

## 수막재배 지역 수변 충적층 및 대수층 특성화를 위한 지구물리기법 적용

신재현<sup>1,‡</sup> · 황세호<sup>1</sup> · 김용철<sup>1</sup> · 김종만<sup>2</sup> · 원병호<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부

<sup>2</sup>(주)스마트코리아

### 요 약

수막재배 지역의 문제점으로 대두되고 있는 지하수위 하강 및 고갈 방지를 위해 구축한 인공함양 기술 적용 부지 특성화를 위해 지구물리기법을 적용하였다. 지표 물리탐사를 통해 수변 지역의 기반암 분포 및 퇴적 구조를 파악하고, 다양한 물리검층을 이용하여 지층 특성 및 원위치 물성을 추정하였다. 인공함양을 위해 굴착된 시추공을 대상으로 방사능검층을 이용한 지층의 수직적 특성 및 대수층 파악을 통해 단공 주입-양수정에 대한 주입-양수 구간을 선정하여 실증시설 운영에 있어 효율을 높이고자 하였다. 또한, 수막재배 지역 지하수의 장기적·계절적 변화를 확인하고자 다수의 관측공을 대상으로 물리검층 모니터링을 시행하였다. 지하수의 미세한 특성 변화를 보기 위하여 분해능이 우수한 온도 및 전기전도도검층기를 이용하여 일 년 동안 한 달 간격으로 자료를 취득하여 시간별 지하수위, 온도, 전기전도도의 수직·공간적 변화를 모니터링하였다. 계절별, 수막 가동 전후별 지하수의 특성 변화 및 하천수의 유입에 의한 영향을 주시하였으며, 그 변화 패턴과 지질의 자연감마선 및 중성자검층 반응의 상관성을 고찰하여 연구지역의 충적층 및 대수층의 특성을 평가하였다. 하천변 쪽으로는 보를 기준으로 무심천 상·하류 지역에서 수위, 온도, 전기전도도의 변화가 상이하며 다중심도 관측공의 모니터링을 통해 무심천의 상류가 하천과의 지하수 유동이 활발한 것으로 해석되었다. 수막재배 시스템 주변 관측공에서는 계절에 따라 수위, 온도 및 전기전도도 값 등 지하수 특성 변화폭이 크며 수막재배 후 점차 안정화됨을 보였다. 지구물리기법을 이용한 충적층 및 대수층 특성 파악은 대수층 순환식 수막재배 시설 구축 및 운영에 기여할 것으로 판단된다.

**주요어:** 수막재배, 지구물리기법, 방사능검층, 물리검층 모니터링, 다중심도 관측공

**Jehyun Shin, Seho Hwang, Yongcheol Kim, Jongman Kim and Byeongho Won, 2016, Applications of geophysical approaches to characterize riverside alluvium and porous aquifers to a water curtain cultivation area. Journal of the Geological Society of Korea. v. 52, no. 4, p. 475-491**

**ABSTRACT:** Geophysical techniques are integrated in order to provide the hydrogeological information of an artificial recharge site constructed for controlling groundwater level and preventing from a possible groundwater shortage, especially in a water curtain cultivation area. Spatial subsurface structures are identified by surface geophysical techniques, and also geological features and in situ physical properties are estimated by geophysical well loggings. Single well system for injection and pumping is designed through understanding the vertical characteristics of riverside aquifer by radioactivity logs. In addition, well logging monitoring helps to better understand long-term and seasonal variation of groundwater caused by water curtain cultivation system. High-resolution temperature and electrical conductivity sonde is used for observing even small changes of groundwater so that temporal variation of groundwater level, temperature and electrical conductivity is monitored monthly. Monitoring is mainly focusing on seasonal properties change of groundwater and effects by stream flow, and acquired data are compared and analyzed with the response of natural gamma ray and neutron logs. The groundwater properties are different between the upper region and lower region of Mu-sim stream, and groundwater flow between the upper region and stream is observed by the monitoring of multi-depth boreholes. In a water curtain cultivation area, the variation range of groundwater properties, such as groundwater level, temperature, electrical conductivity, is large in winter season, and this phenomenon seems to be stable after water curtain cultivation. Characterizing the riverside alluvium and porous aquifer with geophysical approaches is expected to improve efficiency of construction and maintenance of aquifer-circulating water curtain cultivation system.

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-42-868-3132, E-mail: [jehyun@kigam.re.kr](mailto:jehyun@kigam.re.kr)

**Key words:** water curtain cultivation, geophysical technique, radioactivity logs, well logging monitoring, multi-depth borehole

(Jehyun Shin, Seho Hwang, Yongcheol Kim and Byeongho Won, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea; Jongman Kim, SMARTKOREA, 187 Daehwa-ro, Daedeok-gu, Daejeon 34369, Republic of Korea)

## 1. 서 론

수막재배 기술은 평균 수온이 15°C 내외인 지하수를 이용하여 동절기에 보온재배하는 방식으로 안정적인 열원을 확보할 수 있는 기술이다. 하지만 최근 고유가에 따른 국내 수변지역에 수막재배 면적이 늘어나면서 층적층 지하수의 이용량이 커져 지하수위 강하로 인한 지하수 고갈 및 하천과 대수층의 물 순환계를 크게 교란시키는 것으로 보고되었다(KIGAM, 2011, 2012). 이에 본 연구에서는 지속가능한 수막재배 기술을 개발하고자 선정된 지하수위 복원 통합시스템 구축을 위한 실증연구지역에 지구물리기법을 이용하여 수변 층적층 및 대수층의 특성을 평가하고자 하였다.

지하수 조사 및 연구 분야에서 지구물리기법은 다양한 목적을 가지고 여러 가지 방법이 적용되어왔다. 물리검층 중 공경검층(caliper logs) 및 시추공영상화검층(borehole image logs) 등은 시추공과 교차하는 파쇄대의 정보를 얻고(Williams and Johnson, 2004), 투수성 지층 파악을 위해 온도, 전기전도도검층(temperature and electrical conductivity logs), 유향-유속검층(borehole flow logs) 등을 이용한다(Cohen, 1995; Paillet, 2001). 특히, 온도, 전기전도도검층은 상대적으로 측정이 간편하고 빠르며 일반적인 지하수질(water quality) 정보를 제공하여 지하수 조사 및 모니터링에 널리 사용된다. 지하수의 온도 변화(temperature anomaly)는 단공(shallow well)에서는 지표수의 침투(Norris and Spieker, 1962; Schneider, 1962), 대수층의 수리 전도도 차이(Keys and Brown, 1978), 케이싱 뒷면의 시멘팅 상태(Keys and MacCary, 1971) 등의 지시자 역할을 한다. 한편, 장공(deep well)의 수직 자료에서 지열구배(geothermal gradient) 및 지층의 열전도도(thermal conductivity)에 따르지 않는 온도 변화는 지하수의 유동 등의 정보를 제공한다(Sorey, 1971; Boyle and Saleem, 1979).

국내 연구 사례로는 전기비저항 수치 모델링과

전기비저항 모니터링을 이용하여 층적층의 지하수위 변동 유무를 감지한 바 있으며(Kim, 1997), 균열 암반 대수층의 지하수 유동을 파악하기 위하여 다양한 물리검층, 특히 유향-유속검층을 통해 수리지질학적 정보를 제공한 바 있다(Kim *et al.*, 2005). 또한 연안지역 해수침투(seawater intrusion) 피해개선을 목적으로 층적층 및 균열암반을 통한 담수주입시험을 수행하고 물리검층, 다채널 전기전도도 모니터링, 전기비저항탐사, 자연전위 모니터링 등 다양한 물리탐사기법을 이용하여 지하수의 전기전도도값 변화를 모니터링하여 주입시험 효과 및 지하수 거동을 확인한 바 있다(Park *et al.*, 2007; Shin and Byun, 2010).

이러한 지구물리기술을 지하수 문제에 적용할 때에는 일반적으로 연구 목적과 그 대상이 층적층인지 암반층인지에 따라 적용되는 기법 및 접근법이 달라지며, 본 연구는 수변 층적층을 대상으로 다양한 지구물리기법을 이용하여 수변 층적층 분포 및 원위치 물성 파악과 대수층 순환식 수막재배 시스템(aquifer-circulating water curtain cultivation system)을 구축하기 위한 주입-양수 위치 결정, 장기 모니터링을 통한 수막재배의 영향 평가 등을 목적으로 두고 있다. 특히, 일반적인 지하수 모니터링은 일정 심도에 지하수 물성(수위, 온도, 전기전도도 등)을 모니터링하거나 직접 유출되는 침출수를 대상으로 하지만, 본 연구에서 실시한 물리검층 모니터링(well logging monitoring)은 전 구간 심도에 대한 지하수의 물성 변화를 모니터링하여 하천과의 지하수 유동 및 계절 양수에 따른 변화를 확인하고자 하였다.

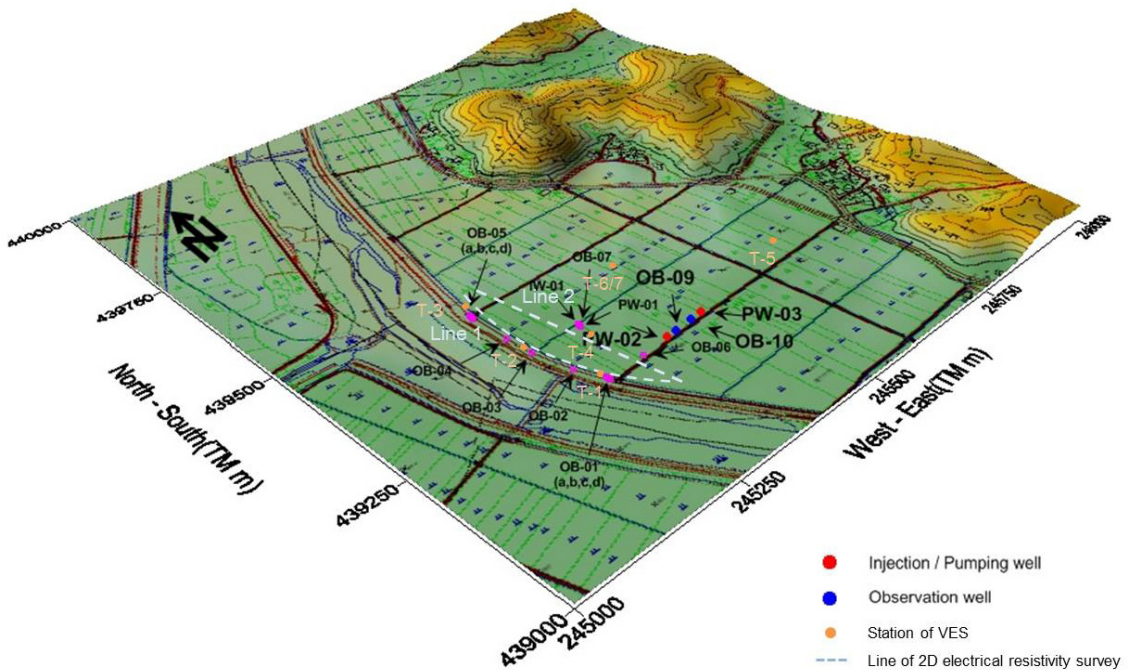
## 2. 연구개요 및 방법

실증연구지역은 충청북도 청원군 가덕면 상대리 일대로 금강권역 미호천 유역에 해당하며, 이 지역은 약 9개동의 비닐하우스에서 수막재배가 이루어지고 있고 주요 재배작물은 딸기이다(Moon *et al.*, 2012).

지형적으로는 동쪽으로 낮은 구릉성 산지가 분포하고 있으며, 서쪽에 무심천이 남에서 북쪽으로 흐르고 있다. 적용된 지표 물리탐사법은 전기비저항탐사(resistivity survey)며, 2차원 전기비저항탐사(2-D electrical resistivity survey)와 수직탐사(vertical electrical sounding, VES)를 통해 연구부지의 총적층 및 기반암 분포를 파악하고자 하였다. 전기비저항탐사의 측선과 측점은 수막재배 비닐하우스와 지형적 영향을 고려하여 400 m 전기비저항탐사 측선 2개와 수직탐사 7개의 측점을 설계하였다(그림 1). 2차원 전기비저항탐사 측선은 제방을 따라 측선 Line 1과 비닐하우스와 무심천 사이에 보조 측선 Line 2를 설정하였고, 2차원 전기비저항탐사의 수직적인 분해능 한계를 보완하기 위하여 수직탐사 측점들을 Line 1의 위치에 100 m 간격으로 3점(T-1, 2, 3), 연구지역의 기반암 분포 및 전기비저항탐사의 방향성 비교를 위해 나머지 수직탐사 측점들을 위치하였다(T-4, 5, 6, 7). 2차원 전기비저항탐사의 전극배열은 보편적으로 사용되는 쌍극자 배열(dipole-dipole array)과 쌍극자 배열에 비해 분해능은 약하나 신호 대

잡음비(S/N 비; signal to noise ratio)가 좋은 변형 단극 배열(modified pole-pole array)을 사용하였다. 자료 취득은 AGI사의 Supersting R8을 이용해 각각 5 m, 10 m, 15 m 간격으로 수행하였으며 Dipro 4.0 (Kim, 2001)으로 자료처리를 수행하였다. 또한, 수직탐사에서는 슬립버저 배열(schlumberger array)을 사용하여 AGI사의 Ministing을 이용해 자료를 취득 후, SoundPro (Kim, 1996)로 자료처리를 수행하였다.

본 실증부지에는 지하수 주입, 양수 및 관측을 위해 총 20개의 시추공이 굴착되었으며, 주입·양수를 위한 직경 150 mm 시추공(PW공) 4개와 76 mm 관측정(OB공) 16개에 시추공 붕락 방지를 위한 PVC 케이싱이 삽입되었다(그림 1). 관측정 OB1 ~ 5는 제내지와 제방의 경계를 따라 위치해 있으며 특히 OB1 호공과 OB5호공은 다중심도 시추공(multi-depth borehole)으로 50 cm 간격으로 각각 4개의 시추공이 시추심도를 달리하여 굴착되어 있다(5, 10, 20, 30 m). 이 시추공을 대상으로 실시한 물리검층은 온도, 전기전도도검층과 방사능검층인 자연감마선(natural



**Fig. 1.** Lines and stations of resistivity survey (2D electrical resistivity survey and vertical electrical sounding) and locations of injection, pumping and observation well in a water curtain cultivation area, Chungwon, Chungbuk, Korea.



gamma ray), 중성자(neutron), 밀도(density)검층이며 각 검층 속도(logging speed) 및 자료 취득 간격(sampling space)은 분해능 높은 자료를 얻고자 2

m/min 이내와 1 cm로 설정하였다. 자료 취득 시 검층 종류 및 속도, 간격은 시추공 환경에 따라 일부 조정하였으며 모든 검층로그는 심도 보정, 자료 편집(data

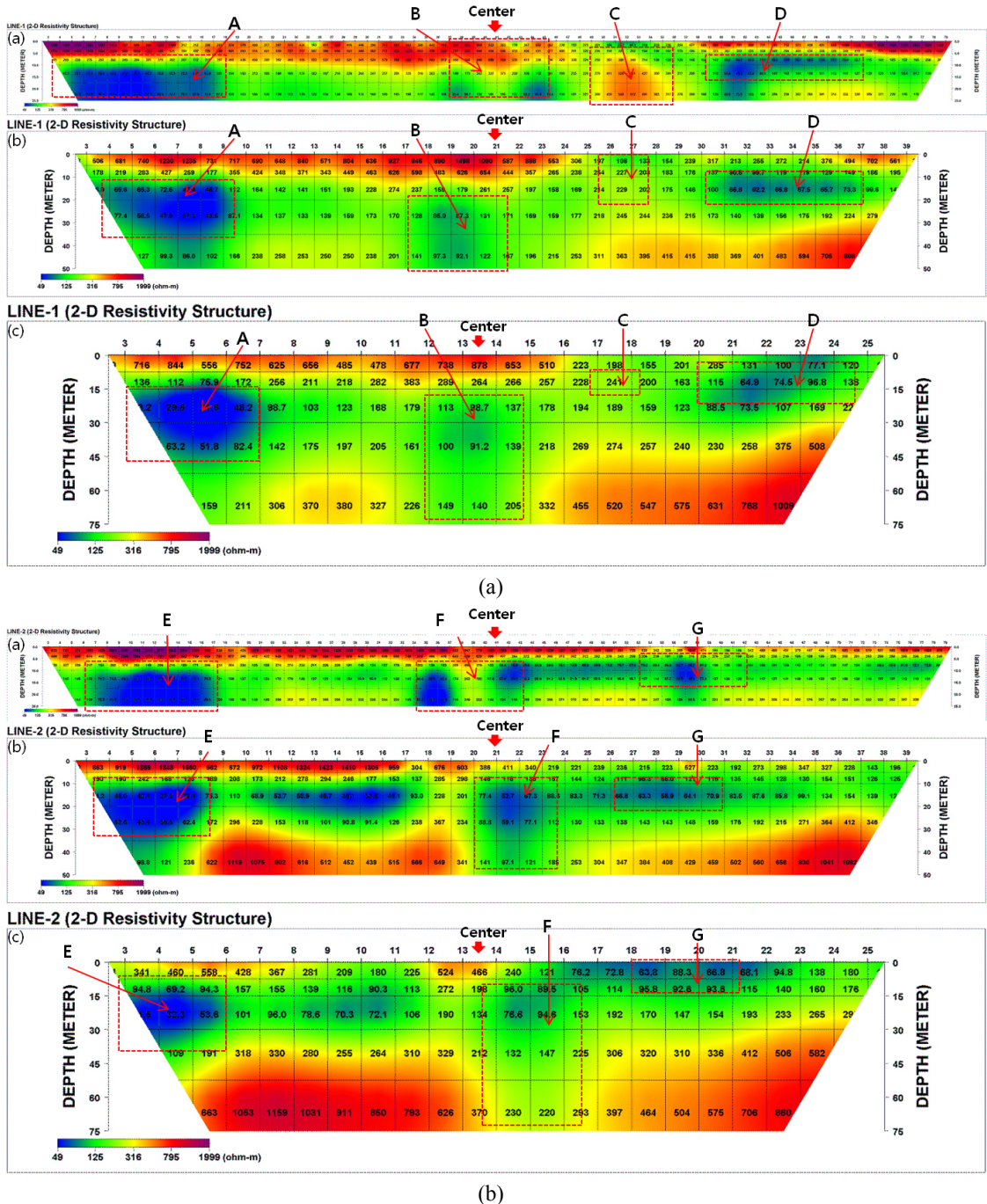


Fig. 2. Imaging the distribution of subsurface structures from the inversion results of 2D electrical resistivity data in Line 1 (a) and Line 2 (b). Arrows on the sections indicate the resistivity anomaly.

compiling) 및 이동평균법(moving average method)을 이용한 필터링을 실시하였으며 자료 기록 및 처리는 Theys(1991)의 방법을 참고하였다.

물리검층 모니터링 대상 시추공은 무심천변 관측정 OB1 (5, 10, 20, 30 m), OB2, OB3, OB4, OB5 (5, 10, 20, 30 m)와 비닐하우스 주변 관측정인 OB9와 OB10호공 총 13개이다. 모니터링 기간은 2015년 1월부터 12월까지 한 달 간격이며, 측정 파라미터는 수위, 온도, 전기전도도이다. 이용된 물리검층 장비는 Mount Sopris사의 온도, 전기전도도검층기(2IDA-

1000 probe)와 200 m 미니윈치(mini winch), 본체(MGX-II)이다. 2IDA-1000 검층기는 길이 670 mm, 직경 43 mm, 측정 범위는 압력 0 ~ 1000 dbar, 온도 0 ~ 50°C, 전기전도도 freshwater mode (0 ~ 6400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 및 saltwater mode (0 ~ 64 mS/cm)이다. 본 존데(sonde)는 직경이 작아 내경 50 mm인 관측공 물리검층이 가능하며 분해능(resolution)이 우수하기 때문에(온도: 0.004°C, 전기전도도: 0.04  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 연구지역의 미세한 지하수 특성 변화 모니터링에 적합하고 지하수의 전기전도도가 높지 않기 때문에 측

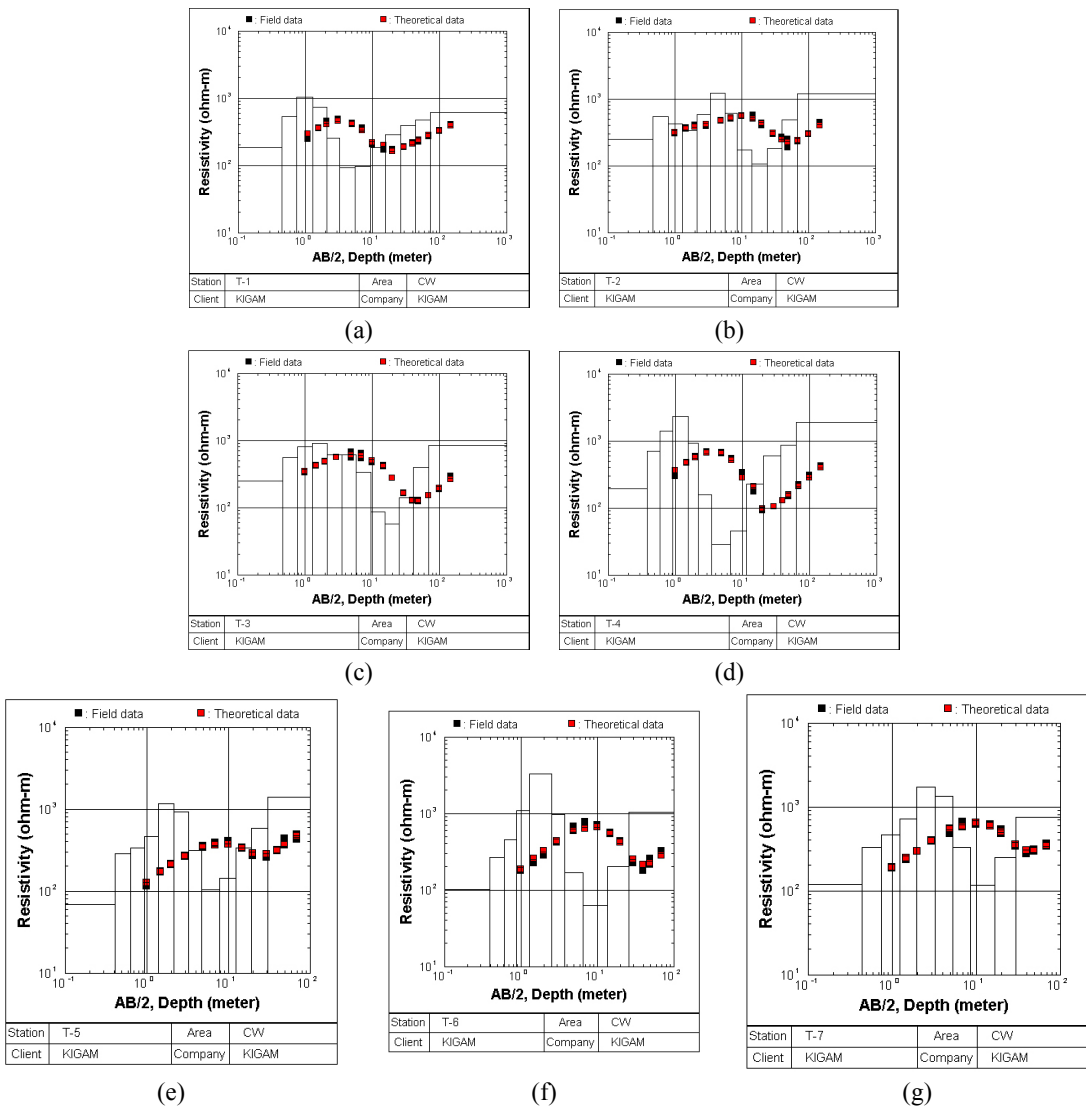


Fig. 3. Inversion results of vertical electrical sounding at the station T-1 (a), T-2 (b), T-3 (c), T-4 (d), T-5 (e), T-6 (f) and T-7 (g).

정 모드는 freshwater mode를 이용하였다. 모니터링 당시 시추공 파손 및 막힘 등 환경적 조건으로 인해 일부 자료는 취득하지 못하였다.

3. 연구결과

3.1 지층의 분포, 특성 및 원위치 물성 파악

2차원 전기비저항탐사 결과, 쌍극자 배열은 중앙을 가로지르는 콘크리트 배수로(drainage)와 그 주변 매립된 물체들로 인한 왜곡된 비저항 값들이 취득되었으나, 신호 대 잡음비가 좋은 변형 단극 배열에서 비교적 양호한 자료가 취득되었다. 그림 2a와 2b는 Line 1, Line 2에 대한 변형 단극 배열의 전기비저항탐사 자료 역산 결과이며, 각 단면은 전극간격 5 m, 10 m, 15 m의 결과이다. 전체적인 비저항 변화 양상은 심도가 깊어짐에 따라 고비저항대-저비저항대-고비저항대의 3개의 비저항 층으로 구분되며 하단의 고비저항층으로 파악되는 기반암의 분포는 남쪽에서 북쪽 방향으로 심도가 깊어지는 양상을 보인다. A와 E는 연구지역의 북쪽으로 지하 층적층에서 5 m 간격, 10 m 간격, 15 m 간격 역산 결과 모두에서 공통적으로 저비저항대를 보이고 있다. 중앙인 B와 F영역은 최근 배수로 공사가 끝난 지점으로서 지표에 매우 큰 비저항을 보이며 이상체로 인한 왜곡

된 정보로 판단된다. C의 경우 5 m 간격의 측선에서는 매우 큰 영향을 받았으나 간격이 넓어질수록 그 영향이 줄어드는 것을 통해 제방과 맞닿아 위치한 하천 보의 외각 콘크리트에 의한 영향으로 사료된다. D영역의 저비저항대는 북쪽 측선에 비해 지표면 근처에 위치한 것으로 보아 하천 보의 영향으로 지하수위가 상승하여 있는 것으로 판단된다. Line 2의 기반암의 분포 또한 Line 1의 기반암의 분포양상과 동일하게 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 기반암의 심도가 깊어지는 양상을 보이며 전체적인 기반암의 심도가 Line 1보다 지표에 가까운 것을 통해 동쪽에서 서쪽방향으로 전체적인 기반암의 심도 또한 깊어지는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 연구지의 층적층은 남동에서 서북으로의 두터워 지는 것으로 파악된다.

슬림버저 배열을 이용하여 취득한 수직탐사를 통해 얻은 전위값을 SoundPro를 이용해 역산한 결과는 그림 3과 같다. 역산 결과, 지표에서 지하 약 2 m 까지 비저항 값이 상승한 후에 다시 비저항 값이 감소하는 패턴을 보이고 있다. 이는 지하 약 1.5 ~ 2.5 m 사이에 위치하는 지하수면의 영향으로 판단되며 공극률의 증가와 함께 증가하던 비저항이 지하수면 아래에서 공극에 채워진 저비저항을 가지는 지하수의 영향으로 비저항이 감소할 것으로 예측된다. 감소하던 비저항은 큰 공극률을 가질 것으로 예측되는

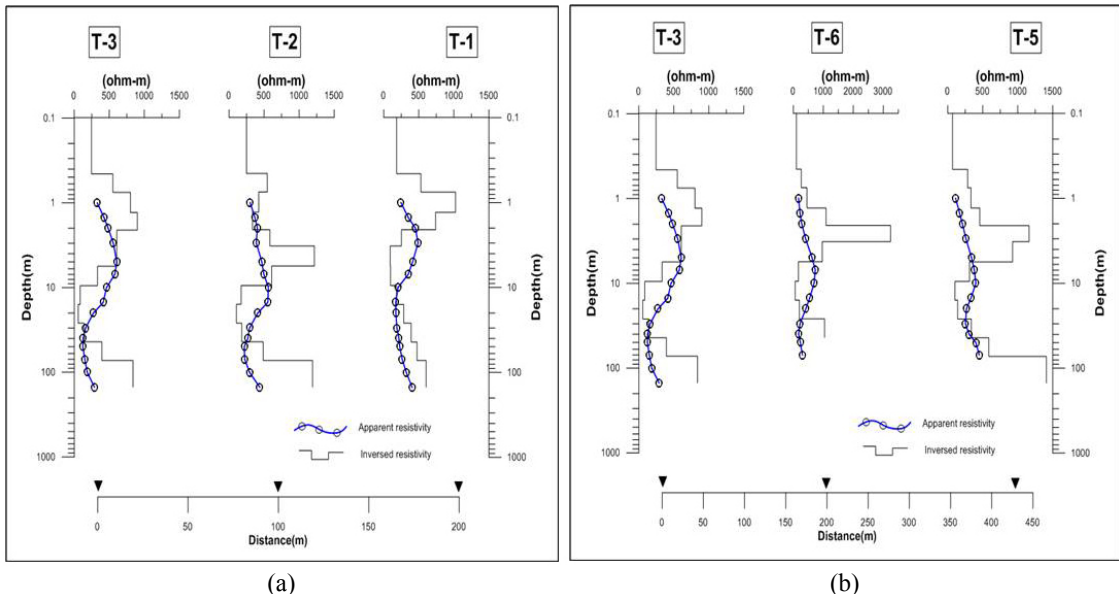


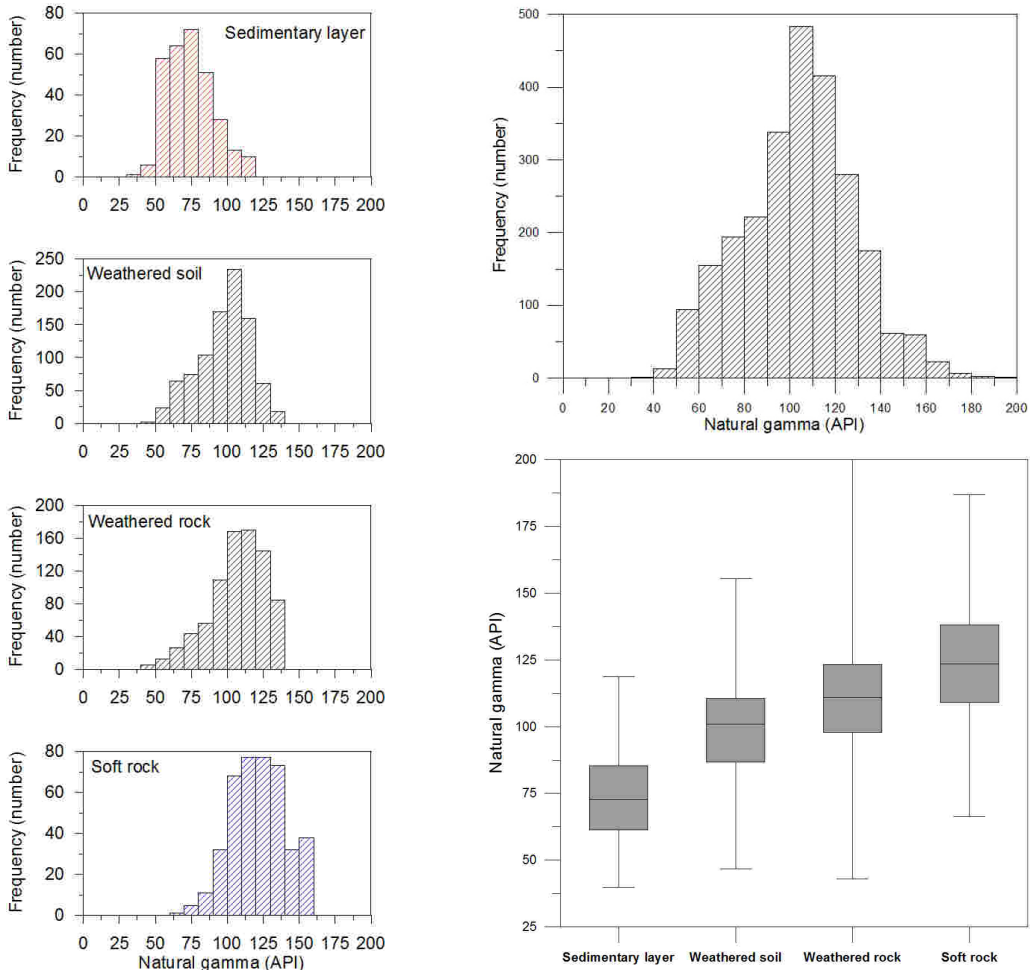
Fig. 4. Apparent and inverted resistivity profiles at the riverside area (a) and the inland area (b).

풍화토에서 가장 작은 비저항값을 가지며 풍화대에서 다시 비저항이 상승하여 기반암에서 심도가 깊어질수록 더욱 큰 비저항값을 갖게 된다. 그림 4a는 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 T-3으로부터 남쪽으로 100 m 떨어진 T-2와 T-2로부터 100 m 남쪽에 위

치한 T-1의 심도에 따른 겉보기비저항과 역산된 비저항 결과이다. 지표근처의 토양층에서 고비저항을 가지고 지하 심부로 내려 갈수록 비저항은 줄어들며 다시 기반암 부근에서 비저항이 심도가 깊어짐에 따라 상승하는 곡선을 보이고 있다. T-3과 T-2에서 약

**Table 1.** In situ physical properties estimated by geophysical well loggings.

Lithology	Natural gamma ray (API)	Neutron porosity (LPU)
	Mean (min.-max.)	Mean (min.-max.)
Sedimentary layer	74.13 (39.92-118.77)	18.20 (2.89-50.59)
Weathered soil	97.81 (45.81-155.34)	35.50 (17.67-64.70)
Weathered rock	116.625 (42.93-199.93)	24.87 (12.27-70.82)
Soft rock	127.35 (66.43-185.78)	13.47 (7.34-28.27)



**Fig. 5.** Statistical analysis of the natural gamma ray logs including a histogram of the natural gamma radiation of the each stratum unit: sedimentary layer, weathered soil, weathered rock and soft rock.



40 m, T-1에서 약 15 m의 기반암 분포를 통해 북쪽 방향으로 기반암의 심도가 깊어짐을 예측할 수 있다. 그림 4b는 T-3에서 남동 방향으로 200 m에 위치한 T-6와 T-6에서 남동 방향으로 230 m에 위치한 T-5의 심도에 따른 겉보기 비저항과 역산된 비저항 결과이다. T-3, T-6, T-5의 위치에서 각각 40 m, 25 m, 25 m의 기반암의 분포가 예측되고 이를 통해 기반암의 심도가 남동 방향에서 북서방향으로 깊어지고 있음을 판단할 수 있다. 이 해석된 층층의 분포는 2차원 전기비저항탐사 결과와도 잘 일치하고 있다.

각 지층의 특성 및 원위지물성 파악을 위하여 관측정 및 주입, 양수정에 다양한 물리검층을 실시하였다. 지층으로부터 발생하는 우라늄(U), 토륨(Th), 포타슘( $K^{40}$ )의 총량을 측정하는 자연감마선검층은 일반적으로 많은 검층기에 부착되어 측정이 가능하지만 본 연구에서는 시추공의 내경 및 심도를 고려하여 소구경의 자연감마만 측정하는 존데(2PGA, 길이 78 cm, Mountsopris)를 사용하였다. 연구지역의 시추코어를 바탕으로 지층을 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암으로 분류하고 각각의 자연감마선의 세기를 측정하였다. 물리검층 자료와 코어로그를 토대로 각 자료의 심도를 보정하고 각 지층별 자연감마치를 그룹핑하여 대푯값을 산출하고자 하였다. 신뢰성 있는 자료해석을 위해 큰 구경의 주입정 및 양수정과 얇은 층(thin layers)의 자연감마자료는 배제하였고 각 자료에는 이동평균필터가 적용되었다. 자연감마로그 분석 결과, 퇴적층에서 평균 약 75 API의 작은 자연감마세기(gamma intensity)를 보였고 풍화토와 풍화암은 90 ~ 116 API를 연암에서 가장 큰 수치인 약 130 API의 반응치를 보였다. 연구지역의 풍화토와 풍화암에서의 자연감마치는 비슷하지만 반면 퇴적층과 연암의 자연감마치에는 차이가 있어 각 시추공의 자연감마선검층 자료로부터 지층 구분이 가능하였다(그림 5).

중성자검층은 관측정에는 1Ci Am-Be의 방사능 선원을 이용하여 지층 내에 공극을 채우고 있는 수소원자와의 반응으로부터 공극률을 측정하는 소구경 용 Mountsopris의 검층기(LLP)를 이용하였으며, 양수정에는 3Ci Am-Be을 이용하여 두 개의 검출기에서 각 반응을 측정하는 Robertson geologging의 DNNS (dual neutron sonde)을 이용하여 각 반응을 비교하였다. 각 중성자검층의 계수율로부터 보정 차트와 보정식을 이용하여 석회암 공극률(limestone

porosity unit, LPU)로 환산하였다. 중성자 공극률은 5 ~ 50 LPU의 범위를 보이며 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암 등 지층의 특성에 따라 다른 값을 가졌다. 물리검층으로 측정된 원위지 물성(in situ physical properties)은 표 1과 같다. 연구지역의 각 위치에 대한 대표 관측정(제방 쪽 남쪽 OB1, 북쪽 OB5, 비닐하우스 옆 주입정과 양수정 사이 OB7)을 대상으로 실시한 중성자검층 및 자연감마선검층 결과는 그림 6과 같다. 각 시추공의 심도가 다르기는 하지만 중성자 및 자연감마 반응 패턴을 통해 각 로그의 지층을 4개로 구분(Zone 1 ~ 4)하였다. 각 Zone의 대표치는 본 연구지역의 코아로그로 인한 4가지 지층으로 표현되며 중성자와 자연감마 반응의 좋은 상관성을 보여준다. 세 개의 시추공의 물리검층 반응이 각 지역의 대표치라고 가정한다면, 연구지역의 남단부(OB1)는 연암의 깊이가 깊지 않고, 대수층 역할을 할 수 있는 공극률이 높은 Zone 2도 다른 두 지역인 북쪽(OB5)과 제내지(OB7)와 비교하여 두께가 얇게 형성되어 있는 것으로 심도별 공간별 분포를 확인하였다.

### 3.2 단공 주입-양수정의 주입, 양수 구간 설정

본 지역 수막재배에서 사용된 지하수는 하우스 북쪽에 위치한 콘크리트 배수로를 통해 모아져 무심천 하류로 방출된다. 지하수위 복원 통합시스템에는 단공 주입-양수 방식을 채택하였다. 단공주입방식은 하나의 관정에 주입과 양수를 함께 하는 방식으로 분리 주입방식에 비하여 관정 설치비용 절감, 주입-양수량 증가, 취수시설 비용 절감, 현장 적용성 용이, 운영-관리가 편리한 장점을 가지고 있다(Song *et al.*, 2014). 단공 주입-양수 방식의 구조는 주입 심도와 양수 심도를 최대한 멀리하여 온도 회복 시간을 줄일 수 있게 해야 한다. 이에, 물리검층을 이용하여 실증 지역에 단공 주입-양수공을 선택하고 주입, 양수 구간을 선정하였다. 그림 7은 PW2와 PW3호공에 대한 중성자, 자연감마선, 온도, 전기전도도검층을 나타낸다.

두 개의 관측정과 두 개의 주입-양수정은 근접해 있음에도 불구하고 각각 상이한 물리검층 반응을 보인다. 중성자 및 자연감마 반응 패턴을 통해 각 로그의 지층을 6개로 구역화하였다. 각 Zone의 대표치는 관측정 OB9와 OB10의 코아로그로 인한 6가지 지층(매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암, 연암층, 경암층)으로 표현된다. 중성자와 자연감마 반응은 좋은



상관성을 보여주며, 방사능검층을 이용한 구역화는 코아로그로 해석된 지층의 심도별 분포와는 약간의 차이가 있다. 풍화토(Zone 3)의 하부 심도가 약 2 m 정도 깊은 것으로 추정되어 풍화암(Zone 4)의 두께

가 상대적으로 얇게 분포한 것으로 해석된다. PW2 호공은 심도 약 38 m에서 경암층(Zone 6)이 PW3 호공은 심도 약 35 m부터 경암층이 분포한다. 두 시추공의 중성자검층으로 추정된 공극률의 분포는 PW3

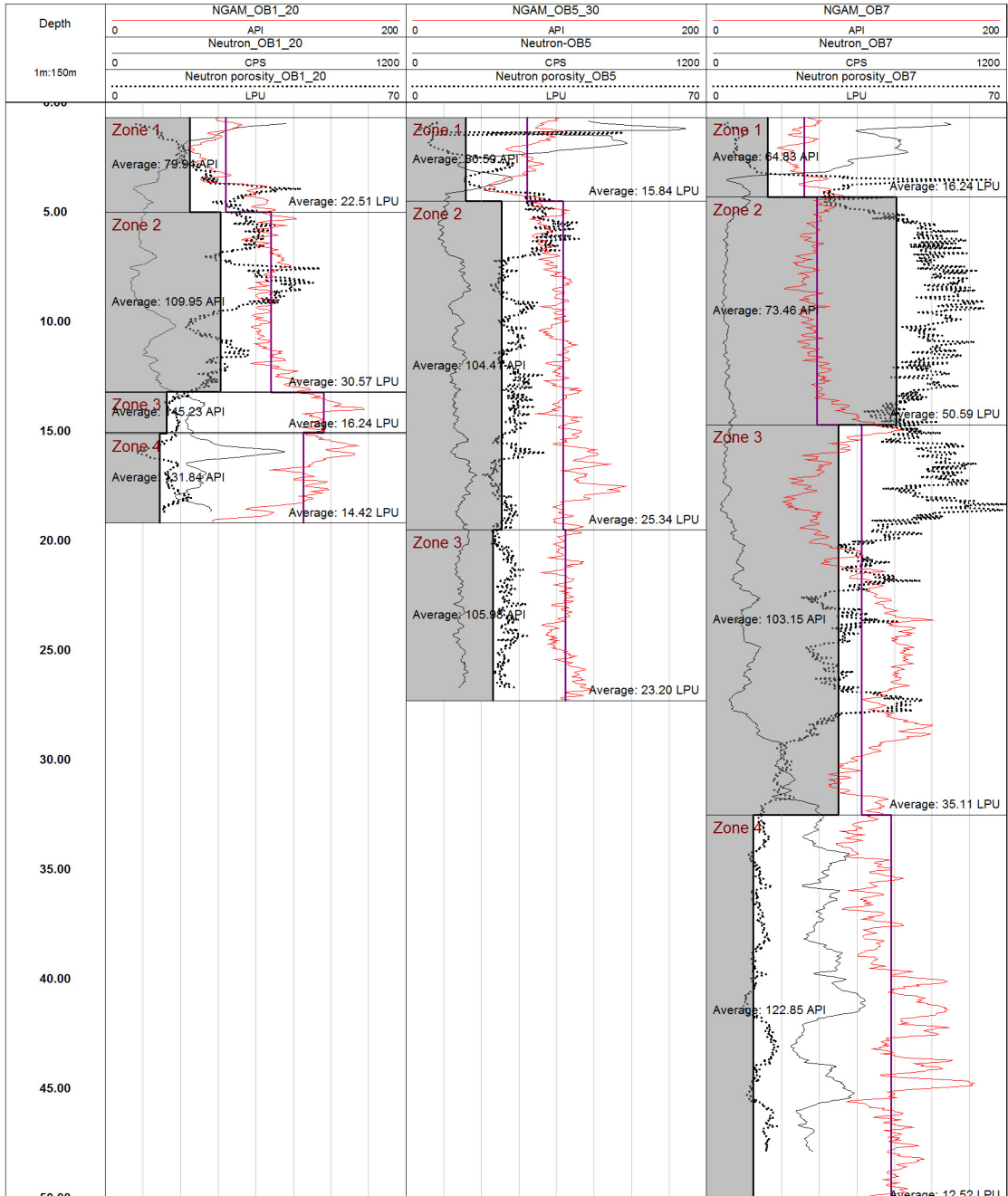


Fig. 6. Natural gamma ray and neutron logs profiles in the observation boreholes OB1, OB5 and OB7.

호공이 2호공보다 전체적으로 공극률이 크며, PW3 호공에 큰 공극률(평균 31.73 LPU)과 낮은 밀도(평균 1.6 g/cm<sup>3</sup>)를 가진 풍화토(Zone 3)가 심도 4 ~ 18 m까지 두텁게 형성되어 있다. 특히, 이 구간은 두 시추공의 Zone 3의 온도, 전기전도도검층 자료를 비교해 보면 PW3호공에서 온도와 전기전도도 변화가 큰 것으로 보아 지하수의 유입이 큼을 보여준다. 또한 연압과 경암층도 PW3호공에서 큰 공극률을 보이며, 특히 Zone 6의 심도 40.7 ~ 43.7 m의 3 m 구간에서 30 LPU이상의 큰 공극률과 낮은 밀도를 가진 구간이 존재한다. 즉, 이 두 구간은 공극률이 크

고 밀도가 낮아 대수층 역할을 할 수 있을 것으로 판단되어 지하수 복원 통합시스템을 위한 단공 주입-양수 시에 주입과 양수를 위한 구간으로 선정하였다. PW3호공의 Zone 3 (심도 4 ~ 18 m)을 양수 심도로 Zone 6의 심도 40.7 ~ 43.7 m를 주입심도로 활용한다면 실증시설 운영에 있어 효율 높은 인공함양이 가능할 것으로 판단된다.

### 3.3 물리검층 모니터링을 이용한 장기 지하수 변화 분석

모니터링 대상 시추공 월별 지하수위와 청주지역

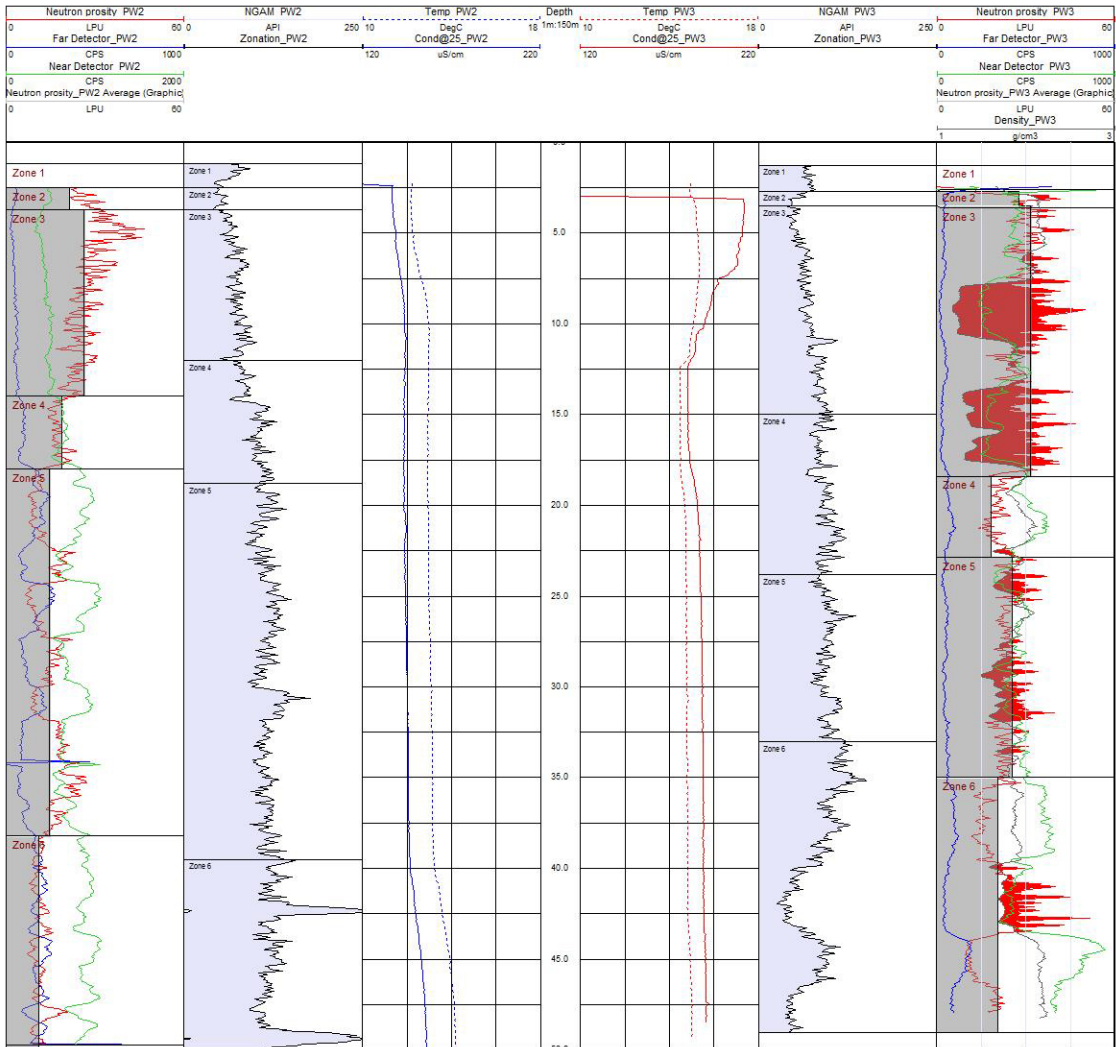
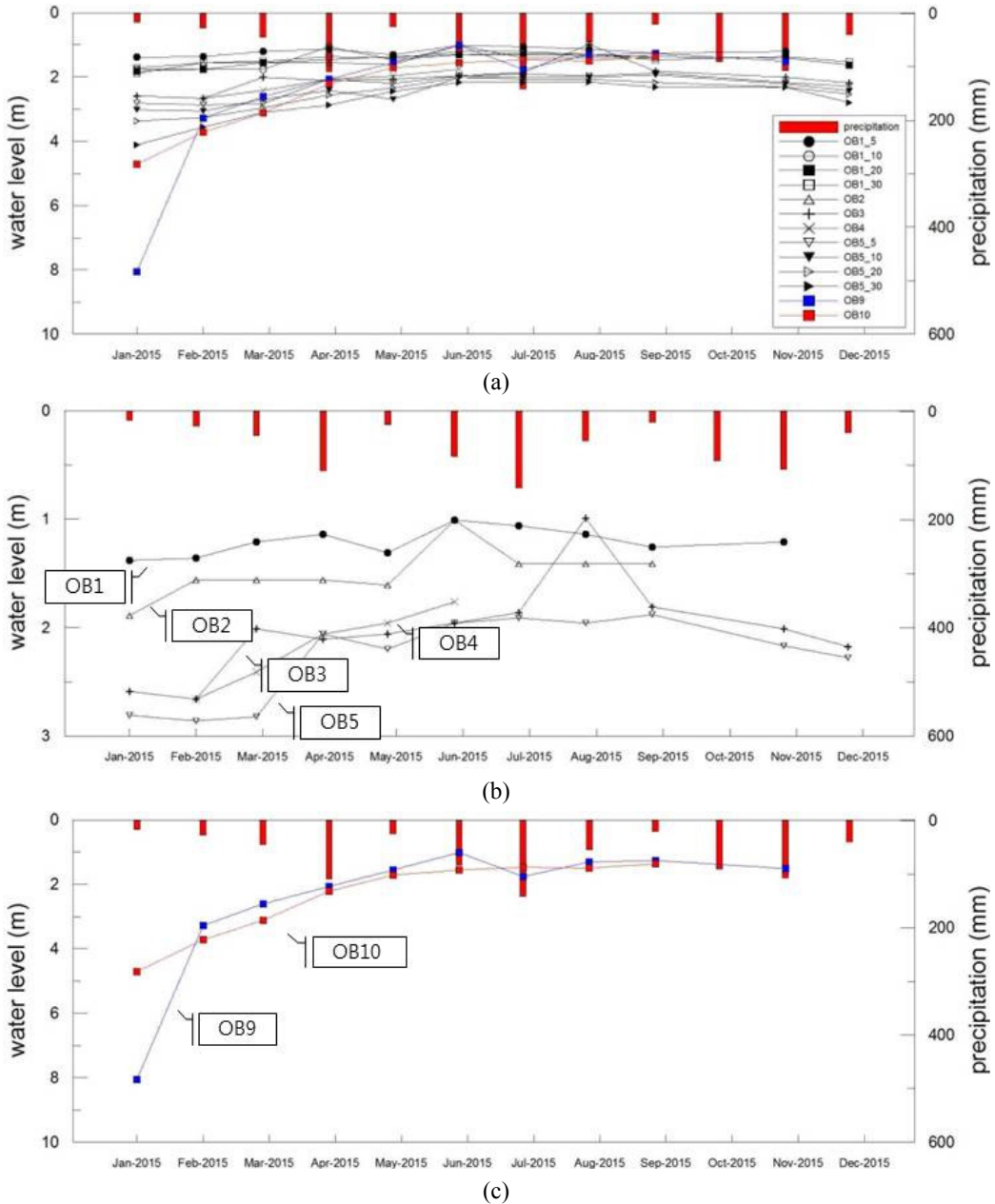


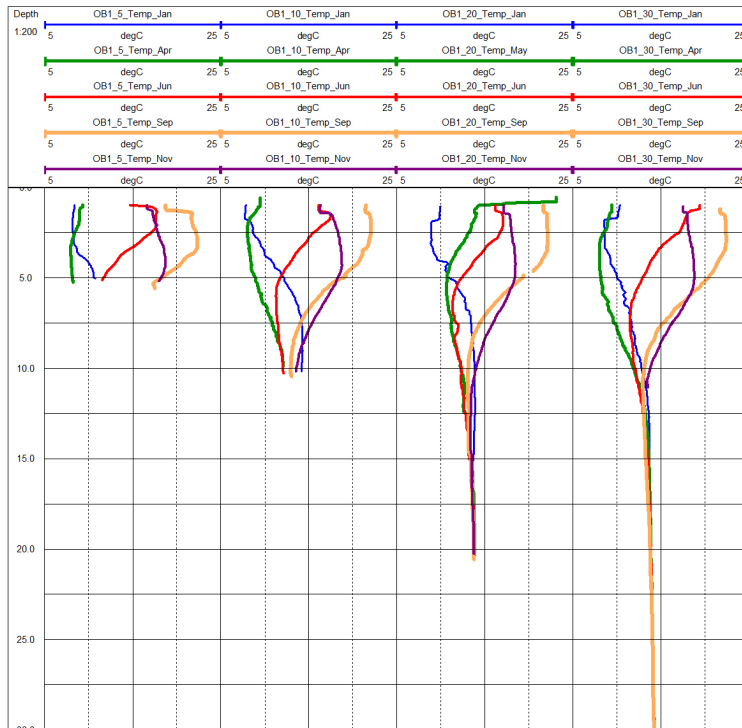
Fig. 7. Geophysical well logging for single well system design: neutron logs, natural gamma ray logs, temperature and electrical conductivity logs in the pumping boreholes PW2 and PW3.

의 월별 총 강수량(청주 기상대)은 그림 8과 같다. 총 강수량은 적색의 바(bar)로 표시하였으며, 강수량이 100 mm 이상인 4, 7, 11월에는 수위가 전체적으로 많이 상승되어 있는 것을 알 수 있다. 수막재배를 실시하는 겨울철에는 전체적으로 수위가 많이 떨어져 있으며, 특히 수막재배가 본격적인 1월에 가장 낮은

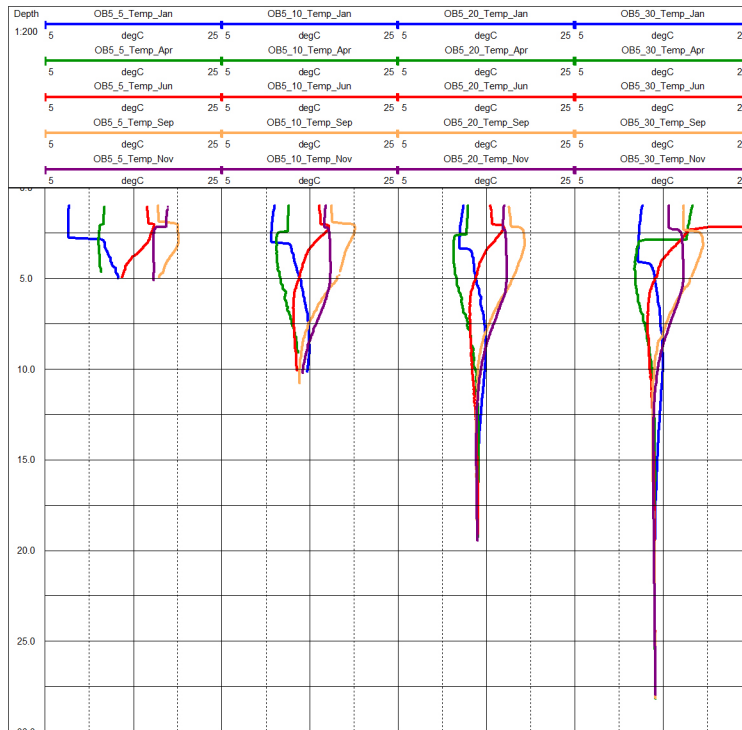
수위를 기록했다(그림 8a). 연구지역의 최 남단부와 북단부에 위치한 다중심도 시추공 OB1과 OB5호공의 전체 수위 모니터링 자료를 비교해보면 각 다중심도 시추공은 불과 50 cm 떨어져 있음에도 불구하고 다른 수위를 나타내고 있다. 최대 수위차는 1월에 OB5호공의 5 m 시추공과 30 m 시추공의 1.3 m 이



**Fig. 8.** Monthly variation of groundwater level and precipitation for monitoring boreholes: (a) monitoring results of the total boreholes, (b) riverside boreholes and (c) water curtain cultivation area.



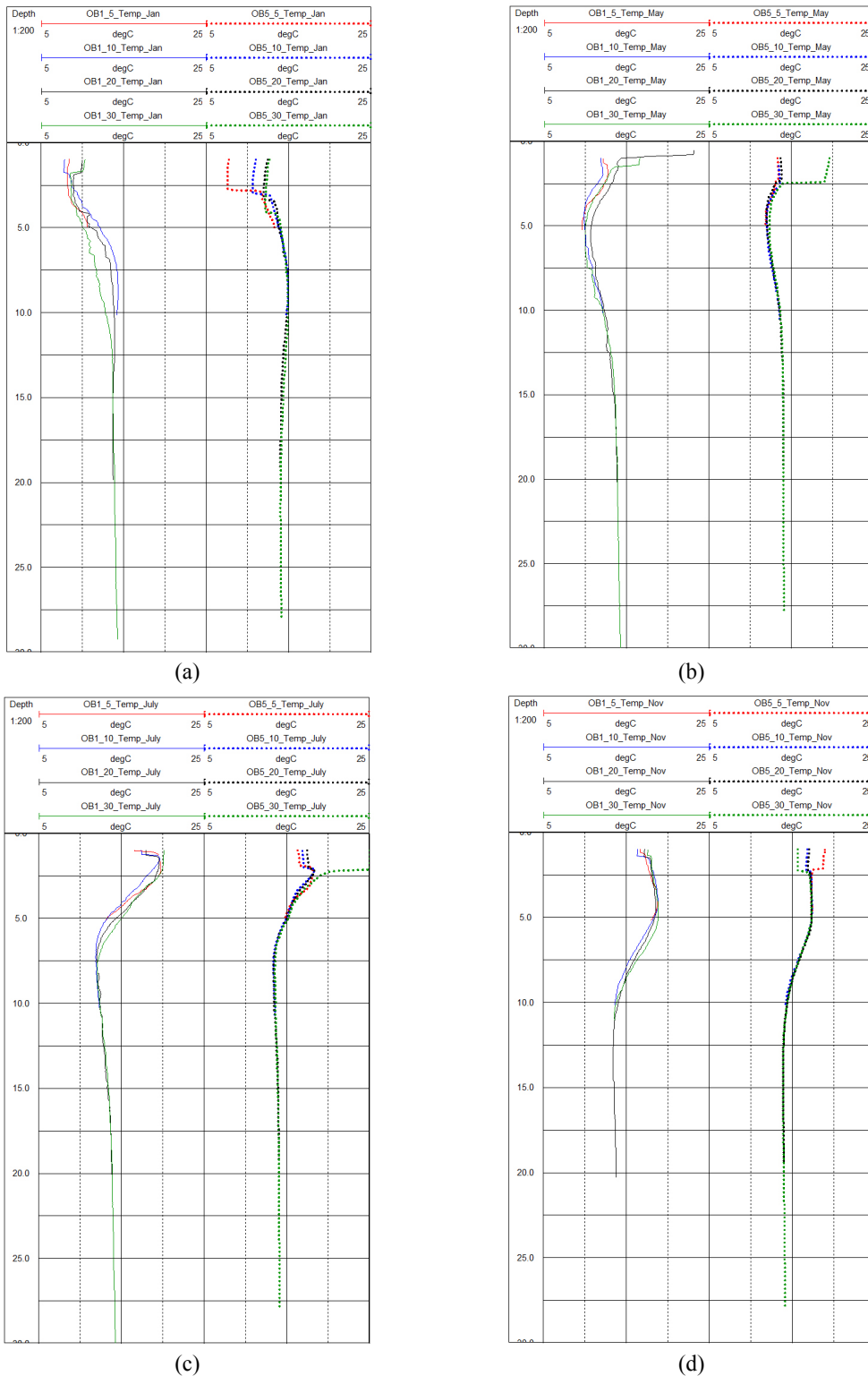
(a)



(b)

Fig. 9. Temperature monitoring of multi-depth boreholes, OB1 (a) and OB5 (b).





**Fig. 10.** Vertical temperature profiles of multi-depth boreholes OB1 and OB5: (a) January, (b) May, (c) July and (d) November.

다. 이는 시추심도에 따라 수위가 다르게 나타날 수 있음을 시사하며, 각 위치에서의 수위차는 특히 12월부터 3, 4월 수막재배 기간 동안 크게 나타난다. 무심천변의 시추공에 대한 수위 자료를 보면 OB1호공과 OB2호공은 OB3, 4, 5호공과 비교해 지하수위가 상부에 형성되어 있고 이는 무심천에 OB2호공과 OB3호공 사이에 위치한 하천 보를 경계로 수위가 다르게 형성되어 있는 기존의 조사와 같은 결과를 나타내었다. 전체적인 수위는 남단부인 OB1호공부터 북쪽으로 갈수록 깊게 형성되어 있음이 확인되었다(그림 8b). 수막재배 비닐하우스 인근 역시 1월에 수위가 많이 떨어졌다가 점점 회복하는 양상을 보이며, 특히 OB9호공은 1월 최저 수위인 약 8 m를 기록

하였다. 전체적으로 하절기에는 수위가 천변 수위와 비슷하게 형성되어 있다가 수막재배 기간에 많은 수위 하강을 보였다(그림 8c).

다중심도 관측공에 대한 심도별 온도 프로파일을 계절별로 그림 9에 나타내었다. OB1과 OB5의 다중심도 관측공에 대한 1월, 4월, 6월, 9월, 11월의 온도 모니터링 결과를 보면 온도는 상부 15 m 이내에서 7 ~ 23°C 범위에서 많은 변화를 보이며, 얇은 심도공의 경우는 계절별로 지하수의 불안정(unstable)성을 띄며 4월 모니터링 자료처럼 지열구배를 따르지 않는 즉, 심도에 따라 온도가 감소하는 현상을 보인다. 또한 두 위치의 시추공 모두, 충전층에서의 지하수의 온도가 9월, 11월, 6월, 1월, 4월의 순서로 높음이

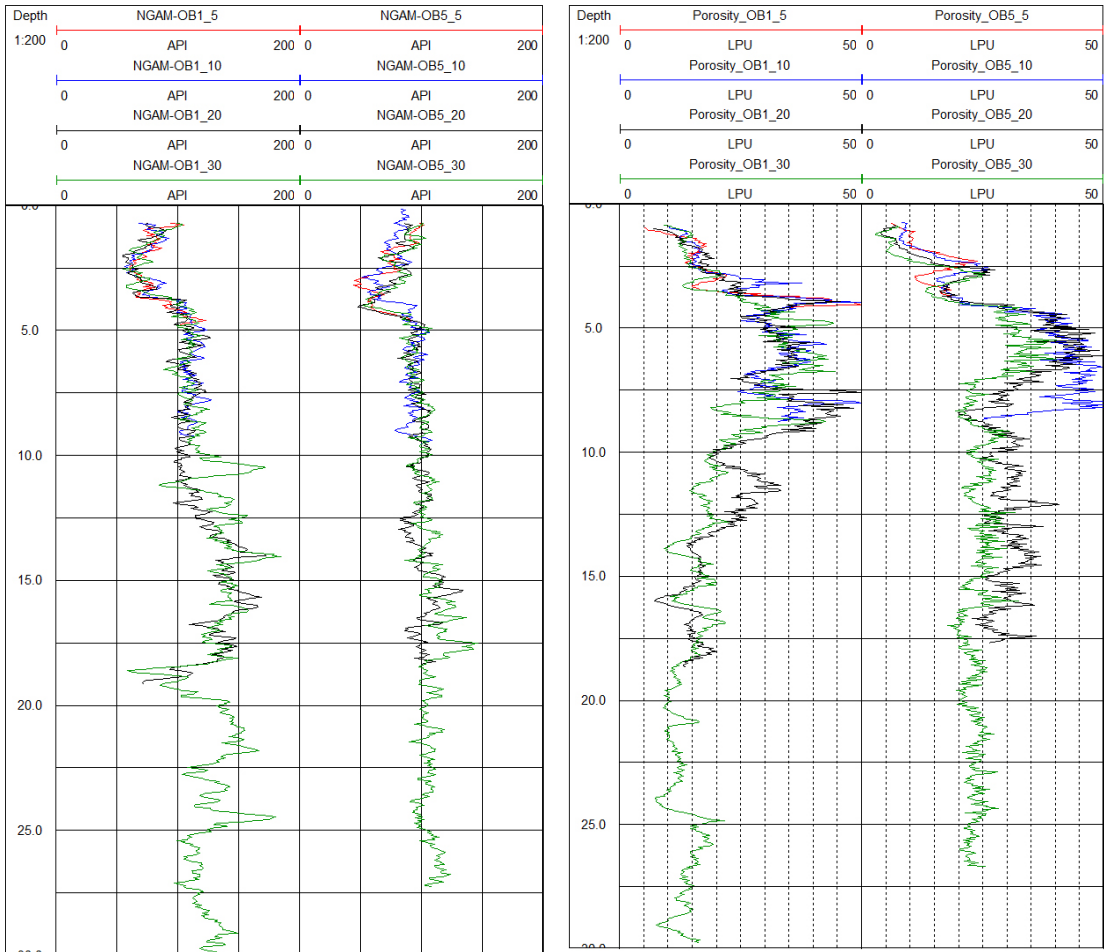


Fig. 11. Radioactivity logs for multi-depth boreholes OB1 and OB5: (a) natural gamma ray logs and (b) neutron logs.

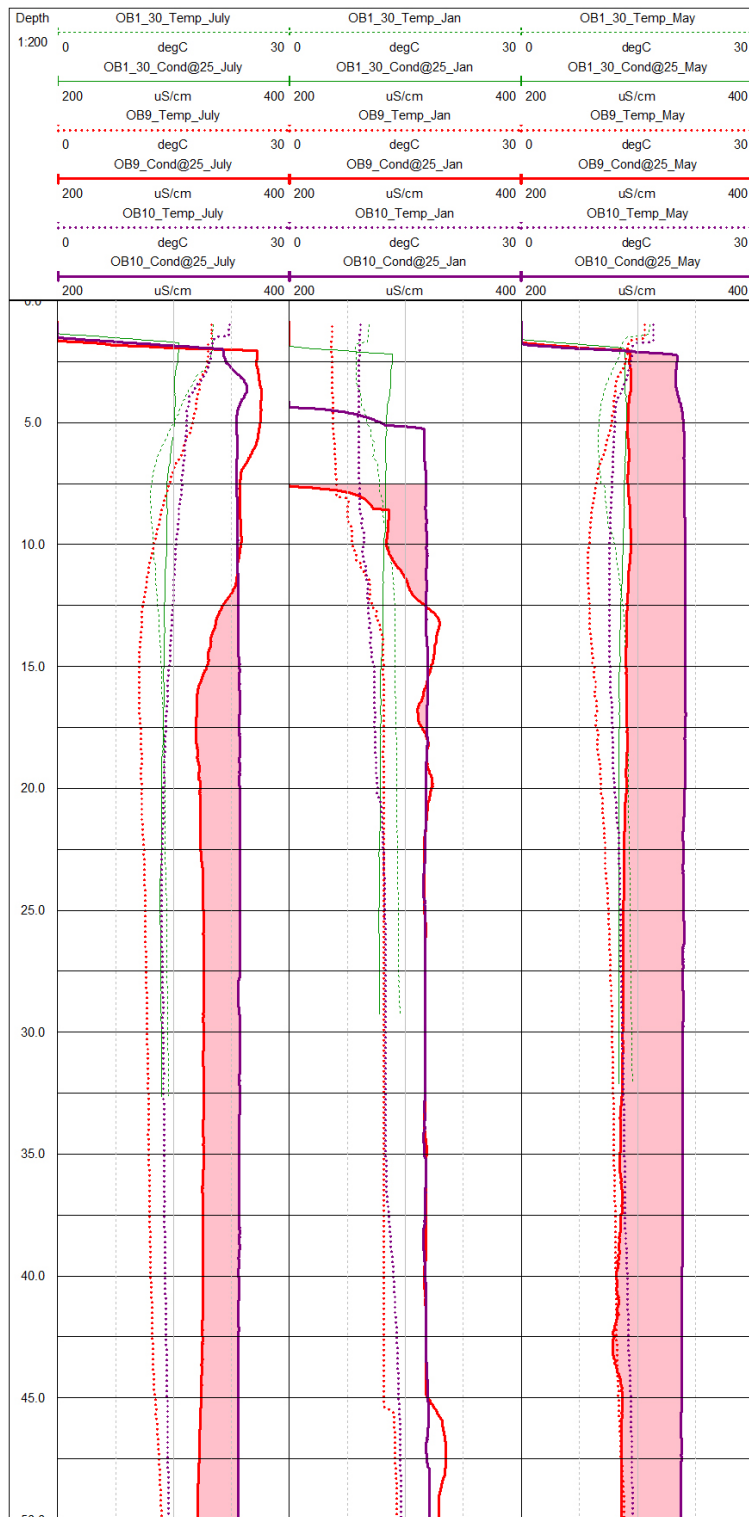


Fig. 12. Comparison between water curtain cultivation season and summer season based on monitoring results of riversides (OB1) and water curtain cultivation area (OB9 and OB10).

확인되었다. 즉, 온도가 3개월 정도 지연되어 보존된다는 것을 알 수 있다. 전체적인 온도 변화의 패턴은 보를 기준으로 상이하다. 즉 무심천의 상류(OB1)는 계절별 많은 온도 변화를 보이는 반면, 하류 지역(OB5)은 상대적으로 적은 온도 변화를 보인다. 동일 시간과 심도를 기준으로 북쪽으로 갈수록 높은 지하수 온도를 나타내었다. 이 두 지역의 다중심도 관측공에 대하여 같은 시기의 온도 수직 프로파일 결과를 분석하면 그림 10과 같다. 그림 10은 1월, 5월, 7월, 11월의 온도검층 결과로 무심천 하류인 OB5호공의 경우 같은 심도에서 같은 온도값을 보이지만 상류에 위치한 OB1호공은 심도 15 m까지 분포한 층적층에서의 온도 차이가 존재한다. 이에, 상이한 결과를 보이는 두 지역 다중심도 시추공에 대한 방사능검층을 적용하였다. 그림 11a는 두 시추공에 대한 자연감마선검층 결과이다. 대상 심도에서의 자연감마치는 표 1에서 풍화토와 풍화암의 원위치 물질값과 같이 약 100 API로 일정하다. 이는 이 심도의 지질학적 특성은 비슷한 것으로 보이나 그림 11b의 중성자검층 결과에서 보다면 추정된 공극률 프로파일이 두 지역이 상이한 결과를 나타낸다. OB5호공의 경우 각 다중심도 관측층에 대한 공극률의 차이가 크며 공극률이 40 LPU 이상을 보이기도 한다. 이는 실제 공극률이 높음을 의미하는 것이 아니라 층적층의 점토에 영향으로 인한 공극률 과다 추정의 결과로 판단된다. 즉, Am-Be 방사능 선원을 이용하는 중성자검층은 수소(hydrogen)와의 반응을 이용하여 지층의 공극률을 추정하게 되는데 점토에 부착된 수소의 영향으로 중성자검층 시 공극률이 크게 측정된 것으로 보인다. 이에 OB1호공에서는 하천과의 지하수 유동이 활발하여 각 다중심도 관측공별로 온도 변화가 큰 반면에 OB5호공은 공극률은 높지만 이는 점토의 영향으로 지하수 유동이 오히려 적음으로 해석된다. 이 결과는 본 실증지역 시추공을 대상으로 실시한 슬러그 시험(slug test)에서 수리전도도가 OB1 평균 1.34 m/day, OB5 평균 0.69 m/day으로 OB1호공이 수리전도도가 상대적으로 높은 결과를 보이고 있어 물리검층으로 추정된 본 결과를 잘 뒷받침 해준다.

수막재배 시추공과 하천변에 위치한 시추공의 모니터링 결과를 분석하였다. 그림 12의 로그는 각 시추공의 물리검층 모니터링 결과로, 왼쪽부터 여름(7

월), 수막재배 시기인 겨울(1월), 그리고 수막재배 종료 후(5월)의 온도, 전기전도도의 수직 프로파일을 나타낸다. 지하수위는 하천변 및 수막재배 시추공에서 약 1.7 m의 비슷한 높이로 형성이 되어 있다가, 수막재배가 한창인 1월에는 OB9호공 약 8 m, OB10호공 약 5 m까지 하강하며 수막재배 종료 후에는 다시 수위가 회복된 것을 알 수 있다. 하천변인 OB1호공의 수위는 수막재배 시에도 큰 수위 강하를 보이지는 않았다. 전기전도도의 값의 수평적 분포를 살펴보면 OB1호공은 약 290  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , OB9호공은 약 320  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , OB10호공은 약 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 즉 하천에서 멀어지면서 온도 및 전기전도도가 증가함을 보인다. 그러나 수막재배 시에는 수위 강하와 함께 OB10호공의 전기전도도가 OB9호공의 수치까지 전기전도도가 낮아진다. 이는 수막재배를 하면서 하천 쪽인 OB9호공의 지하수가 OB10호공 쪽으로 유동되는 것을 의미한다. 수막재배 시기인 1월에 OB9호공과 OB10호공의 온도치가 같아지는 것으로 부연 설명된다. 하천변인 OB1호공의 경우, 전기전도도나 온도의 변화는 없었다. 이는 수막재배의 영향을 받을 수도 있지만 하천에 바로 인접해 있어 하천 영향이 크기 때문에 OB9호공이나 OB10호공처럼 지하수 물성치가 변화를 보이지 않는 것으로 생각된다. OB10호공의 온도 및 전기전도도의 수직적 변화는 수막재배 종료 후에는 수위 회복과 함께 다시 원래 배경치로 돌아감이 모니터링되었다.

#### 4. 결론

최근 국내에서 이용 면적이 늘어난 수막재배 지역에서 순수 지구물리적 기법만을 이용하여 연구 지역의 층적층 및 대수층을 특성화하고자 하였다. 그동안 지하수 조사·연구 분야에서 많은 지구물리 기법이 적용되어왔지만, 본 연구에서는 수변 층적층 수막재배 지역이라는 특성화된 소규모 지역에서 특정한 목표를 가지고 여러 가지 지표 물리탐사 및 물리검층 방법을 적용해 보았으며, 특히 방사능검층 및 물리검층 장기 모니터링을 이용하여 단공 주입·양수정 설계 및 수막재배에 따른 피해 및 영향을 확인하였다. 그 결과, 지구물리적 접근법만으로는 분명 그 한계점이 있지만 일정 심도·특정 대수층에서 지하수 물성을 모니터링하는 일반적인 지하수 모니



터링과는 달리 본 연구에서는 물리검층 모니터링을 이용하여 전 구간 심도에 대한 지하수 물성 변화를 장기적으로 관찰하여 하천과의 지하수 유동 및 계절 양수에 따른 변화를 확인하였다. 지구물리기법을 이용한 충적층 및 대수층 특성 평가는 추후 대수층 순환식 수막재배 시설 구축 및 운영의 효율성에 도움이 될 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁시행한 물관리연구사업(11기술혁신C05)에 의한 '수변지하수활용고도화' 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 아울러 익명의 심사위원들과 편집위원장님께 깊은 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- Boyle, J.M. and Saleem, Z.A., 1979, Determination of recharge rates using temperature-depth profiles in wells. *Water Resources Research*, 15, 1616-1622.
- Cohen, A.J.B., 1995, Hydrogeological characterization of fractured rock formations: A guide for groundwater remediators, Berkeley National Laboratory, LBL-38142, 144 p.
- Keys, W.S. and Brown, R.F., 1978, The use of temperature logs to trace the movement of injected water. *Ground Water*, 16, 32-48.
- Keys, W.S. and MacCary, L.M., 1971, Application of borehole geophysics to water-resources investigations. *Techniques of Water Resources Investigations of the USGS*, Book 2, Chapter E1.
- Kim, H.S., 1997, Detection of groundwater table changes in alluvium using electrical resistivity monitoring method. *The Journal of Engineering Geology*, 7, 139-151 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., 1996, Soundpro for windows v.1.0.
- Kim, J.H., 2001, Dipro for windows v.4.0.
- Kim, Y., Kim, T., Kim, K.Y., Hwang, S. and Chae, B.G., 2005, Analysis of groundwater flow characterization in fractured aquifer system. *The Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 10, 33-44 (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2011, Integrated technologies in securing and applying groundwater resources to cope with earth environmental changes, GP2009-0009-01-2011(3), 559 p (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2012, Groundwater level restoration of riverside porous aquifer, Infrastructure R&D Report, 26-29 (in Korean with English abstract).
- Moon, S.H., Ha, K., Kim, Y. and Yoon, P., 2012, Analysis of groundwater use and discharge in water curtain cultivation areas: case study of the cheongweon and chungju areas. *The Journal of Engineering Geology*, 22, 387-398 (in Korean with English abstract).
- Norris, S.E. and Spieker, A.M., 1962, Seasonal temperature changes in wells as indicator of semiconfining beds in valley-train aquifers. *USGS Prof. Pap.* 45-B, B101-B102.
- Paillet, F.L., 2001, Hydraulic head applications of flow logs in the study of heterogeneous aquifers. *Ground Water*, 39, 667-675.
- Park, K.G., Shin, J., Hwang, S. and Park, I., 2007, Freshwater injection test to migrate seawater intrusion and geophysical monitoring in coastal area. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 10, 353-360 (in Korean with English abstract).
- Schneider, R., 1962, An application of thermometry to study of groundwater, *U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper* 1544-B, 16 p.
- Shin, J. and Byun, J., 2010, Freshwater injection test in a fractured bedrock aquifer for the mitigation of seawater intrusion. *Economic and Environmental Geology*, 43, 371-379 (in Korean with English abstract).
- Song, Y.K., Suh, J.W., Lee, J.H., Kim, C.S. and Kim, Y.C., 2014, Construction of groundwater circulating water curtain cultivation system. *Proceedings of KSEG 2014 spring conference*, 347-349 (in Korean).
- Sorey, M.L., 1971, Measurement of vertical groundwater velocity from temperature profiles in wells. *Water Resources Research*, 7, 963-970.
- Theys, P., 1991, Log data acquisition and quality control. Editions Technip.
- Williams, J.H. and Johnson, C.D., 2004, Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *Journal of Applied Geophysics*, 55, 151-159.

Received : June 10, 2016

Revised : June 22, 2016

Accepted : June 23, 2016