

## 지하수 과잉채수에 따른 미세 지반변형 지역에서의 전기·전자탐사

송성호\*, 용환호\*, 이규상\*, 김진호\*, 우명하\*

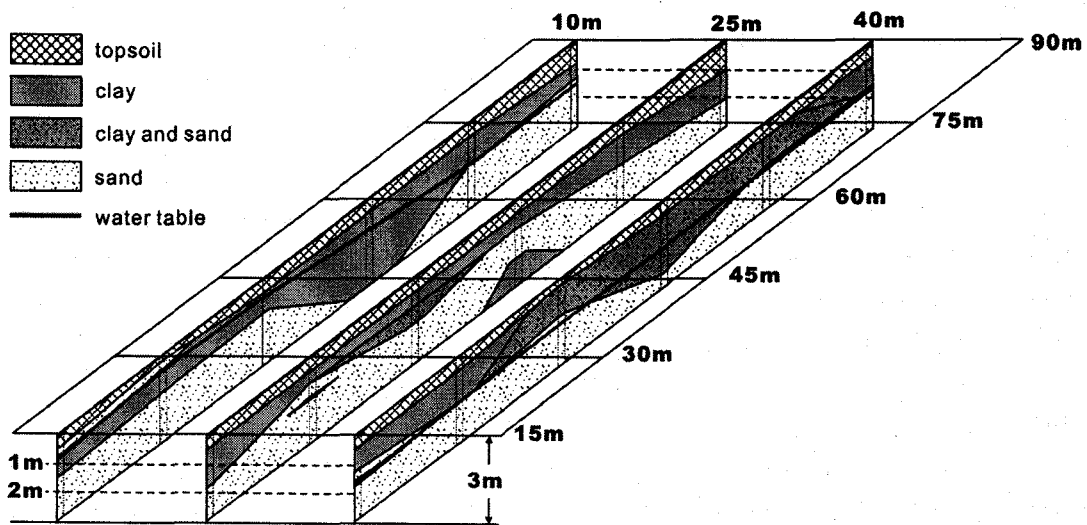
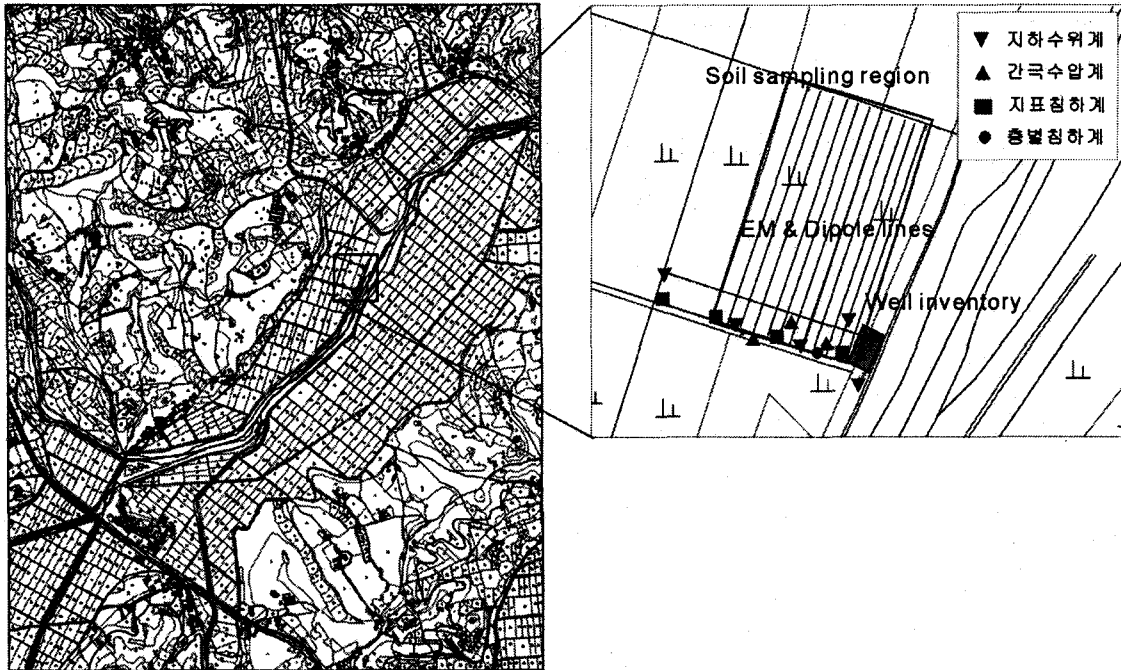
\* : 농업기반공사 농어촌연구원, [shsong@karico.co.kr](mailto:shsong@karico.co.kr)

### 1. 서론

최근 무분별한 지하수 개발 및 시추공에서의 과잉양수에 의해 지반침하 문제가 사회적인 문제로 제기되는 현실에서, 과잉채수에 의한 지반침하의 예측 및 제어 기술의 필요성이 커지고 있다. 국외의 경우는 지하수 과잉채수에 의한 지반침하 사례가 상대적으로 많이 보고되고 있으며 이를 제어하기 위한 다양한 접근법들이 개발되고 있지만, 국내의 경우는 연약지반의 침하에 대한 접근은 활발하게 이루어지는 반면 지하수의 과잉채수와 연관된 접근은 최근 전라남도 무안지역에 대한 종합적인 접근을 제외하고는 지극히 제한적인 실정이다. 일반적으로 지반침하 현상은 매년 수 mm 정도의 미세한 변위를 나타내는 경우와 지진 등에 의한 지각의 균열, 지표면의 급격한 침강 현상 등으로 나눌 수 있는데, 이 중 지하수의 과잉양수와 관련되어 지반의 미세한 변위가 나타나는 경우는 대상지역에 대한 물수지 측정과 연계된 침하계를 설치하여 장기 모니터링하는 방법이 효율적이다. 따라서 이러한 지하수 과잉채수와 같이 수리지질학적 원인에 의한 미세 지반변형의 경우는 유역단위의 전체적인 물수지의 불균형으로부터 발생되어 나타남에 따라, 본 연구에서는 지하수 과잉채수에 의한 미세 지반침하와 국부적인 함몰 현상이 나타난 경기 장호원의 충적 대수층을 구성하고 있는 지반에 대하여 hand auger를 이용한 토양단면도 작성과 전기비저항 탐사와 소형루프 전자탐사로부터 얻어진 수리지질구조를 기초로 지반침하 모델링을 위한 개념모델을 구성하는데 적용하였다. 또한 이러한 탐사결과 얻어진 개념모델을 기초로 각종 침하 시스템을 설치하는데 이용하였다.

### 2. 본론

지하수 과잉채수에 의한 지반침하를 관측하기 위한 연구대상 지역은 지하수를 대량으로 채수하는 지역을 중심으로 다량의 지하수 사용량을 정량적으로 측정할 수 있는 방사상 집수정 유역으로, 최근 집중적인 취수로 땅꺼짐 현상이 발생한 지역이다. 이 지역의 땅꺼짐 현



<그림 1> 연구지역 토양시료 채취에 의한 3차원 토양단면도(상단) 연구지역 위치도, (하단) 토양단면도

상은 방사상 집수정이 위치한 곳에서 불과 5~10 m 거리의 지점으로 단기간내에 지하수를 과잉으로 채수한 결과로 판단되며, 대수층을 구성하고 있는 중립질~세립질 모래와 롬(loam)의 지반변형이 예상되는 지역이다.

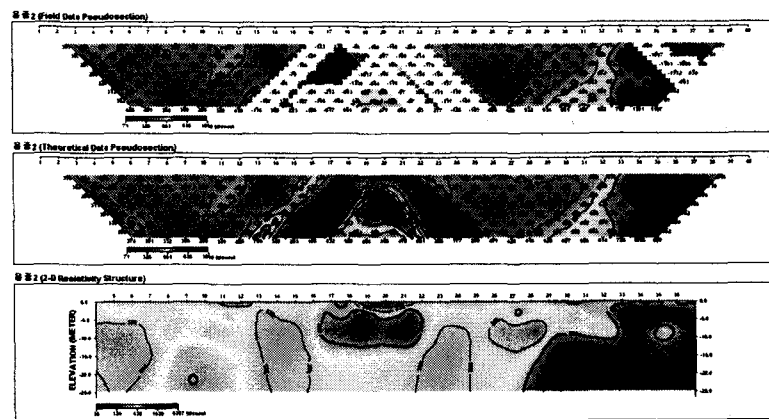
이 지역에 대한 수리지질조사는 1차적으로 전기 및 전자탐사 측선과 동일한 지점을 대상

으로 hand auger를 이용하여 심도별 토양특성을 분류하였으며<그림 1>, 대수층의 수리상수를 얻기 위하여 주변 지하수위 측정공을 이용한 양수시험을 실시하였다.

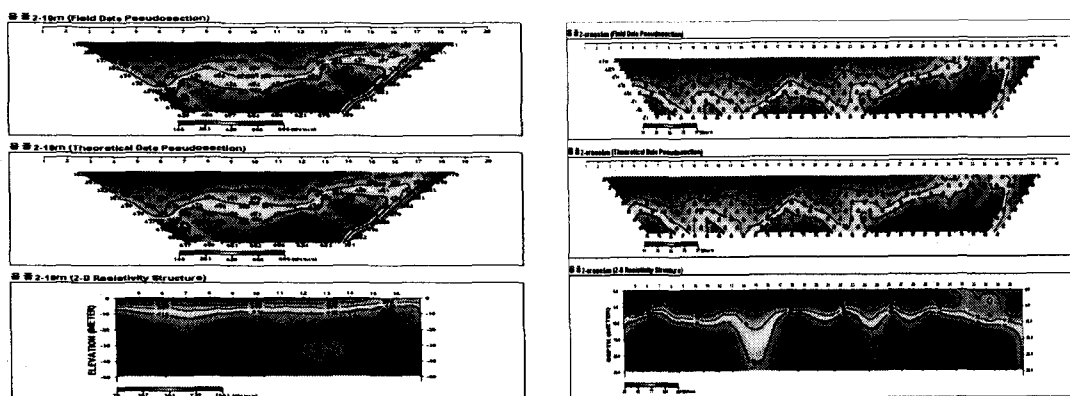
### 가. 전기비저항 및 소형루프 전자탐사

전반적인 수리지질구조 파악을 위해 다양한 전극간격을 대상으로 전기비저항 탐사를 수행하였으며, 천부 토양층에 대한 다양한 물성 파악을 위하여 소형루프 전자탐사를 병행하였다. 전기비저항탐사는 토양단면과 평행한 방향과 이 방향과 직교하는 방향으로 각각 측선을 설정하였으며, 전극배열은 쌍극자배열, 전극 간격은 2, 5, 10 m로 각각 설정하였다.

<그림 2>에 직교하는 방향으로 전극간격을 10 m, 5 m로 전개한 결과 지표 부근은 지하수에 포화된 사층으로 구성된 저비저항대가 나타나지만, 심도 6 m 이하는 상대적으로 비저항이 높게 나타나 시추 주상도의 결과를 나타내고 있다<그림 3>. 특히 측선 우측 부분의 고비저항대는 수평착정공의 PVC의 영향으로 판단되지만, 지형적인 영향으로 탐사구간에 포함시키지 못하여 단정하기는 불가능하다. 전극 간격 10 m의 경우 전극간격 5 m의 결과에서 나타난 풍화암이 심부까지 계속 이어지는 것으로 나타난다.



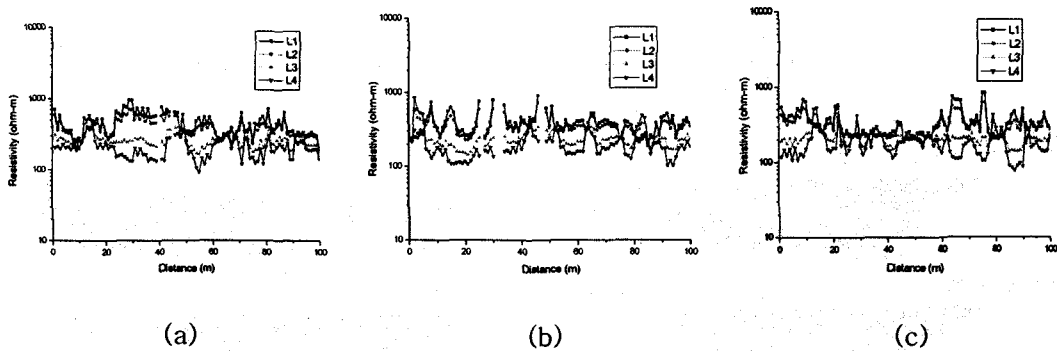
<그림 2> 집수정을 중심으로 전개한 쌍극자탐사 결과 단면



<그림 3> 쌍극자배열 전기비저항 탐사 결과 (좌측) 전극간격 10 m, (우측) 전극간격 5m

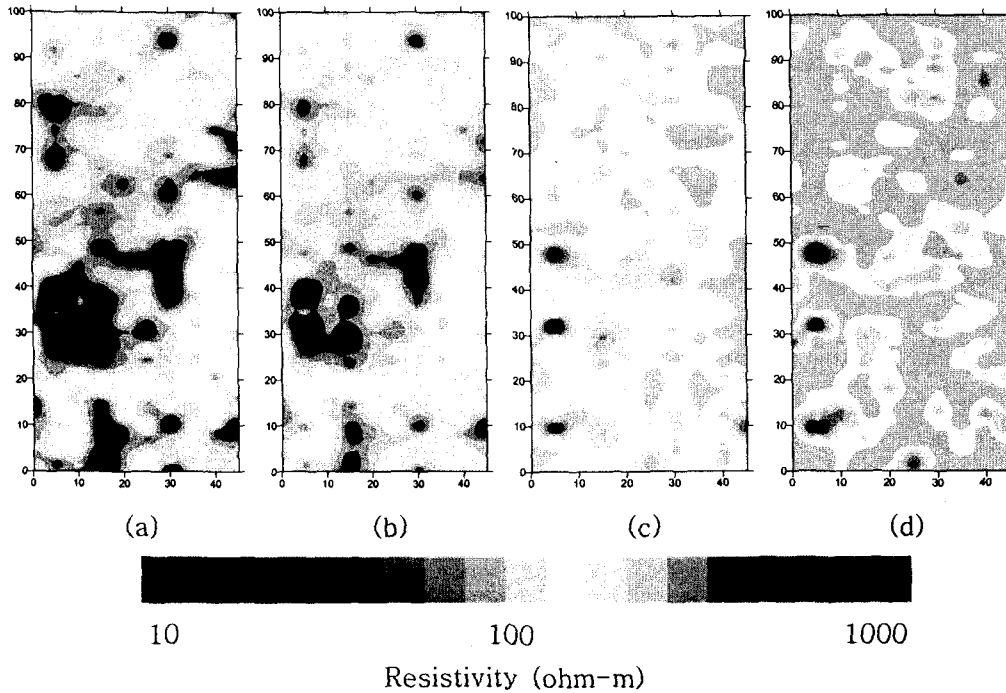
또한 방사상 집수정 주위의 전도도를 비교해본 결과 집수정에서 가까운 부분, 두 곳에서는 10.19 mS/m와 10.63 mS/m로 측정되었으며, 방사상 집수정에서 150 m 이상 떨어진 두 곳의 경우 각각 17.57 mS/m, 17.58 mS/m로 가까운 지점보다 상대적으로 높은 전기전도도의 값을 나타냈다. 이는 쌍극자탐사 결과에서 방사상 집수정 부분의 심부 비저항이 높게 나타나지만 지표 부근의 경우 사질토에서 물을 많이 함유하고 있는 부분의 저비저항대의 결과와도 일치한다. 특히, 물의 온도를 측정한 결과, 방사상 집수정 부근이 11℃ 정도인데 반해 150 m 이상 떨어진 곳의 경우 22.7℃로 현저한 차이를 나타낸다. 즉, 집수정과 가까운 곳의 물의 온도와 전기전도도가 낮게 나타남을 알 수 있다. 결국, 방사상 집수정 근처의 물은 양수로 인한 영향으로 볼 수 있다. 따라서 이 지역의 경우 방사상 집수정을 중심으로 많은 양의 물이 방사상으로 퍼져나간다는 사실을 확인할 수 있었다.

<그림 4>는 소형루프 전자탐사 결과로 <그림 1>에서 제시된 바와 같이 9개 측선 중 토양단면과 동일한 3개 측선에 대한 1차원 역산결과로 심도별 전기비저항 분포는 토양단면에서 나타난 점토와 모래의 경계 및 지하수면에 대한 결과와 비교 분석하였다. <그림 4(a)>의 No. 3 측선의 경우는 점토의 발달이 0.5~1.5 m 심도에서 수평적으로 나타나는데, 역산결과 0.5 m 심도에서 전기비저항값이 큰 변화를 보이지 않는 결과와 상관이 있는 것으로 판단되며, 45~70 m 사이 구간에서 점토의 발달이 하부까지 연결되는데, 역산결과 각 심도별로 약 100 ohm-m 이하로 나타나는 저비저항의 이상대와 일치한다. <그림 4(b)>는 No.6 측선의 역산결과로 35 m 지점은 역산결과 두 번째 층에 해당하는 상대적으로 매우 낮은 비저항값의 얇은 모래층과 일치하며, <그림 4(c)>의 경우 45 m 지점의 지하수면 아래지점까지 폭넓게 분포하는 점토의 특성을 잘 반영하고 있다. 전반적으로 이 지역은 사질토 구간으로 점토가 부분적으로 협재되어 있는 구간에서 상대적인 저비저항값을 보이고 있으며, 토양단면의 경우 수평적인 변화를 보이는 곳에서 전자탐사 결과의 이상대는 논에서의 염류집적에 의한 것으로 판단된다(용환호 외, 2003).



<그림 4> 1차원 역산에 의한 수직 전기비저항 단면 (a) No.3, (b) No.6, and (c) No.9 (L1: 0.5 m, L2: 1.6 m, L3: 3 m, L4: below 4.6 m)

<그림 5>는 연구지역에 대한 전자탐사의 역산결과에 의해 얻어진 전기비저항 분포를 각 층별로 나누어 영상화한 결과로 이 지역의 토양특성이 수직적인 전기비저항값의 변화에 민감하여 심부로 갈수록 낮은 전기비저항을 나타내는 반면, 수평적인 전기비저항값의 변화는



<그림 5> 1차원 역산에 의한 각 심도별 수평 전기비저항 분포도. ((a) 0.5 m, (b) 1.6 m, (c) 3.0 m and (d) 4.6 m)

상대적으로 거의 미미하지만 No. 3 측선 하부에 상대적으로 고비저항값을 보이며, No. 9 측선의 경우 저비저항값을 나타내고 있다. 고비저항값은 사질토로 구성되는 토양특성을 반영하며, 저비저항값은 염류집적에 의한 것으로 판단된다.

#### 나. 양수시험

본 연구에서는 방사상 집수정을 이용하여 960 m<sup>3</sup>/일의 양수량으로 양수시험을 실시하였으며, 시험기간 동안에 수위강하량 관측은 주변 관측정을 대상으로 양수시험 기간 및 회복수위 시험 기간에 자동관측기를 이용하여 실시하였다. 양수시험 결과 주변 하천의 수위가 약 2cm 내외의 하강하는 현상이 나타나며, 각 관측정에서의 초기 수위강하가 일정기간 경과 후 급격히 감소되는 것으로 나타나 하천으로부터 지하수 유입현상이 예상됨에 따라 각 관측정의 투수량계수와 저류계수는 초기수위를 기준으로 해석하였다(표 1).

#### 다. 지하수 유동 모델링을 이용한 적정채수량 산정

본 연구지역에 대하여 적정채수량 산정을 위하여 정류상태에서 결정된 수리전도도와 비산출률 및 유효공극율을 고정한 후, MODFLOW를 이용하여 실제 양수시험 기간인 2004년 3월 17일경에 해당하는 강수량자료를 기초로 함양조건과 하천수위를 조절하여 적정개발량을 산정하였다. 이때 정류상태에서 구축된 모델을 이용 다양한 양수량을 대상으로 3일과 5일 이후에 침하계가 설치된 부분의 수두분포를 예측하였다. 모델링 결과 양수량이 500 m<sup>3</sup>/day인 경우 양수시작 5일 이후의 수위가 3일 이후의 수위보다 회복되지만, 800~1,200 m<sup>3</sup>/day 범위에서는 양수시작 3일 경과 후와 5일 이후의 수두값이 비슷하게 나타나므로,

(표 1) 양수시험 결과 해석표(초기수위 기준)

관측정	거리 (양수정까지)	T(cm <sup>2</sup> /sec)	S	대수층 두께 (cm)	K(m/sec)	토성
층적관정	14.3 m	24.52	0.002651	263.0	9.32×10 <sup>-4</sup>	Loamy sand
SS-1	15.75 m	18.47	0.002031	216.5	8.53×10 <sup>-4</sup>	Loamy sand
SS-2	44.87 m	22.54	0.003723	189.0	1.19×10 <sup>-3</sup>	Loamy sand
SS-3	64.25 m	17.96	0.025510	235.0	7.64×10 <sup>-4</sup>	Loam
SS-4	89.63 m	124.4	0.023130	116.0	1.07×10 <sup>-2</sup>	Loamy sand
기존관정	62.5 m	48.67	0.001556	350.0	1.39×10 <sup>-3</sup>	Loamy sand

1,200 m<sup>3</sup>/day을 이 지역의 적정 채수량으로 설정하였다.

**라. 양수시험에 따른 지반침하 계측**

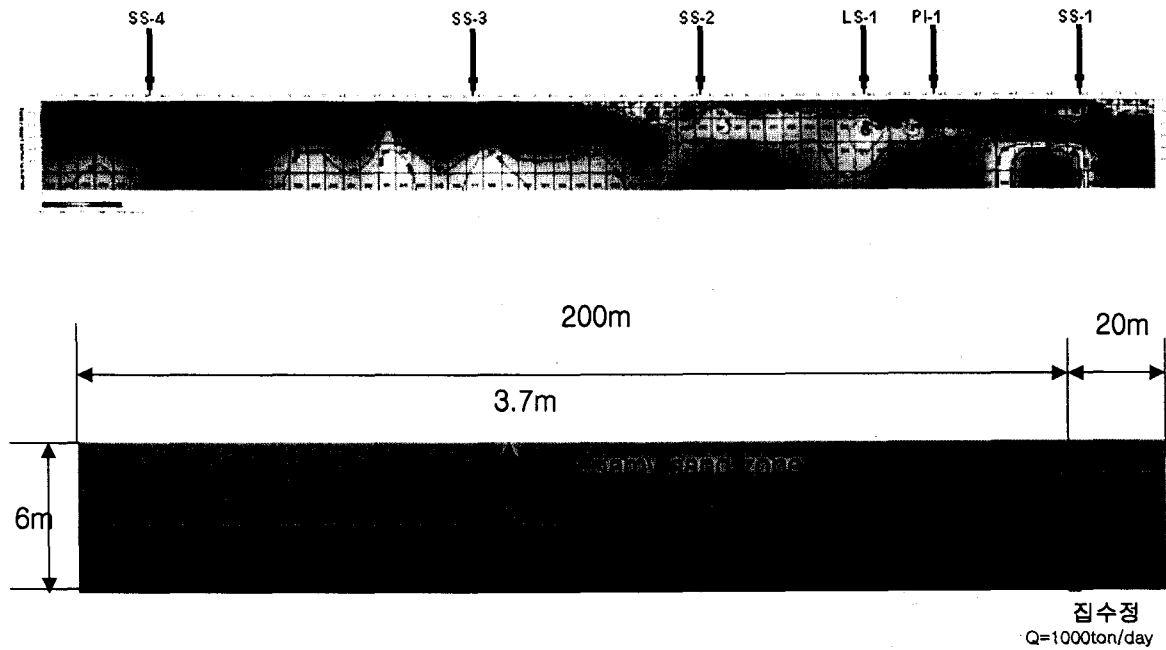
침하량 측정을 위한 침하계 설치 시 중요한 사항은 큰 변위발생이 예상되는 지점과 침하량이 최대로 예상되는 지점에 배치하여 침하의 진행에 따른 변화를 측정하는 것이다. 또한 계측된 침하량을 기초로 대상지반의 내부응력 변화 및 영향범위 등을 종합적으로 파악하기 위하여는 침하계가 가능한 한 동일 단면에 배치되는 것이 유리하므로, 본 연구에서는 토양 단면도를 기초로 수평적으로 연속성이 크고 유역내의 하천의 영향을 나타낼 수 있도록 하천 방향과 수직인 단면에 대하여 지표침하계 4기, 층별침하계 1기, 간극수압계 3기를 설치하였다<그림 1 참조>. 본 연구에 이용된 침하계는 진동현식 수직형 지중변위계(V-W type Extensometer)로서 지중의 변위에 따라 주파수 출력값이 변동되는 VW 변위 센서에 의하여 침하나 용기 등 변위를 정확하게 계측할 수 있으며, 층별침하계는 4개의 심도에 hydraulic anchor로 고정시켰으며, 지표침하계는 기반암에 anchor를 고정시켰다. 지반침하 계측 시스템을 이용하여 지하수의 양수에 의한 지반침하 영향을 고려하기 위하여, 양수시험 기간과 양수 종료 후 시간의 경과에 따른 지하수 수위변동의 양상 및 지반 침하량을 측정하였다(표 2).

**마. 지반침하 계측 단면에 대한 쌍극자배열 전기비저항탐사와 침하 예측 결과 비교**

지반침하 계측을 위한 계측 시스템은 앞서의 연구결과와 전극간격을 1.5m로 한 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과를 토대로 배치하였으며, 이를 기초로 FLAC 3D(Itasca, 1997)를 이용한 침하량 예측을 위하여 방사상 집수정을 중심으로 반경 200m 구간을 모델구역으로 설정하였다<그림 6>. 모델에 사용된 물리적 성질은 현장에서 측정된 전기비저항탐사 결과와 실내분석을 실시하여 계산하였으며, 현장에서 측정이 불가능한 항목은 입도분석을 통한 대표적인 토성의 물성값을 사용하였다. 연구지역의 토양을 채취하여 분석한 결과, 대표적인

(표 2) 각 침하계의 계측 결과

침하계 번호	거 리 (m)	최대침하 량 (mm)	수위강하 량 (m)	회복량 (mm)	최종침하 량 (mm)	양카 심도 (m)
SS-1	15.8	1.4	1.128	1.2	0.2	6
SS-2	44.9	0	0.5	0	0	6
SS-3	64.3	0.5	0.125	0.5	0	6
SS-4	89.6	-	0.065	-	0	6
LS-1	25.0	1.3		0.8	0.5	6
LS-1	25.0	0.6		0.6	0	5
LS-1	25.0	0.6		0	0.6	4
LS-1	25.0	1.3		0	1.3	3



<그림 6> 쌍극자배열 전기비저항탐사 2차원 단면과 지반 침하 모델링을 위한 단면도

단면은 sandy loam과 sand가 주종을 이루고, 하부에 기반암이 분포하는 것으로 파악되었다.

이렇게 구축된 개념모델을 이용하여 현장에서 실시된 양수시험 결과와 모델링 결과를 일치시키기 위하여 30분 양수 후 각 계측 지점에서 발생한 최대 침하량과, 회복된 변위량 그리고 최종적으로 발생하는 침하량을 계산한 결과, 양수정에서 거리에 따른 침하 양상은 거리와 비례하는 관계가 아니라 계측 지점의 sandy loam, sand 심도에 따라 달라지는 결과가 나타났다.

### 3. 결론

지반침하와 관련하여 지하수 과잉채수와 같은 수리지질학적 원인에 의한 미세 지반변형의 경우는 유역단위의 전체적인 물수지의 불균형으로부터 발생되어 나타나는 것이 일반적이다. 그러나 수리지질학적 원인은 지반을 구성하는 토양이나 암반의 특성과 공간적인 분포 형태가 중요한 요인으로 천부의 수리지질구조를 밝힐 수 있는 물리탐사 기법이 필수적이다. 본 연구에서는 약 6m 깊이의 충적층 지반을 대상으로 지하수 과잉채수에 의한 지반침하 양상을 규명하기 위한 수리지질구조를 밝히기 위하여 전기비저항탐사와 소형루프 전자탐사를 적용하였다. 적용 결과 sandy loam과 sand로 구성된 지반의 경우 앞서 언급한 탐사법을 적용한 결과 천부의 수리지질구조를 밝히는데 유용함을 확인하였다.

### 사사

이 연구는 21세기 프론티어연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

용환호, 송성호, 김진호, 조인기, 2003, 소형루프 전자탐사에 의한 논 토양분석, 물리탐사, 6, 207-214.

Itasca, 1997, FLAC3D version 2.0 User's manual, Itasca Consulting Group.