로 충전된 석회암 공동 지점은 토모그래피 탐사자료의 역산 결과 50 ohm-m 이하의 낮은 비저항으로 나타났으며, 각 시추공 간 비저항 영상 단면으로부터 연구지역 전체적으로 지표 하부 심도 약 10-20 m 구간까지 파쇄대 또는 석회암 공동 구간이 분포하는 것으로 나타났다. 또한 석회암 공동의 직경은 약 4-6 m 규모로, 대부분 점토질로 충전된 것으로 판단된다.

주요어: 석회암 공동, 지반침하, 전기비저항 토모그래피탐사, 수리전도도

*Corresponding author: shsong84@hanmail.net

Tel: +82-31-400-1857

Fax: +82-31-400-1889

서 론

지반 내에 존재하는 지하수는 비압축적인 특성으로 인해 장기간에 걸쳐 지표면으로부터 발생하는 하중을 지지하지만, 급격한 지하수위의 저하로 인해 이러한 균형이 불안정한 상태로 변화하게 된다. 일반적으로 지하수위 변화는 자연적인 변화와 인위적인 변화로 구분되는데, 자연적인 변화는 장기간에 걸쳐 발생되기 때문에 지반의 침하 또는 함몰 위험이 상대적으로 낮다. 그러나 적정개발 가능량에 비해 과도한 취수에 의한 지하수위 저하로 인해 발생하는 인위적인 변화는 지반침하 및 함몰 등의 재해와 연결된다(Todd, 1976; Whittaker and Reddish, 1989). 석회암 공동이 발달한 지역에서 발생하는 침하 및 붕괴의 특징은 지반의 강도가 상재하중을 지탱하지 못하는 경우, 지하수위 하강에 따른 부력의 감소 및 상부의 사질토가 공동을 채우는 경우 등이 대표적이다. 특히 지하수 과잉 취수에 의한 지하수위 저하는 지반 내의 부력 감소로 이어지며, 이때 대수층 내의 공극 또는 균열대 내의 유효응력을 증가시켜 결과적으로 비가역적인 대수층의 변형 및 지반침하가 나타나게 된다(Poland, 1969). 석회암 공동이 발달한 지역에서의 지하수위 강하는 공동 상부의 미고결층에 직접적인 영향을 미치는데, 지하수에 의한 부력 감소, 지하수 유속 증가에 따른 동수구배의 증가, 수위 변동폭 증가 및 이에 따른 지하수 함양 조건 변화 등으로 급격한 지반침하 또는 함몰 현상이 발생된다(Lamoraux and Newton, 1986). 특히 석회암지역에서의 공동 붕괴는 지하수 함양 지역에서 주로 발생되는데, 이는 상부 표토에 발생하는 침투압(seepage pressure) 증가가 지하수위 하강에 따라 발생하는 하부의 빈 공동으로 빠져나감에 따라 발생된다(Salvati and Sasowsky, 2002). 이러한 문제는 지하수 이용량이 상대적으로 많은 도시지역의 경우에 큰 문제로 작용하는데, 이란 남동부 도시지역의 경우 연간 80 cm 지하수위 강하에 의해 약 6 cm의 지반침하가 발생한 사례가 보고된 바 있다(Atapour and Aftabi, 2002).

국내에서 지하수위 하강에 따른 지반침하의 대표적인 사례인 전라남도 무안지역은 과잉취수에 따른 인위적인 지하수위 변화에 의한 지반침하가 광범위하게 발생된 지역으로, 특히 석회암이 분포한 지역을 중심으로 차별풍화와 침식에 의해 발생된 공동 주변에서 직접적인 지반함몰 형태가 나타났다(한공창 외, 2007).

특히 소규모의 공동이 국지적으로 분포하는 지역에서 과거 대규모의 변성작용에 의해 발달된 연약층 및 파쇄대층 침하가 주요 원인인 것으로 나타났다. 그러나 지반침하와 밀접하게 연결되는 석회암 분포 지역에서 나타나는 공동은 소규모로 분포되어 있기 때문에, 지표에서 실시하는 물리탐사 방법으로 공동의 위치와 연결성 등을 확인하는 것이 매우 어려운 현실이다(김창렬 외, 2006). 또한 지반침하가 발생한 지역의 경우 도심지 인근으로 지표면의 대부분이 시멘트로 피복되어 있기 때문에, 지반에 접촉방식을 사용하는 물리탐사 방법의 적용이 제한적인 상황이다. 따라서 지금까지 4차례 전라남도 무안읍 내에서 발생한 국부적인 지반침하에 대한 원인 규명은 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사 위주로 수행되었다(한국농어촌공사와 무안군, 2006). 또한 연구지역은 광주단층에 의해 기반암인 석회암, 화강암 및 유문암 등이 대규모 구조작용으로 지질구조가 복잡하다. 따라서 국부적인 지질구조 파악을 위해서는 지표에서 수행하는 물리탐사로 한계가 있다. 그러나 연구지역 인근의 지반침하 원인 규명을 위하여, 지표 전기비저항탐사, CSMT 탐사, 자력탐사, 물리검층, GPR탐사 및 시추공 탄성파탐사 등을 이용한 바 있다(농업기반공사와 무안군, 2001).

본 연구에서는 도로 및 가옥에 의해 지반의 표면이 피복되어 있어 지표탐사 등의 방법을 이용하기 어려운 지역에 대한 공동 탐사의 목적으로, 지반특성 영상화(imaging) 방법을 이용하여 단층 파쇄대 또는 석회암 지하 공동의 규모를 효과적으로 파악할 수 있는 시추공 전기비저항 토모그래피 탐사를 이용하였다. 탐사 이전 단계로 지반 침하의 원인과 밀접한 관계가 있는 지하수 수리 특성 파악을 위한 시추코아 검층 및 비저항 측정, 지하수위 측정, 순간수위 변화 시험(slug test), GPS 측위 등을 병행하였다. 시추공 전기비저항 토모그래피탐사는 소규모 공동의 위치를 정확하게 탐지하기 위하여 시추공 간 전체 단면을 전극간격 2×2 m의 격자 형태로 구성하였으며, 파쇄대 및 공동의 연장성을 파악하기 위하여 전극 간격을 4×4 m의 격자 형태로 재 탐사하였다.

연구방법

수리지질현황

연구지역은 전라남도 무안군 성남리 일원에 위치하

연구대상 지역 내에서 지반침하 위치 및 규모, 기반암 분포상태 및 석회규산염암 내의 공동발달 여부 확인 등을 위하여, 5지점을 대상으로 시추공 심도 및 위치를 선정하였다. 이때 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사를 위하여 각 시추공의 심도는 50 m, 시추공 간 간격은 약 30-40 m로 설정하였다 (Fig. 1). 연구지역 지하수 대수층은 피압 대수층으로, 5공의 시추공에 대하여 해발고도 기준으로 지하수위 자료를 이용한 등수위선도를 작성하여 지하수의 흐름 방향을 분석하였다.

지표에서 시행하는 전기비저항 탐사는 송신원인 전류전극과 수신점인 전위전극이 지표에 위치하고 있어 지반 내에 분포하는 이상체에 대한 분해능의 제한이

전극배열법은 지표탐사와 마찬가지로 단극, 단극-쌍극자, 쌍극자 배열법 등이 가능하며, 분해능은 쌍극자 배열법이 가장 우수한 반면 탐사자료의 신호대 잡음비는 단극 배열이 가장 우수하다(Sasaki, 1992). 그러나 쌍극자 배열법을 이용하는 경우 측정이 불가능한 음영대(shadow zone)가 나타나며, 음의 겉보기비저항이 나타나는 경우가 많다(조인기 외, 1997). 또한 가장 높은 분해능을 보여주는 쌍극자 배열법은 전류 및 전위 측정을 위하여 모두 쌍극자를 사용하기 때문에, 측정값이 낮다는 문제점을 갖고 있다. 따라서 전류 쌍극자와 전위 쌍극자의 심도가 동일할 경우 큰 측정값을 보이며, 심도 차이가 커지면 점차 감소하여 특정점에서 일차전위가 0에 수렴하게 된다. 이 경우 이상체에 의하여 비정상적으로 매우 높거나 음의 겉보기 비저항이 나타날 수도 있다. 그러

나 전기비저항이 높은 지역의 경우에는 쌍극자 배열의 높은 분해능을 극대화 시킬 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 콘크리트에 피복된 현장여건상 지표전극 설치가 불가능하기 때문에, 신호대 잡음비가 가장 낮음에도 불구하고 분해능이 가장 뛰어난 쌍극자 배열법을 이용하였다. 현장 자료취득시에는 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사를 효과적으로 수행하기 위하여 일차적으로 각 전극에 대한 접지저항을 측정, 비교하였다. 사용된 탐사장비는 미국 AGI사의 SuperSting R8이며, 입력 전류는 200 mA를 유지하였다.

결과 및 토의

수리지질 특성

피압 대수층을 관통하는 5곳의 지하수위 자료를 이용하여 분석한 등수위선도에 의하면, 연구대상지역의 전체적인 지하수위 분포는 남쪽이 높고 북쪽이 낮은 것으로 나타났으며 수위차는 50 cm 이내로 완만한 특성을 보여준다. 지하수위 분포의 불균질성(heterogeneity)을 파악하기 위하여, 각 시추공을 대상으로 순간수위 변화시험법을 이용하여 수리전도도를 분석하였다. 순간수위 변화시험은 단일 관정에 순간적인 수위변화를 일으켜, 그 회복 양상을 관측함으로써 수리전도도 등 수리상수를 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 Bouwer and Rice(1976) 방법을 사용하여 해석하였으며, 해석 오차를 최소화하기 위하여 주입과 추출 시 각각을 해석한 후 평균값을 이용하였다(Table 1). 해석 결과 각 시추공별로 주입과 추출 시 해석된 수리전도도값의 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 분석된 수리전도도는 $0.8\text{--}9.3 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 범위로, 이 중 지하수위가 가장 높게 나타난 B-1 시추공의 경우 수리전도도는 $8.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$

로 가장 낮은 것으로 나타났다. B-1 시추공의 경우는 다른 시추공과 달리 화강암질 편마암이 존재하지 않은 상태에서 석회규산염암 내 파쇄대에 탄질 등 점토질이 상대적으로 많이 함유되어 발생된 것으로 판단된다. 따라서 이 부분을 제외하면 4곳의 수리지질 특성은 유사한 것으로 판단된다.

시추코아 검층 및 비저항 측정

Fig. 1에 제시한 5지점에 대한 시추 결과, 조사지역의 토사층 및 풍화토 구간은 상부에서부터 하부로 매립토 및 전담토, 풍화토 순서로 형성되어 있으며, 단층에 의한 전단응력 작용에 따른 파쇄에 따라 B-2 번을 제외하고는 모두 풍화대 층후가 11.5-17 m로 깊게 나타났다(Fig. 2). 그러나 대규모 단층 주변임에도 불구하고 단층점토는 발견되지 않았으며, 각 지층의 심도가 불규칙한 것으로 나타났다. 또한 시추코아를 대상으로 회수율(Total Core Recovery, TCR)과 RQD(Rock Quality Designation)를 측정하였는데(Deere, 1964), 각각 82-100%(평균 90.1%)와 49-69%(평균 60.8%)로 TCR이 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 연구지역에 분포하는 화강암질편마암이 다량 산출되었기 때문으로 판단된다. 그러나 석회규산염암이 산출되는 구간의 경우에는 TCR과 RQD가 국부적으로 낮게 나타나는 특성을 보이고 있다. 특히 B-1 시추공의 경우에는 RQD가 49%로 가장 낮아 다른 시추공과 달리 풍화토 수준의 탄질이 다량 함유된 석회규산염암이 산출되어 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한 B-5 시추공의 경우 공동의 규모는 크지 않지만, 연약대 사이에 위치하고 있기 때문에 지반침하가 우려된다. 현재 침하가 발생한 지점 인근의 B-4 시추공의 경우 공동은 존재하지 않는 것으로 나타났는데, 이는 약 30 m 깊이의 풍화토와 파쇄된 석회규산염암으로 구성된 지층에서 지하수 과잉 취수에 의한 부등침하에 의한 영향으로 판단된다.

전기비저항 토모그래피탐사 자료 해석의 기초자료 획득을 위하여 5공의 시추공에서 채취한 시추코아 시료에 대하여 현장에서 전기비저항을 실측하였다. 시추코아는 직경 54 mm의 원통형 시료로, 탐사 결과로부터 정확한 지반정보를 알아내기 위하여 일본 OYO사에서 제작된 Handy-ARM을 이용하여 구간별 전기비저항을 측정하였다. Table 2는 전기비저항 측정 자료를 종합한 결과로, 측정은 각 시료별로 2-5회 실시한 후 평균값을 이용하였다. B-2와 B-4 두 공의

Table 1. Borehole information Results of slug test

Borehole	Depth (m)	TCR (%)	RQD (%)	Hydraulic conductivity (cm/s)
B-1	50	82	49	8.0×10^{-5}
B-2	50	86	61	4.6×10^{-4}
B-3	50	100	62	9.3×10^{-4}
B-4	50	87	69	3.0×10^{-4}
B-5	50	95	64	2.8×10^{-4}
Average	50	90.1	60.8	4.1×10^{-4}

Fig. 2. Simplified geologic sections at five boreholes.

Table 2. Average resistivity using core specimens for each rock type on two boreholes

BH ¹⁾	Rock	Resistivity ²⁾ (ohm-m)	BH	Rock	Resistivity (ohm-m)
B-2	LS ³⁾ (cracked)	103	B-4	LS (cracked)	161
	LS (weathered)	218		LS (weathered)	277
	LS (fresh)	597		LS (fresh)	662
	Granitic gneiss	2,175		Granitic gneiss	1,938

¹⁾Borehole

²⁾Average resistivity

³⁾Lime-silicate rock

측정 결과, 석회암은 코아에 파쇄대가 많은 경우, 변질이 심한 경우 및 신선한 경우로 나뉘지며, 두 공의 측정 결과를 종합하면 각각 103-161, 218-277 및 597-662 ohm-m의 범위로 나타났다. 이 결과 연구지역의 석회암은 변질이 심할수록 전기비저항이 낮아지는 것으로 나타나는데, 이는 전기비저항이 주로 파쇄대 내에 포함된 세립분 또는 점토질에 의해 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사

전기비저항 토모그래피탐사는 5공을 이용하여 각 공간 총 7단면에 대해 수행하였다. 탐사 자료처리에는 각 시추공 간 탐사자료를 이용하여 쌍극자 배열의 시추공 대 시추공, 역방향의 시추공 대 시추공, 각 시추공 자체의 배열에 대하여 각 각 측정된 전위값을 이용한 동일 송신점 취합 비저항 곡선(Tx. gather curve)을 도시한 후, 동일 송신점 자료에 대한 측정값의 변화 양상에서 크게 벗어난 자료는 처리과정에서 제외하였다. Fig. 3은 B-1과 B-4 두 시추공 간의 2×2m의 격자와 4×4m의 격자의 시추공 간 전기비저항 토모그래피 탐사의 파선도이다. 이러한 파선 이

외에 동일 시추공간 탐사 자료가 포함된다. 또한 4×4m의 격자에 대한 탐사 결과의 해석은 2×2m의 격자 결과와 마찬가지로 해석하여, 탐사자료 해석의 일관성을 유지하였다.

B-1과 B-4 시추공 단면

B-1 시추공은 B-4를 기준으로 동남쪽으로 29.8m 거리에 위치하며, 지하수위를 기준으로 가장 높은 위치에 해당한다. 수리전도도는 5공의 시추공 중 가장 낮은 값이 나타나는데, 이는 지하수의 유동이 상대적으로 낮은 세립질의 점토 성분이 많은 영향으로 판단된다. Fig. 2에서 제시한 바와 같이 B-1은 지표 하부 약 11m까지 풍화토가, 이 후 약 27m까지 탄질이 함유된 석회암이 나타나며, 이하 구간은 석회암이 분포한다. B-4는 지표로부터 15m 깊이까지 풍화토로 구성되어 있으며, 이 후 20m 구간까지 파쇄대가 발달한 풍화암으로 구성되어 있다. 이하 심도에서는 석회암과 화강편마암이 나타나는데, 구간별로 파쇄대의 발달이 현저하게 나타나고 있다. 전극간격 2m로 수행한 탐사 결과 B-4 시추공 주변의 경우 약 15m 깊이까지 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항 값이 나타

Fig. 3. Ray paths by borehole electrical resistivity tomography between B-1 and B-4 with spacing 2 m (a) and 4 m (b)

나는데, 이는 시추코아에 대한 비저항 측정 결과와 비교할 때 파쇄가 발달한 석회암의 최저값인 103 ohm-m 보다 낮은 범위로 분석되었다(Fig. 4a). 이러한 결과는 B-1 방향으로 확장되는데, 이는 B-1 시추공의 풍화도 심도인 약 11 m 깊이에 거의 일치하게 나타났다. 따라서 지반의 상태가 취약한 것으로 판단된다. 특히 약 60 ohm-m 이하의 구간이 나타나는 지표 하부 10 m 이하 심도의 경우는 단층 파쇄대 또는 석회암 지하공동을 점토 성분이 충전하여 나타날 수 있는 비저항 범위이므로, 지반 상태가 취약함을 알 수 있다. 특히 점토성분의 발달은 앞서 제시한 순간수위 변화시험 결과로 해석된 가장 낮은 수리전도도값과 일치되는 결과로, 공동을 충전한 점토질의 영향으로 예측이 가능하다. 이러한 경향은 전극간격 4 m의 탐사 결과와도 일치됨에 따라, 지반상태가 취약한 부분의 규모가 비교적 큰 것으로 판단된다(Fig. 4b).

B-2와 B-4 시추공 단면

B-2 시추공은 B-4를 중심으로 남쪽방향으로 34.4 m 떨어진 곳에 위치하며, 지하수위 분포는 상류부에

해당한다. B-2는 지표 하부 약 5 m까지 풍화도가 나타나며, 약 12 m 깊이까지 절리면이 발달한 석회규산질암이 발달한다. 이하 심도에서는 석회규산질암, 유문암 및 화강편마암이 연속적으로 발달하고 있다. 전극 간격 2 m로 수행한 탐사결과 B-4 시추공 주변에서 약 15 m 깊이까지 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항 값이 나타나지만, B-2 시추공과의 사이에는 200-670 ohm-m 범위로 나타남에 따라 낮은 비저항대의 연장성은 없는 것으로 나타났다(Fig. 5a). 그러나 B-2 시추공 주변의 경우 지하 약 12 m 구간까지 약 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항이 나타나는데, 앞서 언급한 바와 같이 파쇄대가 발달한 석회암의 최저값보다 낮은 범위로 분석되었다. 이러한 결과는 전극 간격 4 m 토모그래피 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 5b). 따라서 B-2 주변의 낮은 비저항의 경우도 B-4와 B-1 시추공 사이의 결과와 유사하게 파쇄대 또는 지하 공동을 충전한 점토질의 영향을 반영한 것으로 판단된다.

B-3과 B-4 시추공 단면

B-3 시추공은 B-4를 중심으로 북쪽 방향으로 29.8

Fig. 4. Tomograms between B-1 and B-4 with spacing 2 m (a) and 4 m (b)

Fig. 5. Tomograms between B-2 and B-4 with spacing 2 m (a) and 4 m (b) including inferred cavity region filled with clay material at (a)

m 지점에 위치하며, 지하수위 분포는 하류부에 해당한다. B-3는 지하 약 14.5 m 깊이까지 퇴적층 및 풍화토가 발달하며, 약 27 m 깊이 까지는 풍화암과 이하 부분은 화강편마암이 발달된 것으로 나타났다. 풍화암은 전체적으로 연갈색으로 나타남에 따라 풍화의 정도가 매우 큰 것으로 판단된다. 전극간격 2 m로 수행한 탐사결과 B-4 시추공 주변의 경우 약 15 m 깊

이까지 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항 값이 나타나며, B-3과의 사이에는 150 ohm-m 내외의 약간 높은 비저항대가 나타나지만 전체적으로 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항이 나타났다(Fig. 6a). 전극간격 4 m 토모그래피 결과와 거의 일치됨에 따라, 전체적으로 파쇄대를 충전한 점토질의 영향으로 판단된다(Fig. 6b). 이러한 결과는 앞서 분석된 Fig. 3과 Fig. 4에서

Fig. 6. Tomograms between B-3 and B-4 with spacing 2 m (a) and 4 m (b)

Fig. 7. Tomograms between B-4 and B-5 with spacing 2 m (a) and 4 m (b) including cavity filled with clay material at (a)

의 B-4 시추공 주변의 결과와 일치된다.

B-4와 B-5 시추공 단면

B-5 시추공은 B-4를 중심으로 북동쪽 방향으로 34.6 m 지점에 위치하며, 지표 하 약 17 m까지 풍화대가 발달하는 것으로 나타났다. 그러나 약 12-15 m 구간에서 공동구간이 나타나며, 하부는 전체적으로 화강편마암이 우세하지만, 파쇄구간이 국부적으로 나타난다. 전극간격 2 m로 수행한 탐사결과 B-4 시추공 주변의 경우는 앞서의 B-4 시추공을 포함한 토모그래프의 결과와 유사한 100 ohm-m 이하의 낮은 비저

항 값이 나타났다. 또한 B-5 시추공과의 사이에는 150-200 ohm-m 내외의 약간 높은 비저항대가 나타나지만 전체적으로 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항이 나타났다(Fig. 7). 특히 B-5의 경우에는 주상도에서 나타난 공동의 심도 주변에 50 ohm-m 이하의 매우 낮은 비저항 구간이 나타나는데, 이러한 결과는 앞서 파쇄대 또는 석회암 공동을 충전한 점토의 영향을 직접적으로 지시하는 결과로 판단된다. 공동구간을 포함한 전체적인 비저항 분포는 전극간격 4 m 토모그래피 결과에서도 동일하게 나타남에 따라, 석회암 공동의 규모는 직경이 최소한 약 4 m 이상으로

Fig. 8. Tomograms between B-1 and B-2 with spacing 2 m (a) and 4 m (b)

Fig. 9. Tomograms between B-1 and B-5 with spacing 2 m (a) and 4 m (b)

판단되며 점토질 성분으로 충전된 것으로 판단된다.

B-1과 B-2 시추공 단면

B-1 시추공과 B-2 사이의 거리는 39.1 m로 지하수 위 분포에서 높은 지역에 북동-남서 방향으로 위치하고 있다. 전극간격 2 m인 경우 지표 하부 약 14 m 이하 부분에서는 200 ohm-m 이상의 상대적으로 높은 비저항 분포가 나타났다. 그러나 앞서 B-4 시추공과의 토모그램에서의 마찬가지로 지표 하부 약 10 m 이내의 경우에는 전체적으로 100 ohm-m 이하의 낮

은 비저항 구간이 발달함에 따라 파쇄대 또는 석회암 공동을 충전한 점토의 영향으로 판단된다(Fig. 8).

B-1과 B-5 시추공 단면

B-1 시추공과 B-5 사이의 거리는 36 m로, 남북 방향으로 위치하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 B-5 시추공의 경우에는 지표 하부 약 12-15 m 구간에서 공동이 나타난다. 전극간격 2 m인 경우 B-5 시추공의 지표 하부 약 12 m 내외에서 공동으로 판단되는 약 30 ohm-m 이하의 매우 낮은 비저항 구간이 나타

Fig. 10. Tomograms between B-3 and B-5 with spacing 2 m (a) and 4 m (b)

났다(Fig. 9a). 또한 B-1 시추공 방향의 규모는 4 m 간격의 탐사결과 직경 약 6 m 이상으로 나타남에 따라, 앞서 B-4 시추공 방향의 공동이 B-1 방향으로 확장되는 것으로 판단된다(Fig. 9b). 또한 두 시추공 사이의 지표 하부 약 20 m 깊이까지 전체적으로 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항 구간이 발달함에 따라 비교적 규모가 큰 석회암 공동을 충전한 점토의 영향으로 판단된다.

B-3과 B-5 시추공 단면

B-3 시추공과 B-5 사이의 거리는 33.4 m로, 지하수 위 분포로 하류부의 북서-남동 방향으로 위치하고 있다. 전극간격 2 m로 수행한 탐사 결과 B-3 시추공 주변의 경우는 앞서의 B-3을 포함한 토모그램의 결과와 유사한 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항 값이 나타났다(Fig. 10a). 또한 B-5 시추공과의 사이에는 일부 심도에서 150-200 ohm-m 내외의 약간 높은 비저항대가 나타나지만 전체적으로 100 ohm-m 이하의 낮은 비저항이 나타났다. 특히 B-5의 경우에는 주상도에서 나타난 공동의 심도 주변에 50 ohm-m 이하의 매우 낮은 비저항 구간이 나타나는데, 이러한 결과는 앞서 파쇄대 또는 석회암 공동을 충전한 점토의 영향을 직접적으로 지시하는 결과로 판단된다. 공동구간을 포함한 전체적인 비저항 분포는 전극간격 4 m 토모그래피 결과에서도 동일하게 나타남에 따라,

석회암 공동의 규모는 직경이 최소한 약 4 m 이상이며 점토질 성분으로 충전된 것으로 판단된다(Fig. 10b).

결론

본 연구는 무안군 무안읍 성남리 일대에서 국부적으로 나타나는 지반침하에 대한 원인 규명을 위하여, 단층 파쇄대 또는 석회암의 지하 공동 분포 파악에 효과적인 것으로 알려진 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피탐사를 중심으로 수행하였다. 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피탐사 이전 단계로 지반침하의 원인 파악과 밀접한 관계가 있는 지하수 수리특성을 파악하기 위하여, 시추코아 검증, 전기비저항 토모그래피 자료 해석에 필요한 시추코아의 비저항 측정, 지하수위 측정, 순간수위변화시험 및 GPS 측위 등의 기초 작업을 병행하였다. 이상의 과정을 종합적으로 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 시추코아를 이용한 전기비저항 측정 결과 석회암은 파쇄가 많은 경우, 변질이 심한 경우 및 신선한 경우로 나뉘지며, 각각의 전기비저항은 103-161, 218-277 및 597-662 ohm-m의 범위로 나타났다. 따라서 석회암은 변질이 심할수록 전기비저항이 낮아지는 것으로 나타나는데, 전기비저항이 주로 파쇄대 또는 석회암 공동 내에 포함된 세립분 또는 점토질에

의해 영향을 받은 것으로 판단된다.

2) 연구대상 지역의 수리전도도는 전체적으로 $0.8-9.3 \times 10^{-4}$ cm/s 범위로 나타나며, 석회규산염암 내 파쇄대에 탄질 등 점토질이 상대적으로 많이 함유된 B-1 시추공에서 가장 낮게 분석되었다. 이를 제외하면 4곳의 수리지질 특성은 유사한 것으로 판단된다.

3) 지하수위 분포와 수리전도도 해석 자료를 분석한 결과 석회암 공동은 세립의 점토질 성분의 입자로 충전되어 있는 것으로 판단되며, 본 연구지역 전체적으로 지표 하부 심도 약 10-20 m 구간까지 파쇄대 또는 석회암 공동 구간이 분포하는 것으로 나타났다.

4) 특히 B-5 시추공의 심도 약 12 m 지점에서 나타난 공동 주변에 대한 토모그램 결과 비저항이 50 ohm-m 이하로 매우 낮게 나타나는데, 이는 석회암 공동을 충전한 점토의 영향을 직접적으로 지시하고 있다. 또한 공동구간을 포함한 전체적인 비저항 분포를 기초로 해석하면 B-5를 중심으로 B-4와 B-1 방향으로 석회암공동이 확장되며, 규모는 직경이 최소한 약 4-6 m 이상 규모이며 점토질 성분으로 충전된 것으로 판단된다.

참고문헌

김정환, 홍승호, 황상구, 1982, 1:50,000 지질도폭 설명서: 신흥. 한국동력자원연구소, 대전, 13 p.
 김창렬, 김정호, 박삼규, 박영수, 이명중, 손정술, 임형래, 2006, 물리탐사 기술의 석회암 지반침하 지역 공동탐지 적용성 연구. 지구물리와 물리탐사, 9, 271-278.
 농업기반공사, 무안군, 2001, 성남주거지 지반침하지구 정밀안전진단조사 보고서. 농업기반공사, 695 p.
 송성호, 2007, 해수침투지역에서 단일 시추공을 이용한 전기비저항 토모그래피 탐사의 적용성. 지구물리와 물리탐사, 10, 369-376.

조인기, 정승환, 김정호, 송윤호, 1997, 전기비저항 토모그래피의 전극배열 비교. 한국자원공학회지, 34, 18-26.
 한공창, 천대성, 류동우, 박삼규, 2007, 무안 교촌리 주거지역 지반침하 안정성 분석. 터널과 지하공간, 17, 66-74.
 한국농어촌공사, 무안군, 2006, 교촌주거지 지반침하지역 정밀안전진단(4차)조사 보고서. 한국농어촌공사, 546 p.
 Atapour, H. and Aftabi, A., 2002, Geomorphological, geochemical and geo-environmental aspects of karstification in the urban areas of Kerman city, southeastern, Iran. Environmental Geology, 42, 783-792.
 Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research, 12, 423-428.
 Deere, D.U., 1964, Technical description of rock cores. Rock Mechanics Engineering Geology, 1, 16-22.
 Lamoreaux, P.E. and Newton, J.G., 1986, Catastrophic subsidence: An environmental hazard, Shelby County, Alabama. Environmental Geology, 8, 25-40.
 Poland, J.F., 1969, Land subsidence and aquifer-system compaction, Santa Clara Valley, California, USA. In Tison, L.J. (ed.), Land Subsidence. Vol. 2, International Associations of Science Hydrology, 88, 285-292.
 Salvati, R. and Sasowsky, I.D., 2002, Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. Journal of Hydrology, 264, 1-11.
 Sasaki, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-463.
 Todd, D.K., 1976, Groundwater hydrology. John Wiley and Sons, NY, USA, 535 p.
 Whittaker, B.N. and Reddish, D.J., 1989, Subsidence: Occurrence, prediction, and control. Elsevier, NY, USA, 528 p.
 Yi, M.J., Kim, J.H., and Son, J.S., 2011, Three-dimensional anisotropic inversion of resistivity tomography data in an abandoned mine area. Exploration Geophysics, 42, 7-17.

2011년 7월 11일 접수
 2011년 7월 29일 수정원고 접수
 2011년 8월 1일 채택