물리탐사
Vol. 7, No. 3, 2004, p. 197~206

연구논문

지하수 과잉양수에 따른 미세 지반변형 지역에서의 전기비저항 탐사

송성호[1] · 이규상[1] · 용환호[1] · 김진호[1]

Electrical Resistivity Survey at the Ground with Micro-subsidence by Excessive Pumping of Groundwater

Sung-Ho Song[1], Kyu-Sang Lee[1], Hwan-Ho Yong[1] and Jin-Ho Kim[1]

요 약 : 지하수 과잉양수에 의해 충적층 지반의 미세한 변위가 나타나는 경우는 대상지역 소유역내의 물수지 불균형이 주요한 원인으로, 이러한 미세변위를 효과적으로 계측하기 위해서는 대상지역내 지반의 대표적인 지점들에서 물수지 측정과 연계된 침하량의 장기 모니터링 방법이 효율적이다. 이 연구에서는 롬층과 모래층으로 구성된 지반에 대하여 시추조사를 이용한 3차원 토양단면도를 작성한 후, 2차원 전기비저항 탐사로부터 얻어진 수리지질구조를 이용하여 개념모델을 구성하였다. 이러한 개념모델과 다양한 수리지질조사 결과를 기초로 지하수 유동모델링과 지반침하 모델링을 수행하여 개념모델의 정확성을 검증한 결과, 롬층과 모래층으로 구성된 지반에서 미세 지반변형과 연관된 수리지질 구조를 해석하는 경우에는 hand auger를 이용한 시추조사와 전극간격을 짧게 한 2차원 전기비저항 탐사법을 함께 적용하는 것이 유용함을 확인하였다.

주요어 : 지하수 과잉양수, 미세 지반변형, 침하량, 지하수 유동모델링, 지반침하 모델링, 전기비저항 탐사

Abstract : Because the minute displacement of ground accompanied by excessive pumping of groundwater at specified site is mainly generated from ill-balancing of water budget within groundwater basin, it is necessary to monitor the variation of micro-subsidence for a long time at representative points. We made up the conceptual model using two-dimensional electrical resistivity survey and three-dimensional soil profile consisted of loam and sand. In verifying the reliability of this conceptual model using numerical modeling for ground settlement and groundwater flowing, two-dimensional electrical resistivity survey with short distance of electrode following soil sampling with hand auger would be useful for interpreting hydrogeological structure related to the minute displacement of ground consisted of loam and sand.

Keywords : excessive pumping of groundwater, micro-subsidence, numerical modeling for ground, numerical modeling for groundwater flowing, electrical resistivity survey

서 론

최근 대수층의 수리지질 특성을 고려하지 않은 상태에서 무분별한 지하수 개발 및 시추공에서의 과잉양수에 의해 지반침하 문제가 발생함에 따라 과잉채수에 의한 지반침하의 계측 및 제어 기술의 필요성이 커지고 있다. 이와 관련되어 전남 무안읍에서 보고된 지반침하의 경우는 석회암 지하공동 상부 지반에 건물 하중과 지하수 과잉채수에 의한 급격한 수위강하에 의해 발생된 응력이 지속적으로 작용하면서 기반암인 석회암 상부의 토사 및 풍화대에서 원형함몰이 발생된 사례로, 단기간의 지하수 과잉채수에 의한 대표적인 지반침하 사례로 알려져 있다(무안군, 2001).

일반적으로 지반침하 현상은 토양압밀, 토양수축 및 지하수위 저하 등의 원인으로 매년 수 mm 정도의 미세한 변위를 나타내는 경우와 지각의 균열, 모암의 용해에 의한 지하공동의 침강 등으로 큰 변위가 발생되는 경우로 구분된다(Whittaker and Reddish, 1989). 이 중 지하수의 과잉양수와 관련되어 지반의 미세한 변위가 나타나는 경우는 주로 토양 공극 사이의 물이 배수됨에 따라 미세한 토양입자 들이 공극을 충전하는 원인으로 나타나며, 이는 대상 소유역내의 물수지 불균형으로부터 발생될 수 있기 때문에 이를 계측하기 위해서는 다양한 방법의 물수지 측정과 연결된 침하량의 장기 모니터링 방법이 효율적이다.

이 연구에서는 지하수 과잉채수에 의한 함몰현상이 국부적으로 나타난 경기 장호원 인근 지역의 롬(loam)층과 모래층으로 구성된 지반에 대하여 시추를 이용한 토양단면도를 작성한

*2004년 7월 29일 접수
1) 농어촌연구원 지하수연구실(KARICO)

후, 전극간격을 짧게 배열한 고해상도 전기비저항 탐사로부터 얻어진 수리지질구조를 기초로 지반침하 모델링을 위한 개념모델을 구성하였다. 또한 이러한 수리지질 개념모델과 다양한 수리지질조사 결과를 기초로 침하 계측기 설치 및 지반침하 모델링을 수행하여 개념모델을 검증하였으며, 이를 기초로 전기비저항 탐사 결과의 타당성을 제시하였다.

연구지역

지하수 과잉채수에 의한 미세 지반변위를 관측하기 위한 연구대상 지역은 지하수를 대량으로 채수하는 지역인 경기 장호원 인근의 방사상 집수정 유역으로, 최근 집중적인 취수로 땅꺼짐 현상이 발생한 지역이다. 이 지역의 땅꺼짐 현상은 방사상 집수정이 위치한 곳으로부터 5~10 m 거리의 지점으로 대수층 구성 물질은 중립질~세립질 모래와 롬으로 구성되어 있으며(용환호 등, 2003), $50 \times 100\ m^2$ 지역에 대하여 심도별 토양시료 채취 및 전기비저항 탐사를 체계적으로 수행하였다(Fig. 1). 이 지역에 대한 수리지질조사는 1차적으로 hand auger를 이용하여 18지점에 대하여 심도별 토양특성을 분류하였으며(Fig. 2), 연구지역의 전반적인 지반 특성을 규명하기 위

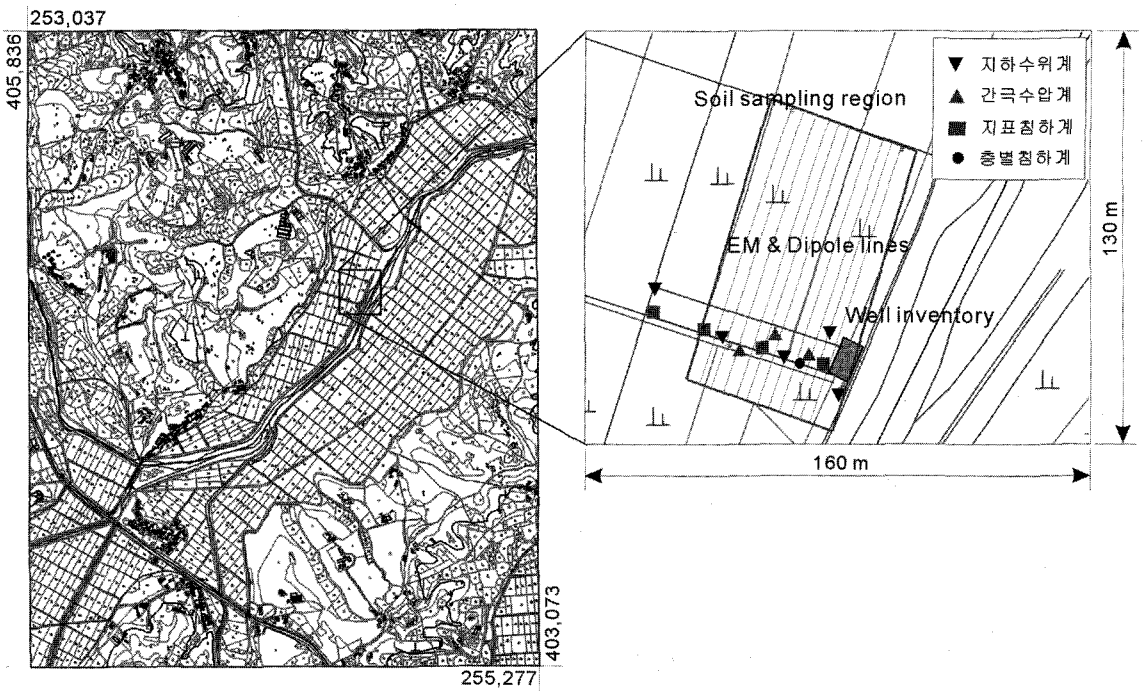

Fig. 1. Geographical location map including survey lines and points of extensometer.

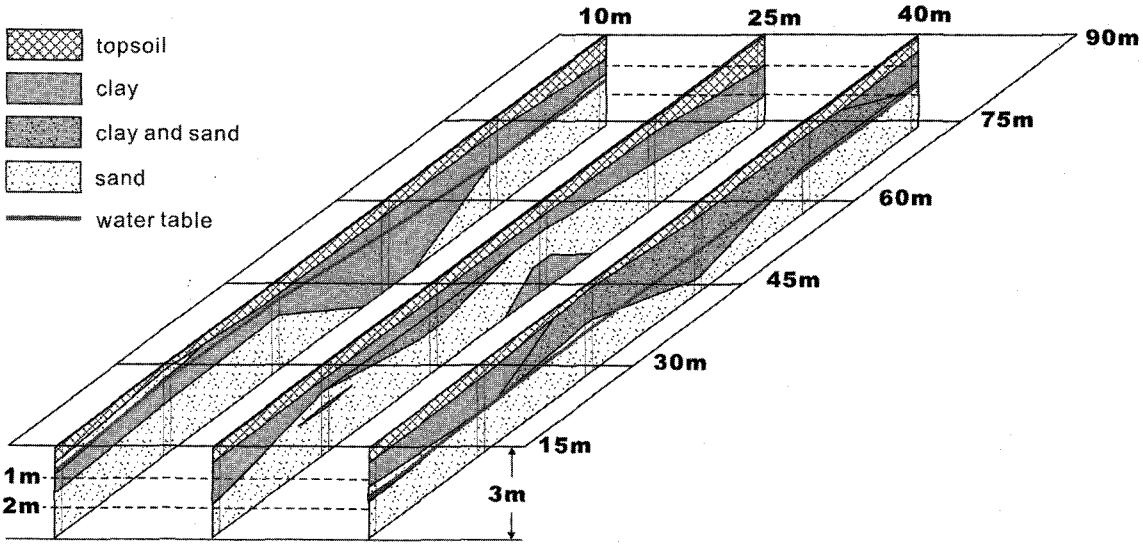

Fig. 2. Three-dimensional soil profiles in the study area ($50 \times 100\ m^2$).

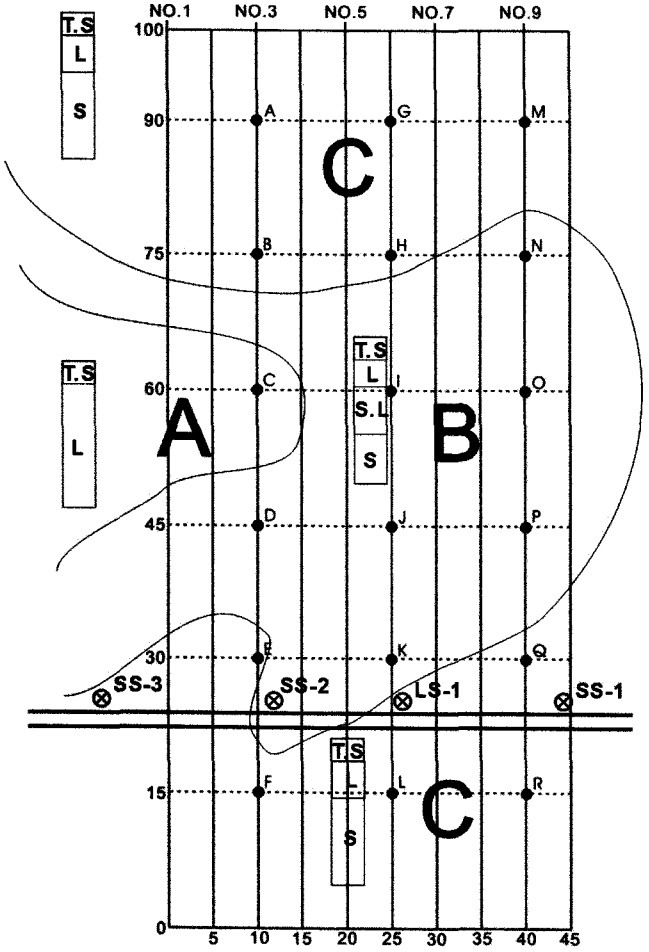

Fig. 3. Inferred old stream bed by soil profiles at 18 sampling points with several types of extensometer. (abbre: T.S; top soil, L; loam, S.L; sandy loam, S; sand, large letter; category of soil type, small letter; sampling point, SS-1,2,3; surface extensometer, LS-1; layer extensometer)

하여 전극간격 2 m와 10 m의 4개 측선과 침하계 설치를 위하여 전극간격 1.5 m의 2개 측선을 평행하게 배열한 쌍극자배열 전기비저항 탐사를 수행하였다. 또한 대수층의 수리지질특성 파악을 위하여 연구지역 내에 설치한 관측공들을 대상으로 양수시험을 실시하여 수리전도도 및 저류계수를 산출하여 지하수 유동모델링의 입력자료로 활용하였다.

Fig. 3은 앞서 제시한 3차원 토양단면도를 이용하여 지표 하부의 과거 하상을 추정한 평면도로서, A구간의 경우는 표토부 하부에 롬층이 두껍게 형성되어 있으며, B구간의 경우는 표토 하부에 롬층, 사질롬층 및 사층이 분포하고 있다. C구간의 경우는 표토 하부에 롬층이 약 1 m 두께로 분포하며, 그 하부에 사층이 두껍게 분포하고 있다. 이러한 분포를 기초로 이 연구대상 지구는 과거 사행천(meandering stream)의 만곡부로 판단되며, 이에 따라 규모가 작은 지역임에도 불구하고 심도에 따른 지반 구성물질의 수평적인 분포가 다양한 것으로 나타났다.

쌍극자배열 전기비저항 탐사

이 연구에서는 Fig. 4와 같이 연구대상 지역의 심도별, 공간적 전기비저항 분포를 파악하기 위하여 전극간격 2 m와 10 m를 대상으로 토양단면과 평행한 방향과 직교하는 방향에 대하여 각각 쌍극자배열 전기비저항 탐사를 수행하였다. 측선 IV는 전극간격을 10 m로 전개한 탐사 결과로 지표 하 약 6 m 이내의 범위에서는 지하수에 포화된 사층으로 구성된 저비저항대가 나타나지만, 심도 6 m 이하는 300 ohm-m 이상의 상대적으로 비저항이 높게 나타나므로 이 지역의 기반암 심도가 약 6 m 이하 깊이에서 나타나는 결과와 일치된다. 전극간격을 2 m로 설정한 3측선의 탐사결과 단면의 경우는 5~6 m 심도 이하에서 앞서 제시한 측선 IV와 마찬가지로 300~500 ohm-m의 고비저항대가 나타남에 따라 기반암의 심도로 판단된다. 그러나 측선 I의 경우는 측선 시점부터 측점 12번 까지 심도 6 m 이하에 기반암으로 판단되는 고비저항대가 발달하지만 이와 평행한 측선 II, III의 경우는 측선 시점부분에 상대적으로 저비저항대가 나타나므로 연구지역 전체적으로 수평적인 비저항의 분포가 일정하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 토양단면도 작성 결과로 분석된 과거 하상의 사행으로 나타난 지반의 수평적인 분포가 다양한 결과로 판단된다.

Fig. 4의 측선 V와 VI의 경우는 전극간격 1.5 m의 고해상도 전기비저항 탐사 결과로, 앞서 작성된 3차원의 토양단면도 결과와 개략적인 쌍극자배열 전기비저항 탐사 결과를 토대로 B와 C 구간이 포함된 방향으로 침하계를 설치하기 위한 목적으로 수행되었다. 측선 VI은 측선 IV와 동일한 측선으로 C 구간의 경우는 2~3 m 깊이까지 100 ohm-m 이하의 저비저항대가 나타나지만, B 구간의 경우는 동일 심도에서 약 200 ohm-m 이상의 고비저항대가 나타나는데, 이러한 결과는 앞서 분석된 과거의 하상에 의해 발생된 수평적인 불균일성의 결과와 일치됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 약 10 m 떨어져 평행하게 탐사한 측선 V에서 동일한 양상으로 나타난다.

간극수를 이용한 유효공극율 추정

본 연구에서는 Archie(1942)가 다공질 사암으로 구성된 저류암의 물성을 평가하기 위하여 전기비저항과 간극수의 전기비저항 사이의 관계를 토대로 공극율을 평가한 경험식을 이용하였는데, Archie(1942)는 지층의 전기비저항(ρ), 간극수의 전기비저항(ρ_w) 및 포화도(S_w) 사이의 관계식을 식 (1)로 나타내었다.

$$\rho = F\rho_w S_w^{-2} \tag{1}$$

윗 식에서 F는 지층비저항 계수(formation factor)이며, 식 (2)로 나타낼 수 있다.

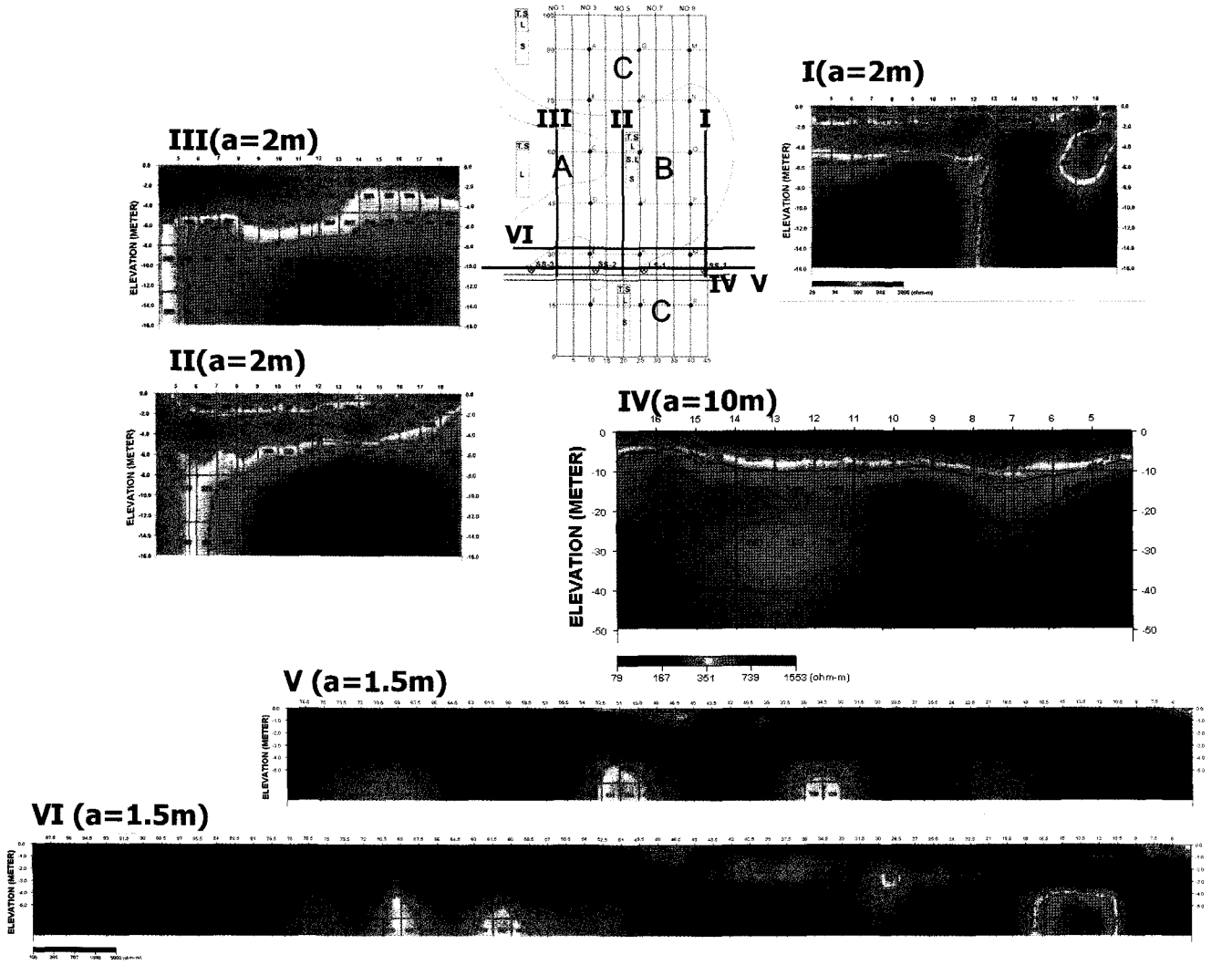

Fig. 4. Two-dimensional inversion results of dipole-dipole electrical resistivity survey at the study area. Resistivity scale of line Ito IV is below line IV, and that of line V and VI is below line VI.

$$F=\frac{\rho}{\rho_w}=an^{-m} \quad (2)$$

여기서, a는 실험정수로서 경험적으로 0.6~3.5 범위이며, n은 지층의 공극율이다. 이때 m은 고결계수(cementation factor)로 공극의 기하학적 형태 및 고결 정도에 따라 1.4~2.2 범위에 해당한다.

이러한 경험식을 사층으로 구성된 본 연구지역에 적용하였는데, 이를 위하여 Fig. 3에서 제시된 시료채취 위치 중 9곳에서 수행된 10 m 범위의 슐럼버져배열 전기비저항 수직탐사 결과를 토대로 1차원 역산법을 동원하여 3개층을 대상으로 각 지점별로 심도별 전기비저항을 산출하였다(Table 1).

또한 9곳에 대하여 3 m 깊이의 심도별 토양시료를 채취하여 간극수의 전기비저항을 분석하였으며, 전기비저항 수직탐사 결과로 얻어진 지층의 전기비저항과 분석된 간극수의 전기비저항의 비인 지층비저항 계수를 산출하여 각 지점별로 심도별 유효공극율(이때의 공극율은 원위치에서 추정된 값으로 유효공극율로 적용)을 추정하였다. 이때 Table 1에서 제시된 9개 지점의 심도별 역산결과로 얻어진 전기비저항 (ρ)과 동일 지점에서 심도별로 채취된 토양 간극수의 전기비저항 (ρ_w)의 비인 지층비저항 계수를 계산하였으며, 이때 실험정수는 0.6, 고결계수는 1.4를 적용하였다(Table 2).

Table 2에서 추정된 유효공극율 값들 중 모래층에 해당하는 유효공극율만을 대상으로 계산된 평균값은 29.2%로, 롬층의 22.9%에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 이러한 결과들은 직접적으로 지하수 유동모델링의 기초자료로 활용하였다.

양수시험

이 연구에서는 앞서 수행된 물리탐사 결과 얻어진 수리지질 특성을 이용한 지하수 유동 모델링의 입력자료를 얻기 위하여,

Table 1. One-dimensional inversion results of vertical sounding at 9 points.

point	depth(m)	resistivity (ohm-m)	point	depth(m)	resistivity (ohm-m)	point	depth(m)	resistivity (ohm-m)
A	0~0.5	141	C	0~0.5	153	F	0~0.5	148
	0.5~1.5	224		0.5~1.5	219		0.5~1.5	440
	1.5~4.4	120		1.5~4.4	99		1.5~4.4	142
G	0~0.5	118	I	0~0.5	173	L	0~0.5	183
	0.5~1.5	250		0.5~1.5	341		0.5~1.5	123
	1.5~4.4	86		1.5~4.4	142		1.5~4.4	235
M	0~0.5	116	O	0~0.5	122	R	0~0.5	194
	0.5~1.5	100		0.5~1.5	124		0.5~1.5	208
	1.5~4.4	152		1.5~4.4	157		1.5~4.4	144

Table 2. Estimated effective porosity and formation factor calculated at 9 points.

point	depth (m)	ρ (ohm-m)	ρ_w (ohm-m)	F	estimated effective porosity (%)	point	depth (m)	ρ (ohm-m)	ρ_w (ohm-m)	F	estimated effective porosity (%)
1	50	141	33.67	4.19	25.0	6	50	183	22.08	8.29	15.3
	150	224	29.94	7.48	16.5		150	123	28.82	4.27	24.6
	250	120	39.22	3.06	31.2		250	235	52.63	4.47	23.8
2	50	153	28.49	5.37	20.9	7	50	116	11.25	10.31	13.1
	150	219	33.22	6.59	18.1		150	100	23.70	4.22	24.8
	250	99	45.25	2.19	39.7						
3	50	148	47.85	3.09	31.0	8	50	122	46.08	2.65	34.6
	150	440	48.54	9.06	14.4		150	124	50	2.48	36.3
	250	142	38.76	3.66	27.5		250	157	60.98	2.57	35.3
4	50	118	45.45	2.60	35.1	9	50	194	70.92	2.74	33.8
	150	250	45.25	5.52	20.5		150	208	39.53	5.26	21.2
	250	86	44.64	1.93	43.5		250	144	68.49	2.10	40.8
5	50	173	46.30	3.74	27.1						
	150	341	45.66	7.47	16.5						
	250	142	24.27	5.85	19.7						

※ Shadow region means sand-dominated formation.

연구지역 주변에 설치한 6개 관측정을 이용하여 양수시험을 실시하였다. 이때 양수정은 방사상 집수정을 이용하였으며, 양수량은 960 m^3/d로 시험기간 동안의 수위강하량 관측은 6개의 관측정을 대상으로 양수시험 기간 및 회복수위 시험 기간에 자동관측기를 이용하여 실시하였다. 이때 양수정과 각 관측정의 위치는 침하계 설치 위치와 인접한 지점에 설치하여 지반침하 계측 결과와 비교를 용이하게 하였다(Fig. 5).

Fig. 6은 각 관측정에서 양수시험에 따른 수위강하량을 이용한 해석결과로, 하천에 인접한 B-1, SS-1, SS-2 관측정의 경우 양수 시작 이후 약 10분 경과 후부터 수위강하량이 급격하게 감소되는 것으로 나타나는데 이는 하천수의 유입에 따른 영향으로 각 관측정의 투수량계수와 저류계수는 하천수 유입의 영향이 나타나지 않은 초기수위를 기준으로 해석하였다(Table 3).

해석 결과 수리전도도는 전체적으로 0.8~1.4 × 10^{-3} m/s 범위를 나타내는데, SS-4 관측정의 경우는 이상적으로 약 10배 높게 나타나는데 이는 수위관측 자료가 적어 해석상의 오차로 판단된다. 저류계수는 양수정으로부터 거리가 멀어질수록 상대적으로 증가되는 것으로 나타나는데, 이는 전극간격 1.5 m의 전기비저항 탐사 결과 C 구간에서 2~3 m 깊이까지 100 ohm-m 이하의 저비저항대가 발달하는 위치와 일치되는 결과로 나타나며, 이러한 결과로 부터 본 연구지역이 자유면 대수층으로 저류계수가 유효공극율과 동일한 의미이므로, 저비저항대의 경우 사층에 발달되는 주요한 대수층으로 판단된다.

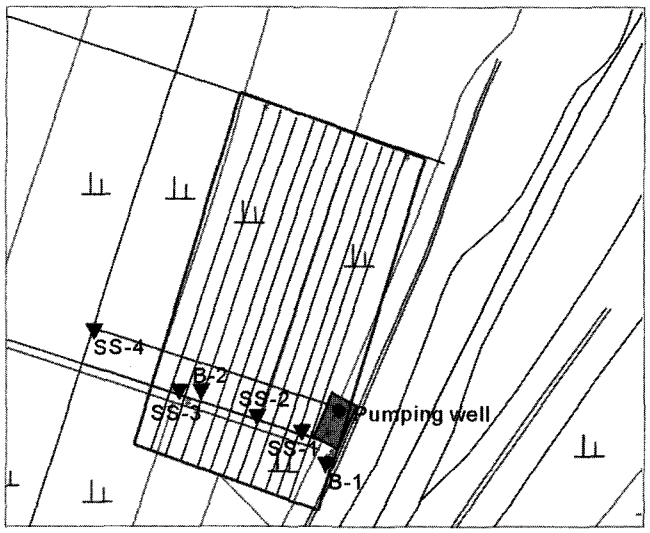

Fig. 5. Location map of wells from Fig. 1.

지하수 유동 모델링을 이용한 적정 개발 가능량 산정

이 연구에서는 지층비저항 계수를 이용하여 추정된 공극율, 양수시험에서 얻어진 수리전도도와 저류계수 및 고해상도 전기비저항 탐사 결과로 얻어진 개념모델 등의 입력자료를 활용하여, 실제 양수시험 기간인 2004년 3월 17일 전후에 해당하는 강우량자료를 기초로 visual MODFLOW(Waterloo Hydrogeologic Software, 2000)를 이용한 함양조건과 하천수위를 조절하여 연구지역의 개발 가능량을 산정하였다. Fig. 7은 정류상태에서 구축된 모델을 이용하여 다양한 양수량을 대상으로 양수시작 이후 3일과 5일 경과 시점에 각 위치별로 지하수위 분포를 예측한 결과로, 양수량이 960 m^3/d인 경우는 양수시작 5일 이후의 수위가 3일 이후의 수위보다 회복되지만, 1,200~1,440 m^3/d 범위에서는 양수시작 3일 경과 후와 5일 이후의 수두값의 변화가 거의 없는 것으로 나타나므로, 1,200 m^3/d를 연구지역의 적정 개발 가능량으로 설정하였다. 특히 적정 개발 가능량으로 제시한 1,200 m^3/d를 대상으로 1일 12시간 동안 2,400 m^3/d로 양수한 후 이후 12시간 동안 양수를 중단하는 주기적인 양수에 대한 수치모델 결과도 5일 이후 기간에도 지하수위가 안정되게 유지되는 것으로 나타남에 따라 설정된 개발 가능량이 적정함을 확인하였다.

양수에 따른 지반침하량 계측

지반 침하량 측정을 위한 계측기 설치 시 중요한 사항은 변위 발생이 예상되는 지점과 침하량이 최대로 예상되는 지점에 침하계를 설치하여 침하의 진행에 따른 변화를 측정하는 것으

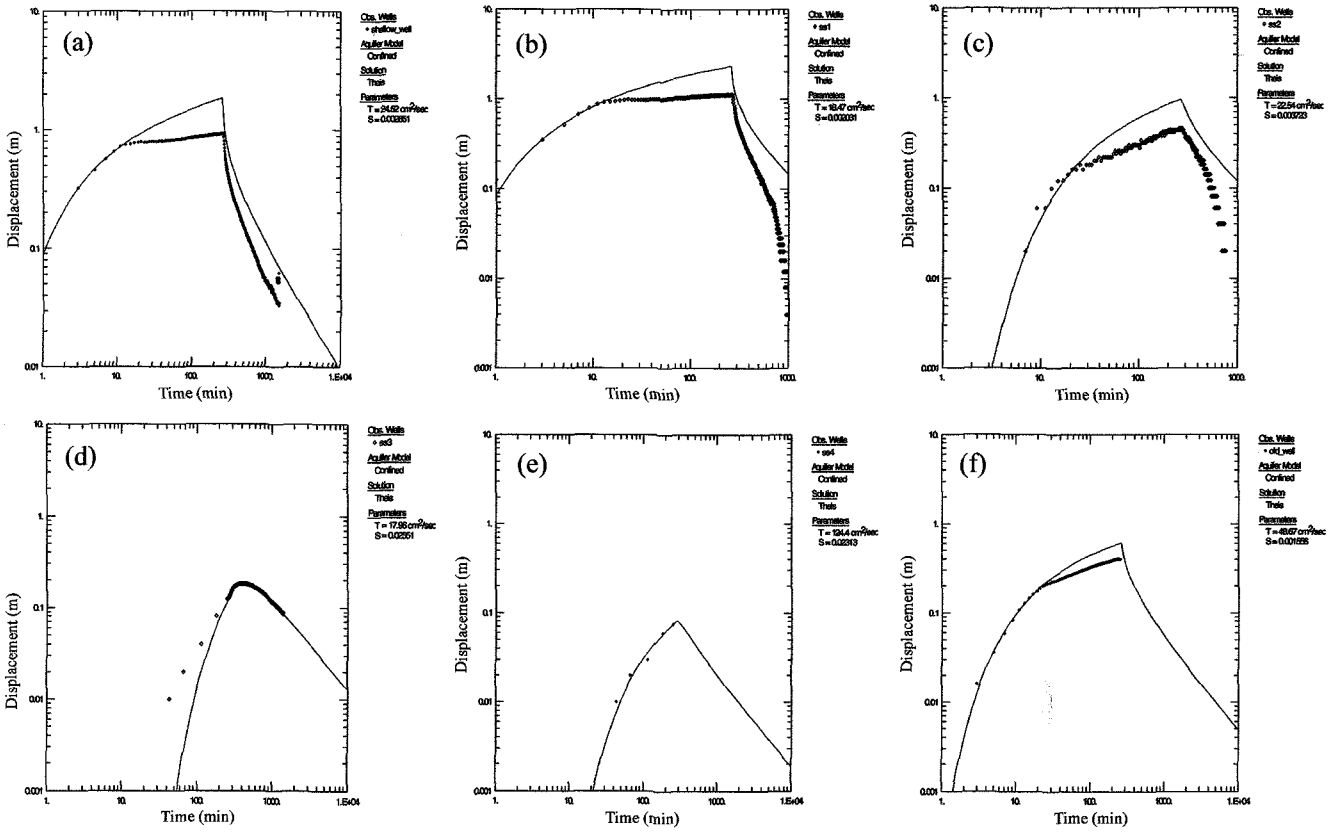

Fig. 6. Results of curve matching between observed data and type curve. (a) B-1, (b) SS-1, (c) SS-2, (d) SS-3, (e) SS-4, (f) B-2

Table 3. Interpretation results of pumping test using radial collective well.

well	distance from pumping well (m)	T (cm^2/s)	S	thickness of aquifer (cm)	K (m/s)	soil type
B-1	14.30	24.52	0.002651	263.0	9.32×10^{-4}	Loamy sand
SS-1	15.75	18.47	0.002031	216.5	8.53×10^{-4}	Loamy sand
SS-2	44.87	22.54	0.003723	189.0	1.19×10^{-3}	Loamy sand
SS-3	64.25	17.96	0.025510	235.0	7.64×10^{-4}	Loam
SS-4	89.63	124.4	0.023130	116.0	1.07×10^{-2}	Loamy sand
B-2	62.50	48.67	0.001556	350.0	1.39×10^{-3}	Loamy sand

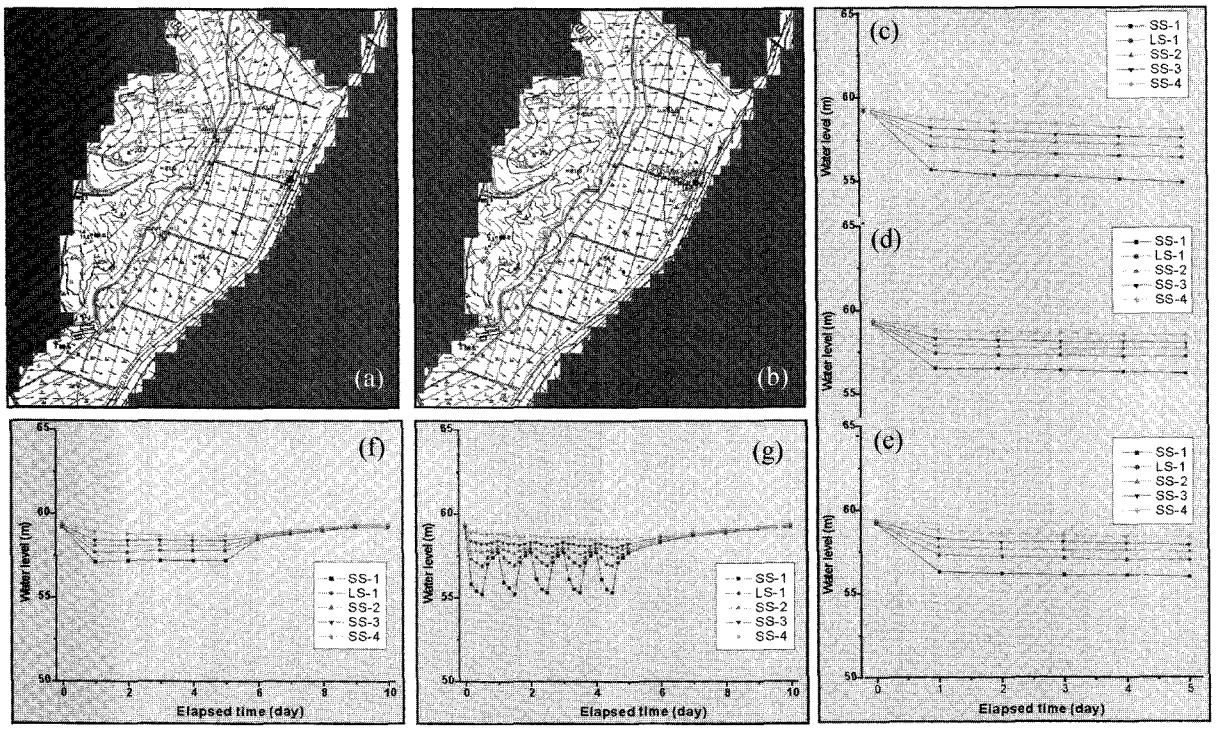

Fig. 7. Numerical modeling results using visual MODFLOW. (a) Equi-potentiometric surface at steady state, (b) Equi-potentiometric surface at 4 hour later after pumping start, (c) Q = 1,200 m^3/d, (d) Q = 1,440 m^3/d, (e) Q = 1,320 m^3/d, (f) Q = 960 m^3/d, (g) Q = 1,200 m^3/d using periodic pumping.

로, 계측된 침하량을 기초로 대상지반의 내부응력 변화 및 영향범위 등을 종합적으로 파악하기 위해서는 침하계가 가능한 한 동일 단면에 배치되는 것이 유리하다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 1에서 제시한 것과 마찬가지로 토양단면도와 고해상도 전기비저항 탐사 결과 얻어진 개념모델을 기초로 수평적으로 연속성이 크고 유역내의 하천의 영향을 나타낼 수 있도록 하천 방향과 수직인 단면에 대하여 지표침하계 4조, 층별침하계 1조 및 간극수압계 3조를 설치하였다. 이 연구에 이용된 침하계는 정확도 0.5 mm, 분해능 0.05 mm의 진동현식 수직형 지중변위계(V-W type Extensometer)로 지중의 변위에 따라 주파수 출력값이 변동되는 VW 변위 센서에 의하여 침하나 융기 등에 의한 변위를 정확하게 계측할 수 있는데, 층별침하계는 4개의 심도에 hydraulic anchor, 지표침하계는 기반암에 anchor를 각각 고정시켰다. Table 4는 지하수의 양수에 의한 지반침하 영향을 고려하기 위하여, 양수량 1,200 m^3/d로 실시한 양수시험 기간과 양수 종료 후 시간의 경과에 따른 지하수위 변동양상과 지반 침하량 계측 결과이다.

양수시험에 따른 각 관측정의 수위강하는 양수정과 가까운 SS-1 관측정에서 가장 큰 1.13 m이지만, 거리가 멀어질수록 수위강하량이 작아지는 것으로 나타났다. 또한 이와 수반된 지반침하량은 SS-1와 LS-1 지점에서 각각 1.4 mm와 1.3 mm로 가장 크지만, 층별침하계인 LS-1의 경우 하부 지층인 6 m 심도의 지층에서 최종 침하량이 0.5 mm로 회복이 되지 않는 결과로 나타났다. 이와 반대로 양수정에서 멀어질수록 지반침하의 회복은 원상태로 복구되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 LS-1의 경우는 하부의 모래층이 상대적으로 두꺼워 모래입자의 재배열(rearrangement)에 의해 완전한 회복이 되지 않는 것으로 판단된다.

Table 4. Measuring results of each extensometer.

number of extensometer	distance from pumping well (m)	maximum settlement (mm)	drawdown (m)	settlement recovery (mm)	final settlement (mm)	depth of anchor (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

지반침하 계측 단면에 대한 쌍극자배열 전기비저항탐사와 침하 예측 결과 비교

지반침하 계측을 위한 계측기는 토양단면도와 전극간격 1.5 m인 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과를 토대로 배치하였으며, 이를 기초로 FLAC^{3D}(Itasca, 1997)를 이용한 침하량 예측을 위하여 방사상 집수정을 중심으로 반경 200 m 구간을 모델구역으로 설정하였다(Fig. 8). 모델의 경계조건은 양수시험 시 관측정들의 수위강하 양상에서 하천수가 유입되는 것으로 나타남에 따라 하천의 영향을 고려하기 위하여 집수정 서측 200 m, 동측 20 m 경계를 설정하였으며, 각각의 경계에서의 초기수위에 의해 계산된 간극수압으로 고정되는 것으로 설정하였다.

Table 5는 수치모델에 이용된 롬층과 모래층의 물리적 성질로 각 지층별로 특성을 대표할 수 있는 지점의 불교란 시료를 각각 1점씩 채취하여 농어촌연구원 토질시험실에서 분석한 결과치이다.

이러한 물성은 Fig. 8의 개념모델에 입력되었는데, 시추조사 결과 최상부는 롬층에 해당하는 영역으로 방사상 집수정 주변은 심도 1.5 m, SS-3 지점은 3.7 m 심도까지 분포하며, 롬층 하부로부터 6 m까지는 모래층으로 본 지역의 주 대수층을 형성하고 있다. 시추조사 결과와 전기비저항 탐사 결과를 토대로 6 m 하부에는 본 지역의 기반암이 분포하여 변위가 발생하지 않는 것으로 모델을 구성하였다.

양수에 따른 지반침하량은 현장에 설치된 계측지점에 대하여 양수시험 결과와 모델링 결과를 일치시키기 위하여, 양수시작 이후 240분 경과시점에 대하여 각 계측 지점에서 발생한 최대 침하량을 계산하였으며, 이 값을 계측기에서 실제 측정된 침하량과 비교하였다(Table 6).

수치모델링 결과 침하양상은 각 계측기 설치 지점의 롬층과 모래의 심도에 따라 달라지는데, 모래층의 심도가 상대적으로

Table 5. Mechanical properties of each formation.

mechanical properties	sandy loam	sand
Young's modulus (MPa)	20	150
Poission ratio (MPa)	0.3	0.4
density (g/cm^3)	1.58	1.43
porosity	0.4	0.3
permeability (cm/s)	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-4}
friction angle ($^\circ$)	20	30
cohesion (Pa)	2.2×10^{4}	1.6×10^{3}

Table 6. Comparative results of numerical modeling data and measured data.

number of extensometer	distance from pumping well (m)	estimated maximum settlement (mm)	measured maximum settlement (mm)
SS-1	15.8	0.426	1.4
LS-1	25.0	0.268	1.3
SS-2	44.9	0.218	0
SS-3	64.25	0.213	0.5
SS-4	89.63	0.168	–

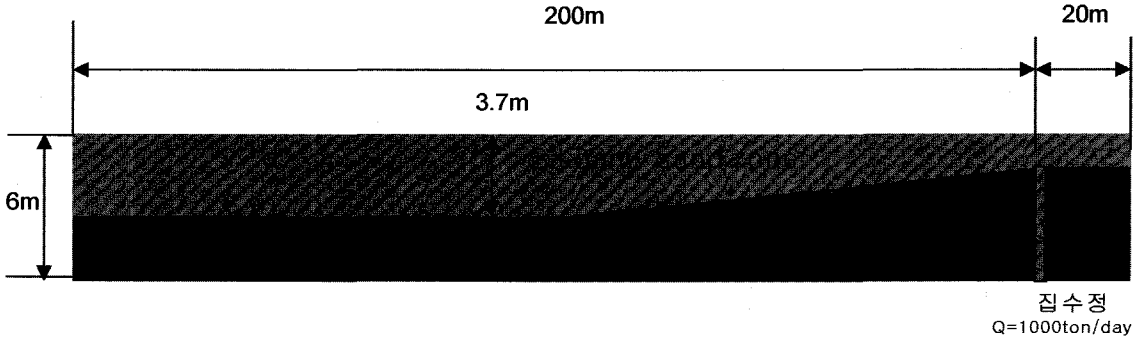

Fig. 8. Vertical section of conceptual model for numerical modeling using FLAC^{3D}.

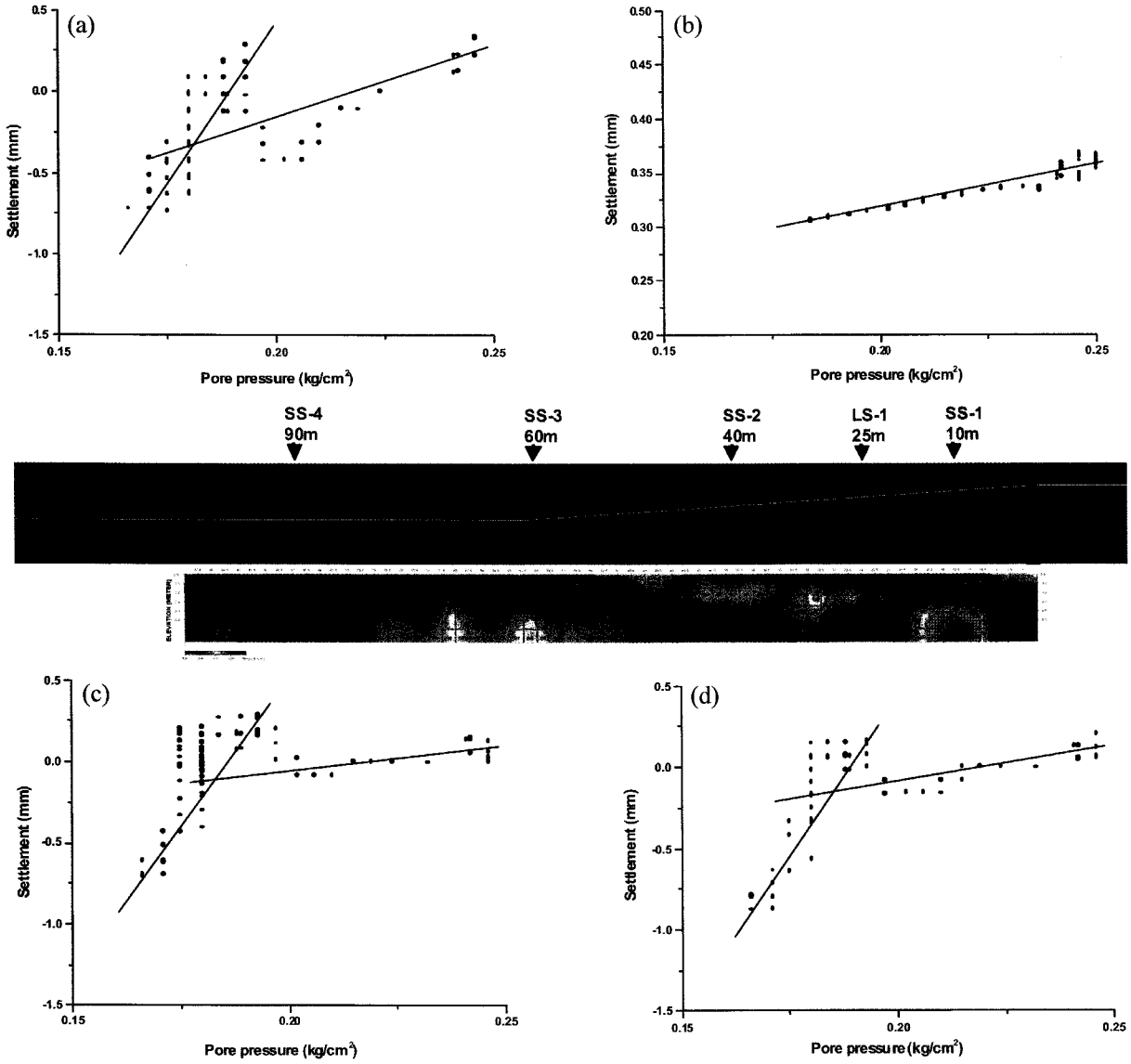

Fig. 9. Evaluation of conceptual model using the results of settlement at each extensometer points.

모래의 심도에 따라 달라지는데, 모래층의 심도가 상대적으로 깊은 SS-1 지점과 LS-1 지점의 최대침하량은 각각 0.426 mm와 0.268 mm로, 실측결과인 1.4 mm와 1.3 mm에 비해 작은 결과가 나타났다. 이에 비해 모래층의 심도가 상대적으로 얕은 SS-3 지점의 경우 예측결과는 0.213 mm에 비해, 실측치는 0.5 mm로 나타났으며, SS-2 지점의 경우 예측치는 0.218 mm인데 비해 실측치는 변위가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수치모델링을 위한 개념모델의 경우 양수정을 중심으로 사층의 두께가 서서히 감소되므로, 수치모델링에 의한 예측결과는 거리가 증가함에 따라 침하량에 감소되는 것으로 나타났지만, 실측치의 경우는 SS-2 지점의 경우 침하가 계측되지 않은 결과가 나타나므로, 고해상도 전기비저항 탐사 결과 나타난 고비저항대의 구간이 주변과 다른 수리지질 특성 때문인 것으로 판단된다.

지금까지의 지반침하 계측결과와 수치모델링 결과를 토대로 연구지역에 대한 개념모델의 신뢰성이 입증됨에 따라, Fig. 9에 나타난 바와 같이 SS-2 지점의 지표침하계의 경우는 앞서 제시한 고해상도 전기비저항 탐사 결과 상대적으로 고비저항대가 지표 부근까지 발달하는 반면, SS-1, SS-3 및 SS-4 지점의 침하계의 경우는 지표 하 약 2~4 m 심도까지 100 ohm-m 이하의 저비저항대가 발달하는 양상으로 나타났다. 이러한 각 침하계 위치별 수리지질적인 차이는 각 침하계의 간극수압과 변위 상관성에서도 SS-2 지점의 지표침하계의 특성이 다른 지점의 지표침하계의 특성과 차이가 나타나는 것으로 설명된다.

토의 및 결론

지하수 과잉채수에 의한 지하수위 강하와 이에 수반된 토양

의 경우는 대상 소유역내의 물수지의 불균형으로부터 발생되어 나타나는 것이 일반적이다. 그러나 토양압밀 등의 수리지질학적 원인은 지반을 구성하는 토양의 물리적 성질과 공간적인 분포 형태에 영향을 받기 때문에, 대상 지반의 수평적, 수직적 수리지질구조를 밝히는 일은 매우 중요하다. 본 연구 대상지구는 롬층과 모래층으로 구성된 약 6 m 깊이의 충적층으로 구성되어 있는데, 1차적으로 체계적인 시추조사를 실시하여 공간별, 심도별로 지반의 특성을 구분하였다. 구분된 토양층을 대상으로 전극간격 1.5 m의 쌍극자배열 전기비저항 탐사의 역산결과와 종합하여 토양층에 대한 개념모델을 구축하였으며, 이에 따라 연구지역 지반의 대표적인 지점별로 침하계를 설치하였다. 이러한 개념모델의 유용성을 검증하기 위하여 지하수 유동모델링과 지반침하 모델링을 수행한 결과와 침하계의 계측자료를 비교한 결과, 개념모델의 정확성이 확인됨에 따라 롬층과 모래층 등으로 구성된 충적층 지반의 경우 hand auger를 이용한 시추조사와 전극간격을 짧게 한 2차원 전기비저항 탐사법의 적용이 유용함을 확인하였다.

감사의 글

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

참고문헌

무안군, 2001, 성남주거지 지반침하지구 정밀안전진단조사 보고서.

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

Archie, G. E. 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristic, *Trans, A.I.H.E.*, **146**, 54-67.

Itasca, 1997, FLAC^{3D} version 2.0 User's manual, Itasca Consulting Group.

Waterloo Hydrogeologic Software, 2000, Visual MODFLOW Version 2.8.2.52, Waterloo Hydrogeologic Inc.

Whittaker, B. N., and Reddish, D. J., 1989, *Subsidence occurrence, prediction and control*, Elsevier.