

## 대수층 이방성 분석을 위한 자연전위 모니터링의 적용

송성호\* · 용환호

농업기반공사 농어촌연구원

### Application of SP monitoring to the analysis of anisotropy of aquifer

Sung-Ho Song and Hwan-Ho Yong

Rural Research Institute, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, Ansan 426-170, Korea

To analyze the anisotropic characteristics of fractured aquifer, variations of streaming potential were measured during and after pumping over several wells at the two test sites. Surface electrical resistivity survey, normal resistivity logging, and slug test were performed at the wells to identify the hydrogeological structure. Applying the results to the recently suggested model, the aquifer of the two test sites showed confined characteristics. Anisotropic direction appeared in using equi-potential maps from self-potential monitoring results matched well with the results of the hydrogeological test. The self-potential monitoring method adopted in this study would be useful for providing a more reliable information on the anisotropy of aquifer in the pumping test at single well.

**Key word** : anisotropy, self-potential, pumping, normal resistivity logging, surface electrical resistivity survey

대수층의 수리적 이방성 분석을 위하여 시험정이 규칙적으로 배열된 두 곳의 실험현장에 대하여 양수시험 전후에 장기간의 자연전위 모니터링을 수행하였으며, 자연전위법 적용 이전 단계에서 지표 전기비저항탐사, 노말비저항검층 및 순간수위변화시험을 이용하여 대수층의 수리지질학적 구조를 파악하였다. 최근에 제안된 수치 모델을 이용하여 두 실험현장에 대한 자연전위 모니터링 자료를 해석한 결과 피압 대수층의 특성이 나타나며, 자연전위 자료로 등전위 분포도를 작성한 결과 다양한 방법에서 얻어진 대수층의 이방성 방향과 일치됨을 확인하였다. 따라서 이 연구에서 이용된 대수층시험과 자연전위 자료의 복합해석을 이용한 이방성 분석 기법 적용 결과는 관측정이 없는 단공양수시험 시 대수층의 수평적인 이방성 등을 추정하는데 유용할 것으로 판단된다.

**주요어** : 이방성, 자연전위, 양수시험, 노말비저항검층, 지표 전기비저항탐사

### 1. 서 론

물리탐사 기술은 다양한 종류의 물리적 특성을 이용한 측정방법을 통해서 지반·환경 조사, 지하수 조사, 지하수·토양오염 조사 및 지질 조사 등의 많은 분야에서 이용되고 있다. 이 중 지하수 환경 측면에 대한 적용은 최근 지하수 오염범위 분석 및 오염된 지하수·토양의 복원 사업과 밀접하게 관련되어 활용도가 높아 지는 추세이다(Park *et al.*, 2001; 송윤호 등, 2001; 송성호 등, 2002). 그러나 수리지질 특성 중 투수량계수와 저류계수 등 수리상수 추정, 이방성(anisotropy)

등의 공간적 특성 파악 및 지표로부터 유입된 오염물질의 거동 파악을 위한 각종 시험들의 경우는 비용과 시간이 많이 소요되는 단점이 있기 때문에, 최소한의 대수층 시험과 물리탐사 기술의 복합적 적용은 일정 규모의 소유역에 대한 수리상수, 이방성 및 오염물질의 유동현상 등을 규명하는데 필수적이다. 이 연구에서는 두 실험현장을 대상으로 대수층의 이방성 파악을 위한 양수시험 자료와 자연전위법 등의 탐사 자료를 복합 해석하여 현장 적용성을 파악하였다.

이 연구와 관련되어 지금까지는 Semenov (1974)가 관점에서 지하수 양수시험 시 양수정을 중심으로 자연

\*Corresponding author: shsong@karico.co.kr

전위가 지하수면의 하강 양상과 대칭적으로 나타나는 결과를 제시한 이래로, 최근 Titov *et al.* (2002)이 Sill (1983)의 연구결과를 개선시킨 모델링 코드로 제한적이지만 자유면과 피압 대수층의 다양한 모델에 대한 자연전위 결과를 해석하고 있는 추세이다. 국내에서는 전기역학적 효과에 의해 발생하는 유동전위를 대상으로 저수지 제체와 방조제의 누수유로를 탐지하기 위한 다양한 사례가 있지만(조진동 등, 1990; 권병두 등, 1993; 조진동 등, 1996; 송성호 등, 2000), 대수층 특성을 규명하는 연구는 아직까지 없는 실정이다.

이 연구의 목적은 자연전위를 이용한 대수층의 수리적 이방성을 정량적으로 파악하기 위한 현장 적용성 파악으로, 암반 대수층을 대상으로 두 곳의 실험현장에서 다양한 수리지질학적 자료와 복합적인 해석을 수행하였다.

## 2. 현장적용 방법

이 연구에서는 유체의 흐름으로 발생하는 유동전위(streaming potential)를 이용한 대수층의 수평적 이방성 분석을 목적으로, 두 실험현장에 규칙적으로 배열시킨 시험정에 대하여 양수시험에 따른 각 시험정의 수위강하량과 이로부터 발생하는 자연전위를 측정하여 상호 분석하였다. 이를 위한 기초조사로 실험현장 주변에 대한 지표 전기비저항탐사와 각 시험정들에 대한 전기검층을 실시하였는데, 전기비저항 탐사의 경우는 슬럼버저 배열법을 이용한 2차원 탐사를, 전기검층은 노말비저항검층(normal resistivity logging), 라테랄비저항검층(lateral resistivity logging)과 온도검층을 병행하였다.

노말비저항검층은 이수를 사용한 시추공에서 이수의 비저항, 층의 두께, 시추공 반경, 침투범위 등의 자료를 이용하여 겹보기비저항을 계산하는 방식으로 발전되어 왔지만(U.S. Army Corps of Engineers, 1995), 최근 지하수 조사에서 점차 이용이 증대되는 방법이다. 노말비저항검층은 4개의 전극을 사용하는데, 전류전극과 전위전극 간격에 따라 단노말(short normal, 16 inch)과 장노말(long normal, 64 inch)로 구분되며, 측정범위는 대략 sonde에 설치된 전류전극과 전위전극(AM) 간격의 두배 길이의 반경을 가지는 구(sphere) 형태이다. 따라서 단노말과 장노말의 측정범위는 각각 sonde 주변부와 공내 주변부 및 공벽 외곽부를 포함한다. 이때 장노말의 반응은 층의 두께에 의해 영향을 받는데, 층의 두께가 AM보다 두꺼운 경우는 측정 비저항이 이론

치보다 작게 나타나지만, 얇은 경우는 측정치가 상대적으로 크게 나타날 수 있으므로 해석에 어려움이 발생할 수 있다(Telford *et al.*, 1990). 라테랄비저항검층의 경우는 노말검층과 달리 전위전극의 간격이 0.8 m, 전류전극이 전위전극의 중심으로부터 1.8 m 떨어져 있으므로, 장노말의 경우와 마찬가지로 공내 주변부 및 공벽 외곽부를 포함한 범위에 대한 반응을 알 수 있다.

양수시험과 연관된 자연전위 모니터링 자료의 해석은 Titov *et al.* (2002)에 의해 제시된 수치모델 결과를 이용하였는데, 하부 기반암의 비저항이 상부 대수층에 비해 약 10배 정도 작은 자유면 대수층 모델의 경우는 양수시험 동안에 양수정 주변부는 양(+)의 이상대가, 주변부 대수층의 경우는 지하수가 빠져나감에 따른 매질의 압착현상으로 음(-)의 이상대가 나타나는 결과를 밝혔다. 또한 피압 대수층의 경우는 두가지 형태의 이상대가 나타나는 것으로 밝혀졌는데, 하부 대수층의 경우는 지하수의 수평흐름에 의한 양의 이상대가, 상부에서는 지하수위 강하에 따른 수두의 수직구배에 의한 음의 이상대가 복합적으로 나타난다고 제시하였다.

이 연구에서 자연전위 측정은 자체 제작한 다채널 장기 모니터링용 자연전위 측정 시스템 및 비분극전극을 이용하였는데, 자연전위 측정 시스템은 제어장치와 출력 신호처리 부분으로 구성되며, 특히 비분극전극으로부터 모든 주파수를 가진 신호가 시스템으로 입력되어 잡음의 분리가 어렵기 때문에 10 Hz 이하의 주파수를 가지는 신호만 통과시키는 저역통과 필터(low-pass filter)를 사용하였다(송성호, 2001). 또한 자연전위법은 신호대 잡음의 비가 매우 낮아 정밀한 자료획득 과정이 필수적이므로, 현장 탐사 시 고주파의 잡음을 차단하고 장기 모니터링 시 전극과 대지간의 결합에 의해 발생할 수 있는 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 정기적으로 기준전극의 측정치와 보정을 수행하였다.

또한 이러한 자연전위법의 현장 적용 이전 단계에서 각 시험정 주변에 대한 대수층의 수리전도도 특성을 알아보기 위하여 순간수위변화시험(slug test)을 병행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 실험현장 1

이 현장은 지표 하부 약 1~2 m 깊이의 표토층, 약 30 m 내외 깊이의 충적층과 하부 기반암으로 구성되어 있다. 이 연구에서는 각 시험정의 지하수위 자료를 이

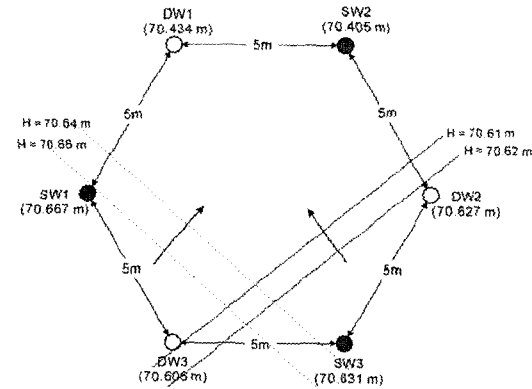


Fig. 1. Hydraulic gradient and flow direction at each aquifer at test site 1. Closed circles indicate the shallow aquifer well (30 m) and open circles indicate the fractured aquifer well (100 m). Arrows mean the flow direction of each aquifer.

용한 지하수 유동방향을 파악하였으며, 각 시험정에 대하여 대수층 특성 규명을 위한 노말비저항 및 온도검층, 양수시험과 순간수위변화시험을 실시하여 대수층의 수리특성을 분석하였다. 이 지역의 층적 대수층 대상 시험정은 심도 30m이며, 지표하부 1m까지는  $\Phi 4$ 의 케이싱, 하부는 전체구간에 대하여 스크린을 설치하였다. 압반 대수층 시험정은 심도 100m이며, 지표하부 20m까지  $\Phi 8$ 의 케이싱을 설치하였고 그 하부는  $\Phi 6$ 의 나공 상태로 유지하였다.

대수층의 수리지질 특성을 규명하기 위하여 일차적으로 각 시험정의 수위자료를 이용하여 동일시간에 측정된 지하수위를 해발고도로 환산하였으며, 이를 이용하여 층적 대수층과 압반 대수층을 구분한 동수구배와 지하수의 유동방향을 측정하였다(Fig. 1). 지하수위 분석 결과 층적 대수층과 압반 대수층의 동수구배는 각각 0.027과 0.025로 비슷한 결과가 나타나지만, 지하수위 분포와 지하수의 유동방향이 서로 다르게 나타남에 따라 각 대수층별로 지하수체가 서로 다른 것으로 판단된다.

대수층의 이방성 파악을 위하여 압반 대수층 시험정인 DW3을 대상으로 157 m<sup>3</sup>/day의 양수량으로 양수시험을 한 결과 DW2 시험정의 수위강하량이 크게 나타났고, 층적 대수층 시험정인 SW1과 SW2에서는 상대적으로 미약하게 나타났다. DW3에서의 수위강하량 자료를 피압대수층으로 가정하여 Theis 방법으로 분석한 결과(Theis, 1935), 투수량계수와 저류계수의 값은 각각 0.1315 m/min과 0.0365로 나타났다(Fig. 2). 또한 압반 대수층 시험정에 대한 순간수위변화시험 자료를

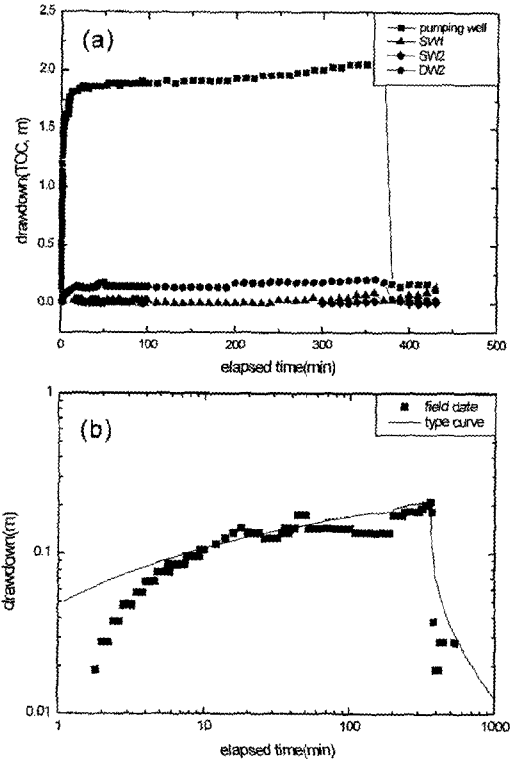


Fig. 2. Results of pumping test at test site 1. (a) drawdown of observation wells with pumping test at DW3 well. (b) interpretation result of pumping test at DW2 well with Theis method.

Table 1. Calculated hydraulic conductivity by slug test at test site 1.

Well Number	Hydraulic Conductivity (m/min)		
	Injection	Withdrawal	Average
DW1	0.002093	0.002154	0.002124
DW2	0.000407	0.000366	0.000387
DW3	0.002597	0.001557	0.002077

Bouwer and Rice (1976) 방법으로 분석한 결과 DW1과 DW3 시험정의 수리전도도는 0.0021 m/min 내외로 DW2 시험정의 결과에 비해 약 10배 정도 크게 나타나는데, 이는 실험현장 1의 경우 시험정간의 거리가 짧은데도 불구하고 DW2 시험정 주변의 대수층 특성이 DW1과 DW3 시험정이 위치한 부분과 상이한 것으로 판단된다(Table 1).

압반 대수층 시험정에 대한 노말비저항검층 결과에서도 3곳의 시험정이 유사한 변화가 나타나지만, DW2 시험정의 경우는 DW1과 DW3에 비해 압반 파쇄대에

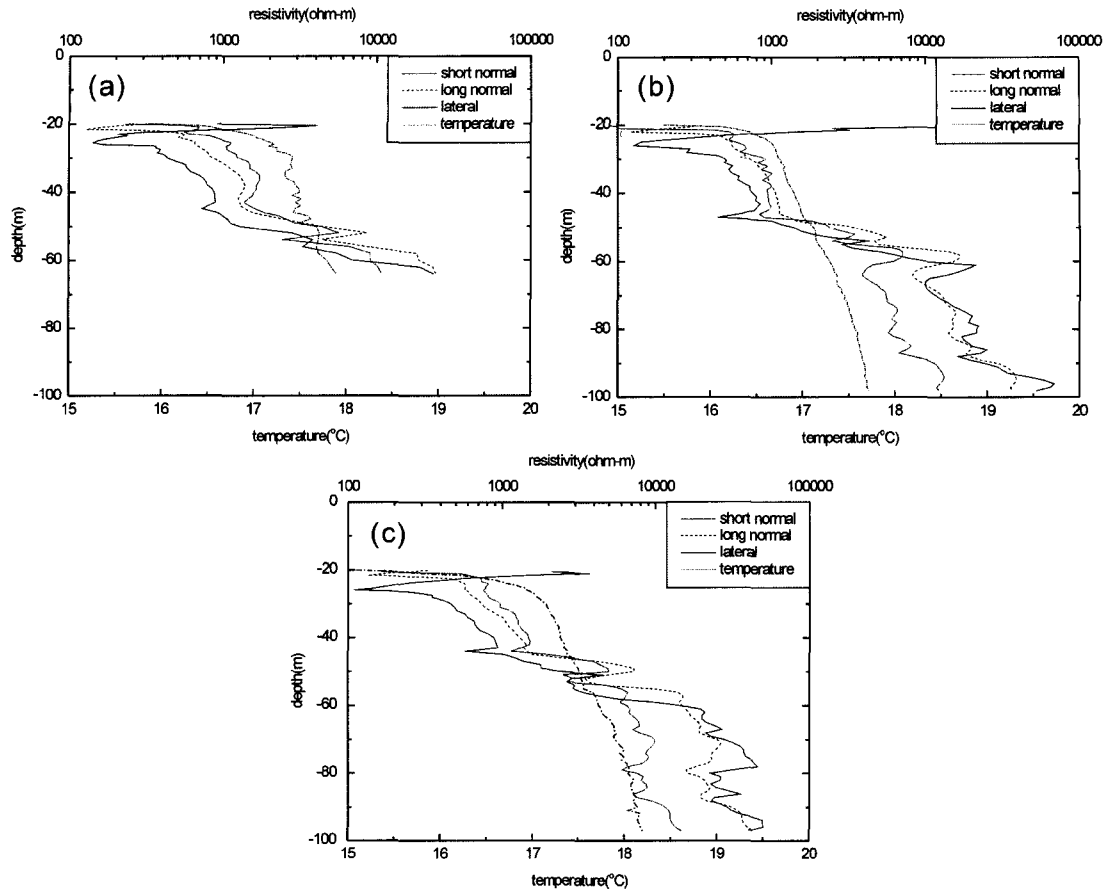


Fig. 3. Results of normal resistivity logging at fractured aquifer wells. Graphs are for the DW1 (a), DW2 (b), and DW3 (c), respectively.

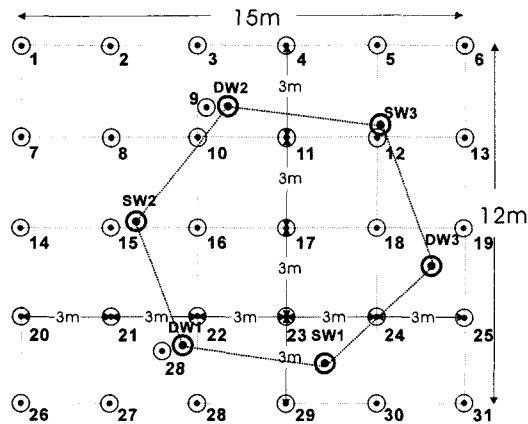


Fig. 4. Array map of non-polarizable electrode at test site 1.

의한 대수층 구간인 20~48 m 사이에서의 장노말값이 단노말값과의 차이가 작은 것으로 보아 이러한 특성이 보다 명백해짐을 확인 할 수 있었다(Fig. 3). 또한

DW1과 DW3 시험정은 이 구간에서 장노말값이 단노말값에 비해 작으므로, 대수층의 발달이 DW2 시험정 이 위치한 방향을 제외하고는 시험정 주변으로 폭 넓 게 발달하는 것으로 판단된다. 라테랄비저항검층의 결 과는 이 구간을 제외한 구간에서 장노말과 유사한 경 향이 나타남에 따라, 앞서의 구간이 대수층임을 지시 하며 각 시험정 사이의 연결성은 DW1과 DW3의 방 향으로 발달되는 것으로 판단된다.

대수층 이방성 분석을 위한 자연전위 측정 방법은 비분극전극을 3×3 m의 간격으로 배열하였으며, 양수시 험 기간 및 종료 후 자연전위 변화를 모니터링 하였다 (Fig. 4). 양수시험 결과 수위강하가 주로 암반 대수층 시험정에서 나타남에 따라 암반 대수층 시험정에서의 수위강하량과 동시에 연속 측정된 자연전위 변화를 상 호 비교한 결과 DW1 시험정 주변의 비분극전극에서 자연전위 변화가 수위강하량과 유사하게 나타났다

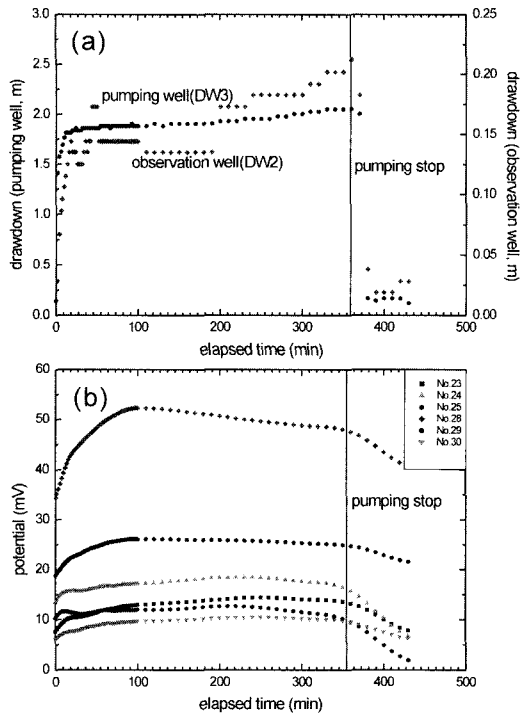


Fig. 5. Drawdown and SP variation curve with pumping at test site 1. Graphs are for the drawdown (a) and SP variation (b), respectively.

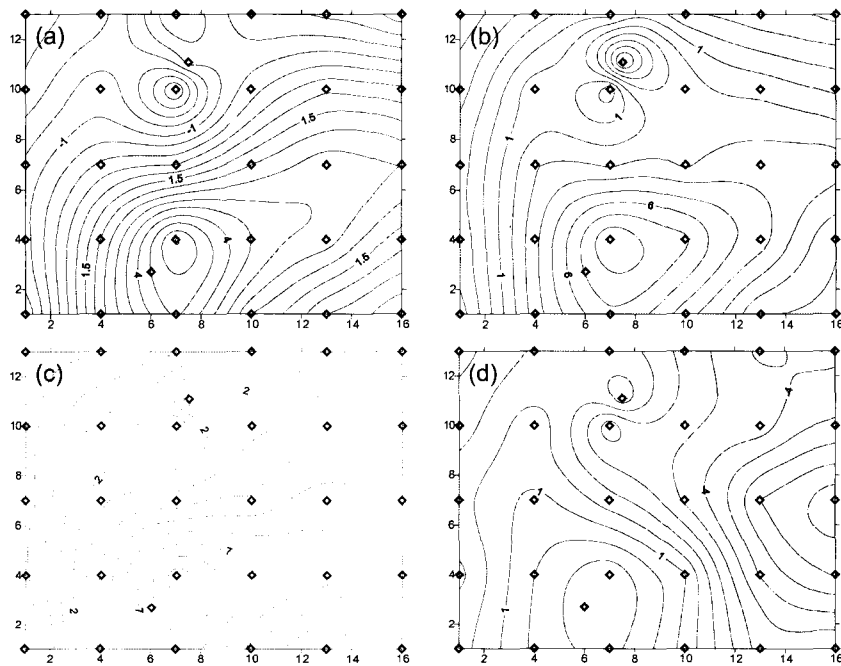


Fig. 7. Equi-potential lines during pumping test at test site 1. (a) 30 min, (b) 200 min, (c) 360 min (pumping stop), and (d) 420 min.

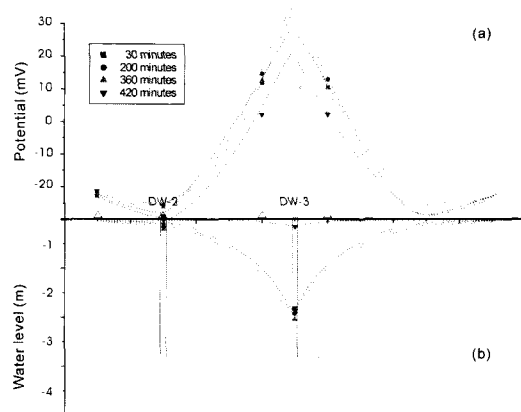


Fig. 6. SP variation and drawdown curve due to pumping at DW3 well in test site 1. Dot lines mean inferred equipotential lines (a) and water level (b), respectively.

(Fig. 5). 이때 획득된 자연전위 자료 중 양수시험 시작 초기에 약 3 mV 내외의 변화가 나타남에 따라 주변의 환경적인 요인으로부터 발생될 수 있는 잡음의 영향을 제거하기 위하여 매 측정시간 자료를 보정하였다(송성호와 권병두, 2002). 특히 이 실험현장의 경우는 피압대수층으로 Titov *et al.* (2002)이 제시한 모델을 적용하는 경우 양수정에서 양수 시 대수층에서 수

평으로의 흐름은 지하수 유동에 의해 양(+)  
의 전위원 (positive electrical sources)을 발생시키는 모델과 일

치하므로, 암반 대수층의 지하수위 자료가 있는 DW2  
와 DW3 시점정 방향으로 지하수위 변화에 따른 자연

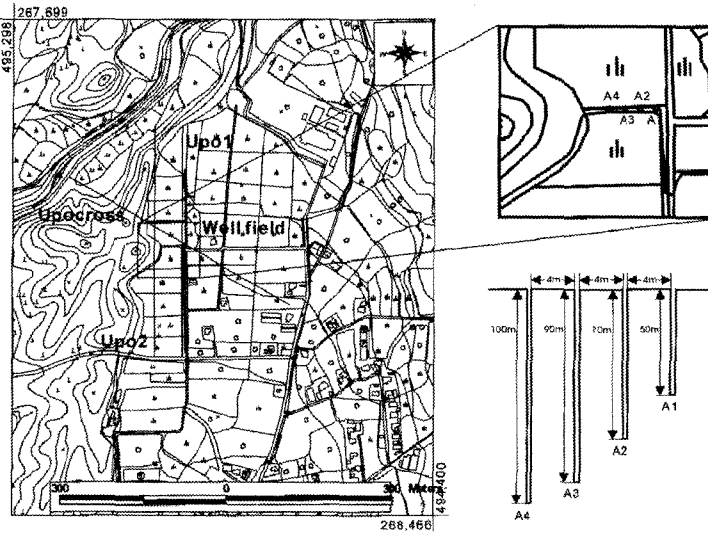


Fig. 8. Map of well location and electric resistivity survey line at test site 2.

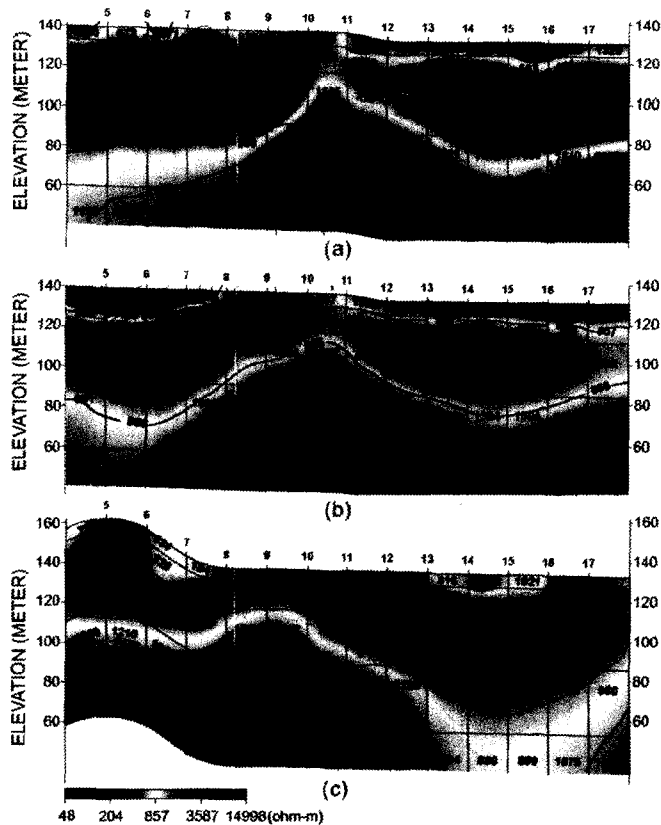


Fig. 9. Inversion results of Schlumberger array electrical resistivity survey at test site 2. Graphs are for the Upo1 (a), Up (b), and Upocross (c), respectively.

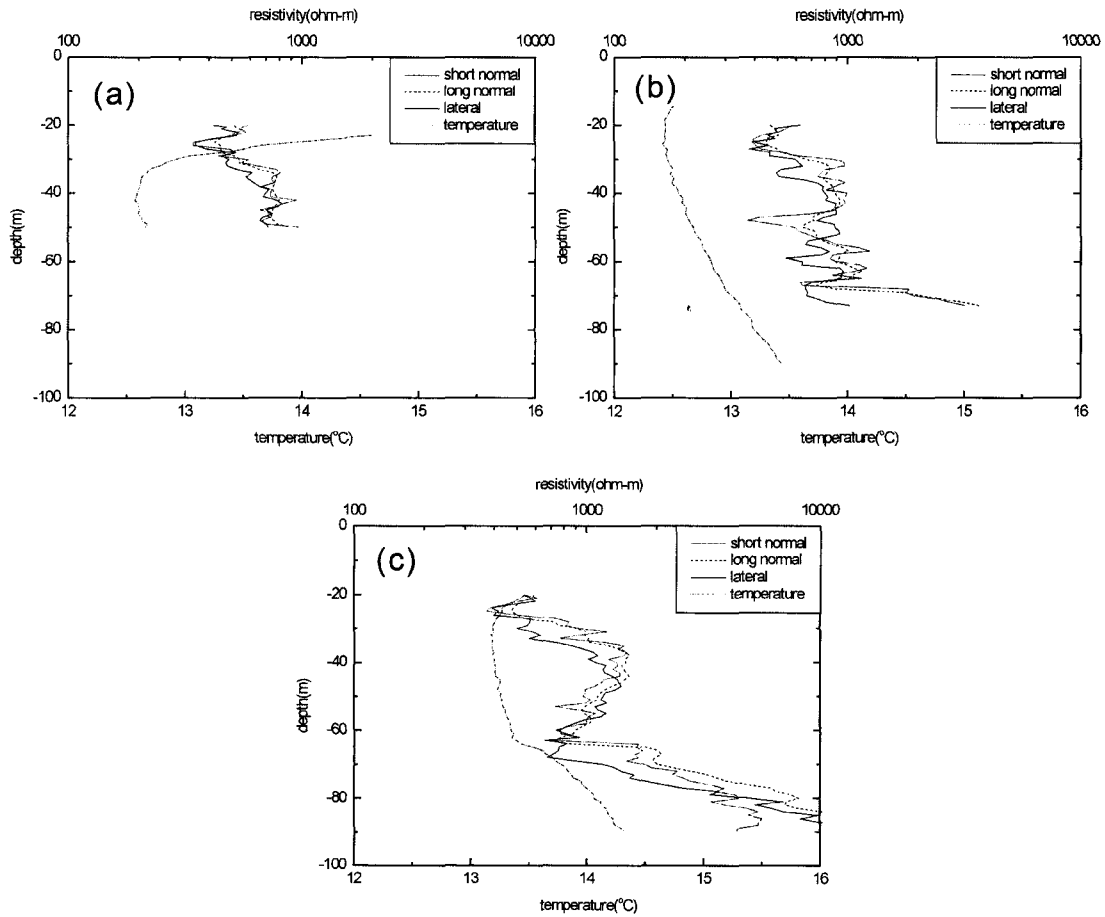
전위 변화를 도시한 결과 모델에서 제시된 결과와 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 자연전위 측정치를 이용하여 등자연전위선을 도시한 결과 전체적으로 양수 정인 DW3 지점으로부터 DW1 지점 방향으로 이상대가 나타나며, 양수 종료 후에는 배경값으로 회복되는 결과가 나타났다(Fig. 7).

**3.2. 실험현장 2**

이 실험현장은 지표 하부 약 1~2m 깊이의 토사층, 약 5~6m 깊이의 충적층, 약 2m 내외의 풍화대 및 그 하부의 기반암으로 구성되어 있다. 이 현장에서는 동일선상에 배열된 4곳의 시험정을 포함한 대수층의 수평적인 발달 상태 파악을 위하여 지표 전기비저항 탐사를 수행하였으며, 각 시험정에 대한 노말비저항검층 및 온도검층, 양수시험과 병행한 자연전위법을 각각 적용하였다(Fig. 8). 이때 전기비저항탐사는 시험정을 포

함하는 남북방향의 두 축선(Upo1, Upo2)과 일렬로 배열된 4곳의 시험정을 포함한 N75W 방향의 축선(Upocross)을 대상으로 수행하여 전기비저항의 공간적인 변화를 분석하였다.

각 축선에 대한 전기비저항탐사는 이 지역의 접지저항이 매우 높음에 따라 수직적인 구조에 대한 분해능이 낮음에도 불구하고 상대적으로 신호대 잡음비가 높은 슬립버저 배열법을 이용하였으며(김정호 등, 2001), 자료처리는 GPS 측위 결과를 이용하여 지형 보정이 포함된 역산법을 이용하였다(Fig. 9). 남북방향 축선에 대한 역산 결과 심도 약 30~40m 내외의 깊이에서 동서방향으로 약 1,000 ohm-m 이상의 고비저항대가 나타나며, N75W 방향 축선의 결과를 추가하면 동서방향의 암맥류로 판단되는 고비저항대가 A4 시험정의 서쪽 방향으로 발달하는 것으로 나타남에 따라 상대적으로 동쪽방향으로의 발달은 미약한 것으로 판단된다. 따라



**Fig. 10.** Results of normal resistivity logging at fractured aquifer wells. Graphs are for the A1 (a), A2 (b), and A3 (c), respectively.

서 4곳의 시험정은 암맥 관입부 외곽 상부에 위치한 동일한 대수층으로 판단되며, 이를 확인하기 위하여 각 관정에 대하여 전기비저항 검층과 온도 검층을 수행하였다. 노말비저항검층의 결과 주변 매질에 대한 전기비저항의 경우 약 1,000 ohm-m 이하의 분포가 나타나지만, 약 65 m 이하 심도에서 5,000~10,000 ohm-m로 급격하게 상승하는 결과가 나타났다. 이러한 결과에 따라 약 65 m 이하의 심도는 암맥의 관입과 관련된 것으로 판단되며, 이 지역의 대수층은 30~60 m 구간에서 동서방향으로 발달하는 것으로 밝혀졌다(Fig. 10).

실험현장 2에 대한 자연전위법의 적용은 비분극전극을 동서방향으로 4 m, 남북방향으로 4~6 m의 간격으로 배열하였고, A4 시험정을 이용한 3차례의 양수시험 기간 및 종료 후 회복수위시험 기간 동안 자연전위 변화를 모니터링 하였다(Fig. 11). 양수시험은 30~35 l/min의 양수량으로 시험하였으며, Theis 방법으로 분석한 결과 3차례의 양수시험에서 얻어진 각 관정의 투수량계수와 저류계수가 유사한 것으로 나타났다(Table 2). 또한 A2와 A4 시험정에 대한 순간수위변화시험에서 얻어진 수리전도도가 0.00013 m/min 정도로 유사하므로, 2차원 전기비저항 탐사 결과 나타난 동일한 대수층의 특성을 반영하는 것으로 나타났다(Table 3). A4

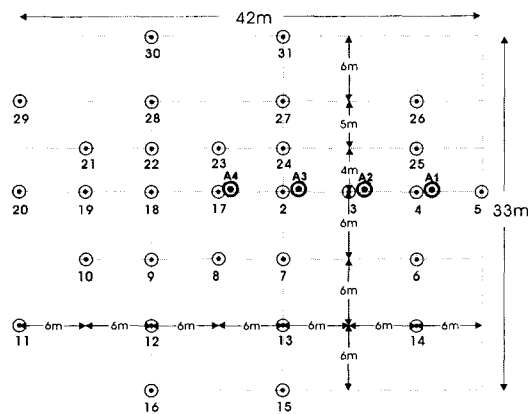


Fig. 11. Array map of non-polarizable electrode at test site 2.

시험정을 이용한 양수시험과 병행하여 총 31지점에 설치한 비분극전극의 자연전위값을 적용한 결과 양수정을 중심으로 동쪽에 위치한 각 전극에서의 자연전위 변화가 유동전위 현상을 잘 반영하는 것으로 나타났다

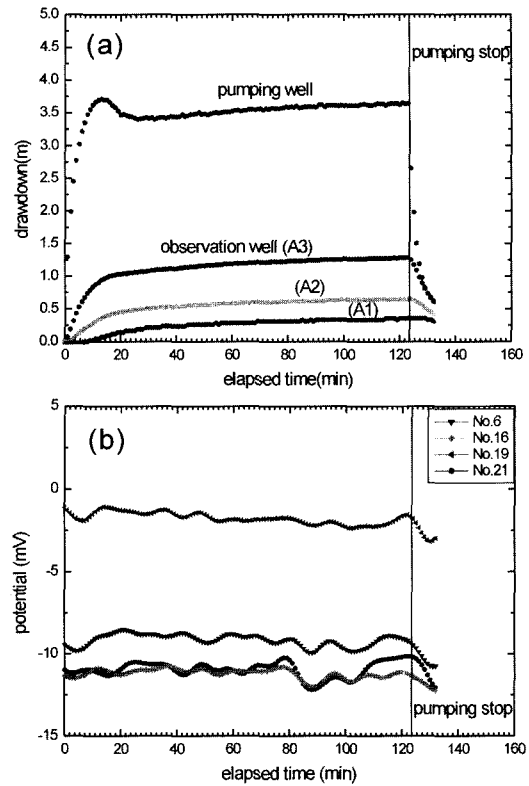


Fig. 12. Drawdown and SP variation curve with pumping at test site 2. Graphs are for the drawdown (a) and SP variation (b), respectively.

Table 3. Calculated hydraulic conductivity by slug test at test site 2.

Well Number	Hydraulic Conductivity (m/min)		
	Injection	Withdrawal	Average
A2	0.0001429	0.0001177	0.0001303
A4	0.0001273	0.0001367	0.0001320

Table 2. Results of three times pumping tests at test site 2 (Theis, 1935).

Step	A1		A2		A3		Pumping Rate (m <sup>3</sup> /day)
	T(m <sup>2</sup> /min)	S	T(m <sup>2</sup> /min)	S	T(m <sup>2</sup> /min)	S	
1st	10.66	2.512	10.88	0.771	10.05	0.467	34.98
2nd	19.05	2.365	21.92	0.232	11.32	0.313	30.83
3rd	18.67	2.512	16.89	0.756	12.26	0.333	32.20
average	16.13	2.463	16.56	0.586	11.21	0.371	32.67



며, 이는 전기비저항 탐사와 전기비저항 검층에서 나타난 낮은 비저항대와 일치한다(Fig. 12). 앞서의 실험현장 1과 마찬가지로 피압대수층 모델을 적용할 경우 양수정에서 양수 시 대수층에서 수평적인 흐름은 지하수 유동에 의해 양의 전위원을 발생시키는 모델과 일치하므로, 지하수위 강하 자료가 있는 A1에서 A4까지의

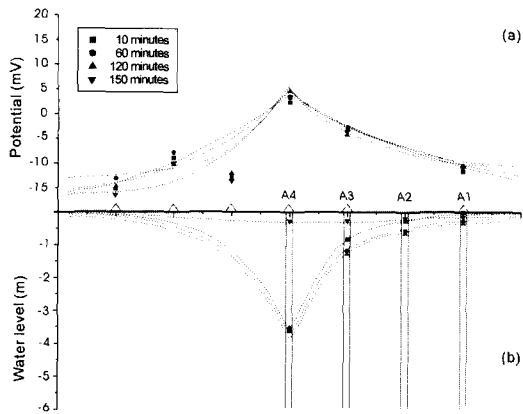


Fig. 13. SP variation and drawdown curve due to pumping at A4 well in test site 2. Dot lines mean inferred equipotential lines (a) and water level (b), respectively.

시험정 방향으로 지하수위 변화에 따른 자연전위 변화를 도시한 후, 시험정이 없는 방향의 변화를 의심한 결과 기존의 모델에서 제시된 결과와 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 13).

자연전위 측정치를 이용하여 등자연전위선을 도시한 결과는 전체적으로 양수정인 A4로부터 좌우측인 동서 방향으로 이상대가 나타나는데, 이 지역의 대수층 구조가 2차원 전기비저항 탐사에서 나타난 동서방향의 암맥류와 연관된 것으로 판단할 수 있다(Fig. 14).

#### 4. 결 론

자연전위법을 이용한 대수층의 수평적 이방성 분석을 위하여 양수시험에 의한 각 시험정의 수위강하량과 이로부터 발생하는 유동전위를 측정하였으며, 자연전위법 적용 이전 단계로 지표 전기비저항탐사와 노말비저항검층을 적용하였다. 또한 순간수위변화시험을 통한 각 시험정의 수리전도도를 측정하여 대수층 수리특성을 분석하였다. 두 실험현장에서 실시한 양수시험에 따른 자연전위법 적용 결과를 Titov *et al.* (2002)이 제시한 모델에 적용한 결과, 두 지역의 경우 피압대수층

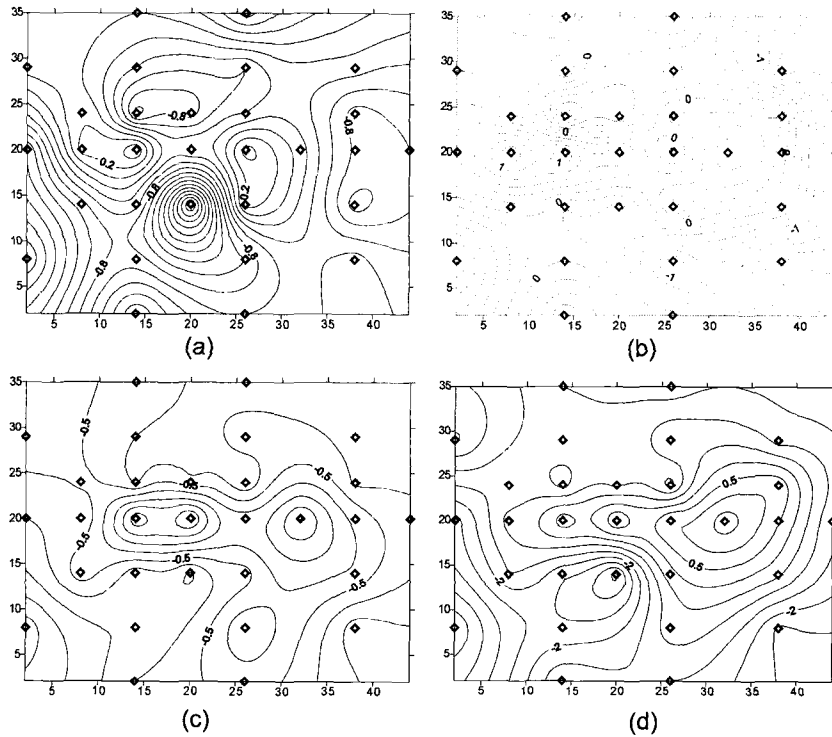


Fig. 14. Equipotential lines during pumping test at test site 2. (a) 10 min, (b) 60 min, (c) 120 min (pumping stop), and (d) 150 min.

에 의한 자연전위 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 양수시험 기간 동안에 양수정 주변에 설치한 비분극전극에서 모니터링된 자연전위 결과를 이용한 등전위 분포도를 작성한 결과 지표 전기비저항탐사, 노말비저항검층 및 순간수위변화시험 등 다양한 방법에서 얻어진 대수층의 이방성 방향과 일치됨을 확인하였다. 따라서 이 연구에서 검토된 대수층시험과 자연전위 자료의 복합해석을 이용한 이방성 분석 기법 적용 결과를 관측점이 없는 단공양수시험에 적용하면 대수층의 수평적인 이방성 등을 추정하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 3-3-1, 3-5-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 권병두, 오석훈, 이희순, 정현기 (1993) 제주도 기생화산의 자연전위 이상. 한국자원공학회지, 30권, p. 352-360.
- 김정호, 이명중, 송윤호, 정승환 (2001) 2차원 전기비저항 탐사를 위한 전극배열법의 비교. 한국자원공학회지, 38권, p. 116-128.
- 송성호, 이규상, 김진호, 권병두 (2000) 방조제 누수지점 탐지를 위한 SP 및 단극배열 전기비저항 탐사의 적용. 자원환경지질, 33권, p. 417-424.
- 송성호 (2001) 자연전위법을 이용한 수리시설물 누수 탐지. 서울대학교 박사학위논문. p. 8-12.
- 송성호, 권병두 (2002) 자연전위의 효율적 측정을 위한 전극의 잡음요소 분석. 지구물리, 5권, p. 9-18.
- 송성호, 배광옥, 용환호, 박삼규 (2002) 자연전위탐사를 이용한 지하수 유동해석. 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 123p.
- 송윤호, 박삼규, 설순지, 조성준, 정승환 (2001) 물리탐사를 이용한 국내 유류오염지역 조사 사례: 환경오염지역 평가를 위한 물리탐사 기술. 한국지구물리탐사학회 2001 정기총회 및 제3회 특별 심포지움, p. 122-140.
- 조진동, 정현기, 최종호, 정승환, 김정호 (1990) 128채널 자동연속 SP Monitor System 개발 및 응용 연구. KR-90-(B)-18, 한국동력자원연구소.
- 조진동, 정현기, 정승환, 김정호 (1996) 방조제 누수 부위 확인을 위한 SP/VLF 탐사법의 적용성. 자원환경지질, 29권, p. 623-627.
- 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, v. 12, p. 423-428.
- Park, S.G., Song, Y., Song, S.H. and Kim, Y.W. (2001) Application of Geophysical prospecting methods to investigation of contaminated soil with petroleum products. 2001 International Symposium on Application of Geosystem Engineering, Seoul, Korea. p. 157-162.
- Semenov, A.S. (1974) Electrical prospecting with the natural electric field method(in Russian). Elektrorazvedka metodom estestvennogo elektricheskogo polia, Nedra, Leningrad.
- Sill, W.R. (1983) Self-potential modeling from primary flows. Geophysics, v. 48, p. 76-86.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) Applied Geophysics. 3rd(ed.), Cambridge Univ. Press, p. 649-650.
- Theis, C.V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Amer. Geophys. Union, v. 2, p. 519-524.
- Titov, K., Ilyin, Y., Konosavski, P. and Levitski, A. (2002) Electrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modelling. Journal of Hydrology, v. 267, p. 207-216.
- U.S. Army Corps of Engineers (1995) Geophysical exploration for engineering and environmental investigations. EM 1110-1-1802, p. 7/16-7/20.

2003년 1월 8일 원고접수, 2003년 2월 18일 게재승인.