

포항 지열 개발지역에서의 SP 장기 관측

임성근¹⁾ · 이태종¹⁾ · 송윤호¹⁾ · 송성호²⁾ · Kasumi Yasukawa³⁾ · 조병욱¹⁾ · 송영수⁴⁾

Application of SP Monitoring in the Pohang Geothermal Field

Seong Keun Lim¹⁾, Tae Jong Lee¹⁾, Yoonho Song¹⁾, Sung-Ho Song²⁾, Kasumi Yasukawa³⁾,
Byong Wook Cho¹⁾ and Young Soo Song⁴⁾

요약 : 포항 지열 개발지역에서 지열수 유동을 파악하기 위하여 자연전위(self-potential; SP) 탐사를 수행하고 양수시험 동안에 SP 장기 관측을 실시하였다. 이를 위해 시추 작업이 시작되기 이전에 대상 지역의 자연전위의 분포를 알아보기 위하여 배경 SP 탐사를 수행하였다. 양수시험은 2003년 12월의 24시간과 2004년 3월의 72시간 동안의 두 번에 걸쳐서 시행되었는데, SP 장기 관측은 이러한 양수시험 전후로 128 채널 자동 SP 측정 시스템을 이용하여 이루어졌다. 배경 SP 탐사에서는 지열수 순환의 상승부로 해석될 수 있는 뚜렷한 양의 이상이 시추공을 중심으로 북쪽에서 관측되었다. 양수 시험으로 인하여 일어나는 심부 지열 저류층의 유동 양상 및 지열수 흐름 방향을 탐지할 목적으로 수행한 1차 및 2차 SP 장기 관측 자료에서 양수 및 양수 중단에 의한 직접적인 SP 변화는 뚜렷하게 보이지 않았다. 이러한 이유는 다양한 폴리탐사 방법으로 밝혀졌듯이 상부에 낮은 전기비저항의 미고결 퇴적층이 깊이 약 360 m 두께로 덮고 있어 지열수 유동에 의한 전기역학적 전위가 지표 부근에서 심하게 감쇠되었기 때문으로 해석된다. 하지만 예비 양수시험 및 장기 양수 시험 동안에 얻어진 지하수 분석 자료와 SP 관측 자료를 비교한 결과 양수로 인한 SP 변화가 비교적 크게 나타나는 몇몇 측정점들을 확인할 수 있었다. 이러한 큰 폭의 SP 변화는 시추공을 중심으로 남서부에 위치한 측정점에서 예비 및 장기 양수시험 동안에 반복하여 관측되었는데, 이 지역은 3차원 MT 해석 결과에서 나타난 심도 600 m~1,000 m 하부의 저비저항 이상대와 일치한다. 따라서 시추공을 중심으로 남서부 지역은 시추공과 수리지질학적으로 연결되어 있음을 추정할 수 있다.

주요어 : 자연전위, 지열, 장기 관측, 지열 저류층, 양수시험, 전기역학적 전위

Abstract : To delineate geothermal water movement at the Pohang geothermal development site, Self-Potential (SP) survey and monitoring were carried out during pumping tests. Before drilling, background SP data have been gathered to figure out overall potential distribution of the site. The pumping test was performed in two separate periods: 24 hours in December 2003 and 72 hours in March 2004. SP monitoring started several days before the pumping tests with a 128-channel automatic recording system. The background SP survey showed a clear positive anomaly at the northern part of the boreholes, which may be interpreted as an up-flow zone of the deep geothermal water due to electrokinetic potential generated by hydrothermal circulation. The first and second SP monitoring during the pumping tests performed to figure out the fluid flow in the geothermal reservoir but it was not easy to see clear variations of SP due to pumping and pumping stop. Since the area is covered by some 360 m-thick tertiary sediments with very low electrical resistivity (less than 10 ohm-m), the electrokinetic potential due to deep groundwater flow resulted in being seriously attenuated on the surface. However, when we compared the variation of SP with that of groundwater level and temperature of pumping water, we could identify some areas responsible to the pumping. Dominant SP changes are observed in the south-west part of the boreholes during both the preliminary and long-term pumping periods, where 3-D magnetotelluric survey showed low-resistivity anomaly at the depth of 600 m~1,000 m. Overall analysis suggests that there exist hydraulic connection through the southwestern part to the pumping well.

Key words : self-potential, geothermal, monitoring, geothermal reservoir, pumping test, electrokinetic potential

*2004년 7월 7일 접수

- 1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부(KIGAM)
- 2) 농어촌연구원 지하수연구실(KARICO)
- 3) 일본 산업기술총합연구소(AIST)
- 4) 전북대학교 자원·에너지공학과

서론

이미 오래 전부터 일본 등 해외에서 지열개발을 위해 많이 적용된 SP 탐사는 장 기간 동안 계속 관측하는 모니터링 개념으로 지열수 유동 양상과 경로를 파악하는데 이용되고 있고 또한 많은 양의 지열수를 생산한 후에 저류층 분포의 변화를 탐지하는데 사용되고 있다(Yasukawa *et al.*, 2002). 최근 우리나라 경우에는 인공적으로 축조된 수리시설물의 누수 탐지 등에 활발히 적용되고 있다(송성호, 2001).

일반적으로 SP는 서로 접하고 있는 농도가 다른 두 전해액 사이에서, 지하수에 용해되어 있는 갖가지 유기질 또는 염들의 농도 변화에 의해서, 그리고 전해액들이 모세관을 통과할 때 또는 지표면 근처에서 암석 등의 공극 등을 통과할 때 발생할 수 있다. 이와 같은 SP 발생의 다양한 메커니즘 중에서, 수리지질학적인 조사를 하고자 하는 경우에는 필수적으로 전기역학적(electrokinetic) 전위를 고려한다(Corwin and Morrison, 1977; Corwin and Hoover, 1979). 전기역학적 SP 효과는 균질 매질에서 비가역적 열역학 이론에 기초하는데(de Groot and Mazur, 1962), 이에 의한 SP 이상은 유체 흐름과 그에 따른 전류의 상호결합 문제를 해결하여 해석하게 된다. 그러나 천부에서 일어나는 전기역학적 SP 효과를 정량적으로 해석하는 데는 몇 가지 어려움이 있다. 첫 번째는 천부의 전기역학적 원천(source)에 의한 SP 발생 특성이 복잡하기 때문에 정량적인 SP 해석이 어렵다는 것이다. 두 번째는 SP 계산에서 중요한 상호결합 계수(cross-coupling coefficient)인 유동전위 계수(streaming potential coefficient)를 현장 실험으로 직접 구하기가 쉽지 않다는 것이다. 이런 해석 과정 상의 어려움을 해결하기 위해 꾸준한 이론적인 연구와 최근의 SP 수치 모델링 연구가 수행되어 오고 있다(Ishido, 1981; Sill, 1982, 1983; Yasukawa *et al.*, 1993, 2002, 2003; Ishido and Pritchett, 1996).

지열 개발지역에서 적용되고 있는 SP는 크게 SP 탐사와 장기 SP 관측으로 나눌 수 있다. SP 탐사는 연구 대상지역 주변의 비교적 넓은 지역에 대한 지표 SP 분포를 구하는 것인데, 지열에너지 탐사에 이러한 방법이 폭 넓게 이용되어 왔다(Ishido *et al.*, 1989; Matsushima *et al.*, 2000). SP 이상은 천부 지열수 움직임과 밀접하게 관련되어 있으며 그에 대한 깊이뿐만 아니라 조사 지역 내에서의 유입(recharge) 영역과 배출(discharge) 영역을 지시하여 준다(Ishido, 1989). 하지만 천부에 존재하는 지질구조적 이상대 때문에 가장 큰 SP 이상이 이러한 유동 흐름 영역의 정확한 위치라고 단언하기는 어렵다. 따라서 지하의 수리지질학적인 구조와 전기비저항 등 지질학적인 구조를 함께 고려하여 SP 자료를 분석하고 해석하는 것이 중요하다(Yasukawa and Mogi, 1998).

한편 장기 SP 관측은 대상 지역을 중심으로 장기간에 걸쳐서 SP 변화를 관측한다. 만약 SP 이상을 일으키는 주요한 요인이 지열수 유동에 의한 전기역학적 전위라고 하면, 연속적인

SP 측정을 통하여 지열 저류층의 거동 양상을 파악하는데 아주 효과적이다. 장기 관측된 SP 자료의 해석에 있어서 어려움 중의 하나는 인공적인 외부 잡음뿐만 아니라, 지자기 변동, 강우, 온도 변화, 일변화 등 지표 위의 SP에 영향을 미치는 많은 요인이 존재한다는 것이다. 또한 전기장이 안정적이라고 가정할 수 있는 기준 위치(reference point)를 설정하는 것이 매우 중요한데, 현장에서 이상적인 기준 위치를 찾는 것은 쉽지 않으며 항상 SP 장기 관측의 장애물로 여겨지고 있다.

본 연구의 탐사지역은 포항시 흥해읍 일원으로 심부 지열수 개발을 위하여 두 개의 심부 시추 공사가 시행된 지역이다. 지표 SP 탐사는 심부 시추 공사가 시작되기 이전에 시추공을 중심으로 그 주변에서 배경 SP 분포 양상을 알아보기 위하여 수행하였다. 시험 시추공이 완공된 후에 2차례의 양수시험을 하였는데, 양수시험 전후에 심부 지열수의 유동으로 발생하는 SP 변화 양상과 지열 저류층 거동 양상을 탐지할 목적으로 SP 장기 관측을 실시하였다. 양수시험은 두 시험 시추공 중에서 심도 1.3 km 굴착공에서 시행하였고, 약 165 m 거리를 두고 위치한 심도 1.1 km 시험 시추공에서는 양수시험이 진행되는 동안에 지하수위 변화를 관측하였다.

양수시험 동안에 얻어진 양수량, 수온, 지하수위 등과 같은 양수자료와 여러 측정에서 동일 시간에 측정된 SP 관측 자료를 비교하여, 양수에 의한 심부 지열수 유동으로 발생하는 SP 효과가 뚜렷한 영역과 유체 흐름 양상 등을 알아보고자 하였다. 또한 동일 지역에서 수행한 3-D MT 탐사 결과와 선구조 등과 같은 다양한 지질학적인 정보를 함께 이용하여 시추공과 양수에 의한 SP 반응 지역과의 수리지질학적인 연결성을 파악하고자 하였다.

이에 본 연구는 먼저 시추공을 굴착하기 전에 얻은 배경 SP 탐사의 결과에 대하여 고찰하고 이후에 양수시험으로부터 얻어진 자료와 동일 시간에 측정된 SP 자료를 비교·고찰하여 보았다.

조사 지역의 지질학적인 특징

포항 심부 지열개발지역은 행정 구역상 경북 포항시 북부의 흥해읍에 위치하고 있으며(Fig. 1), 한반도 동남부인 이 지역을 지체구조적으로 보면 제 3기 포항분지 중부의 대부분이 환동해알칼리화산지구에 속한다(Lee, 1977). 일대의 광역적인 지질은 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하는 퇴적암류를 최기저층으로 하여 이를 관입한 제 3기의 석영반암, 흑운모화강암, 규장암 및 석영조면암 그리고 이들을 피복하는 퇴적암류가 제 3기 포항분지의 기반암을 이루며 지표에 분포하고 있다.

2002년 10월부터 다양한 지질학적, 지구물리학적 방법으로 광범위하게 조사가 이루어진 결과로부터 연구 대상 지역이 선정되었고 서로 165 m 떨어진 위치에서 두 개의 시험 시추공이 굴착되었다. 연구 대상 지역은 그 동안의 중력, 자력, MT

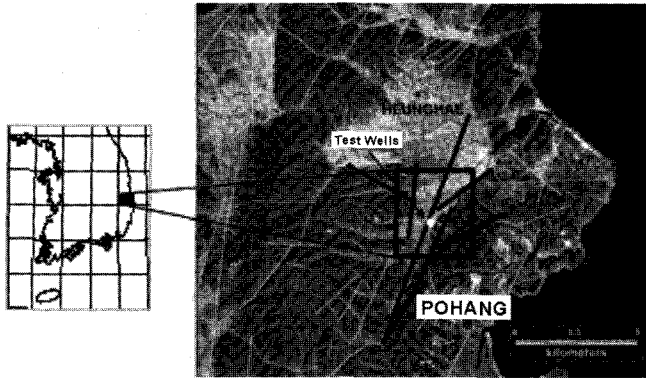


Fig. 1. Distribution of lineament around the Pohang geothermal site superimposed on Landsat TM image. Square shows the survey boundary and black bold lines indicate the lineaments extended into the region.

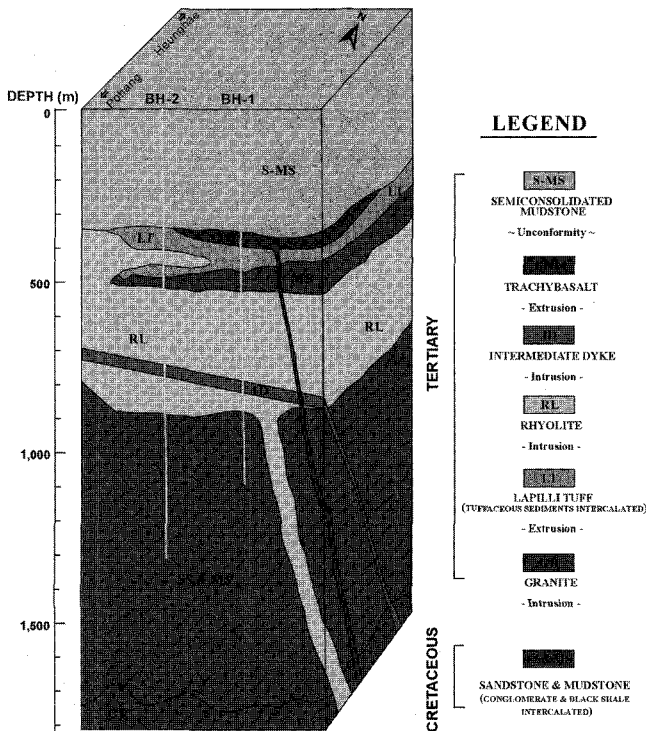


Fig. 2. Schematic diagram of geologic stratigraphy deduced by geology, core and well log analysis near the two test boreholes.

탐사 등의 결과 및 Fig. 1의 선구조(lineament) 등을 종합하여 볼 때에 시추공 주변으로 여러 개의 파쇄대가 주로 북동/남서 방향으로 발달된 지질구조를 가진 것으로 해석된다.

기존 지질도(1:50,000 포항도폭) 및 물리검층 자료와 시추코어 자료를 토대로 한 심부의 지질 층서에 대한 3차원 모식도는 Fig. 2와 같다.

시추공의 코어 및 시추 작업 시에 발생하는 슬러리(slurry)를 회수하여 지질검층을 실시하였는데, 각 시추공에서 확인된 대표적인 암종은 미고결 이암(semiconsolidated mudstone), 화산

력 응회암(lapilli tuff), 이암(mudstone), 유문암(rhyolite), 중성 맥암(intermediate dyke), 사암 및 이암(sandstone & mudstone) 등이다. 이 중에서 최상부에 두께 360 m로 피복하고 있는 미고결 이암은 암갈색이며 전반적으로 완전히 고화되지 못한 암석에 속하며, 특히 일부 구간에서는 수분 흡착 시 조적이 와해되기도 한다. 화산력 응회암은 대부분 담녹회색이며 응회질 사암과 함께 전 구간에서 약풍화 암상을 보이며 주로 410~460 m 심도 내에 분포한다. 이암은 유문암체 상부에 분포하고, 대부분 암회색으로 470~570 m 심도 내에 분포하고 있다. 다른 암체에 비하여 지하수 유동과의 상관성이 높은 것으로 예상되는 유문암은 대부분 담회색으로 대표되며, 중성맥암이 관입하고 있다. 특히 500~600 m 심도에서 단층각력 함유 구간이 존재한다. 중성맥암은 대부분 회록색으로 대표되며, 전 구간에서 약풍화 암상을 보인다. 유문암체 하부에 존재하는 사암 및 이암은 역암, 흑색 셰일 및 사암이 부분적으로 협재하고 있다. 이와 같은 지질학적인 정보와 물리탐사로 확인된 연구 대상 지역의 가장 큰 특징은 10 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 보이는 제 3기 미고결 퇴적층이 약 360 m 두께로 상부를 피복하고 있다는 사실이다.

이론적인 배경

본 절에서는 SP의 다양한 발생원인 중에서 심부 지열수의 유동으로 인한 SP 효과의 배경 이론에 관하여 간단히 설명한다. 정적 상태의 유체(steady-state fluid), 열, 전기 그리고 화학적인 흐름 Γ 는 각각의 포텐셜(potential)의 기울기로 표현된다. 즉, $\Gamma = -L\nabla\psi$, 여기서 ψ 는 이들의 포텐셜이고 L 은 매질 특성(즉, 수리전도도 혹은 전기전도도)이다. Onsager(1931)의 상반성 이론(reciprocal theory)에 따르면, 전기 및 유체의 유동에 의해 유도되는 총 전류밀도 $J(A/m^2)$ 는 다음과 같이 표현된다.

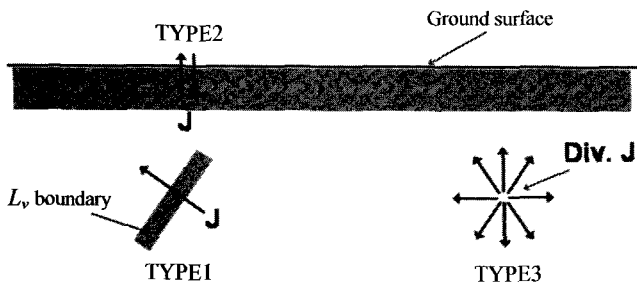
$$J = L_p \nabla P - \sigma \nabla \Phi, \tag{1}$$

여기서 L_p 는 압력-전류 상호결합 계수(pressure cross-coupling conductivity, A/Pa-m), P 는 압력(Pa), σ 는 전기전도도 그리고 Φ 는 전위(V)이다.

(1)식을 유체 및 전기의 장(field)의 개념을 도입하여 다시 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉,

$$J = -L_v u + \sigma E. \tag{2}$$

여기서 L_v 는 속도-전류 상호결합 계수(velocity cross-coupling conductivity, A-s/m³), u 는 유체속도(m/s) 그리고 E 는 전기장(V/m)이다. 수평 1차원 유체흐름인 경우에 속도-전류 상호결합 계수는 압력-전류 상호결합 계수, 침투율 $k(m^2)$ 그리고 점성계수 $\mu(Pa-s)$ 의 관계식, $L_v = L_p \mu / k$ 로 표현된다(Sill, 1982). SP에서와 같이 외부로부터 인공적인 전원이 없는 곳에서는 $\nabla \cdot J = 0$ 이므로, (2)식으로부터 지열수 흐름에 의해 발생하는



배경 SP 탐사

배경 SP 탐사는 포항 지열개발지역에서 심부 시추 작업을 시작하기 이전에 시추 예상지역을 중심으로 반경 약 1~2 km 범위에 걸쳐서 100~150 m의 측점 간격으로 수행하였다. 하나의 전극을 조사 지역 내에서 비교적 전기적 잡음으로부터 자유롭고 여러 면에서 안정적이라고 판단된 곳에 SP 탐사를 위한 기준점으로 설정하고, 나머지 한 전극을 각 측점으로 이동시키면서 기준점에 대한 상대적인 전위차를 측정하는 절대 전위 측정법을 이용하여 총 386 측점에서 자료를 획득하였다. 대상 지역의 시험 시추공을 중심으로 주위에서 광범위하게 측정 한 SP 자료를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3. Three major types of conduction current sources for electrokinetic coupling in subsurface water flow problems.

전류원(current source) S 는 다음과 같이 표현된다.

$$S = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = -\nabla L_v \cdot \mathbf{u} - L_v \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

(3)식은 흐름의 방향에서 L_v 의 변화가 있거나($\nabla L_v \cdot \mathbf{u} \neq 0$), 혹은 지열수 흐름에서 발산(divergence)이 있는 곳($\nabla \cdot \mathbf{u} \neq 0$)에서 SP 효과를 일으키는 전류원이 존재함을 나타낸다. 본 연구에서와 같이 시추공 내에서 양수의 영향으로 인한 지하 내부의 지열수의 흐름에 의해서 유도될 수 있는 전류원은 크게 세 가지 형태로 정의되며 Fig. 3과 같다(Ishido, 1989). 첫 번째 형태는 결합계수가 다른 영역을 통과하는 지열수 흐름이 있는 경우, 두 번째 형태는 지하 천부와 공기 중과의 경계 면에서 흐름이 있는 경우, 그리고 세 번째 형태는 지열수 원이 존재하는 경우이다.

Ishido(1981)는 전기역학적 결합계수(electrokinetic coupling coefficients)를 실험을 통하여 구함으로써 지열수의 순환으로 인하여 유도되는 전위에 대한 정량적인 모델을 제시하였다. 그의 연구에 따르면, 양의 SP 이상은 고온 지열수 상승 영역과 밀접한 관련이 있다. 따라서 지열 대상 지역에서 SP 분포는 다소 복잡한 면은 있지만 지열수의 거동 양상에 대한 지시자로 이용된다. 배경 SP 분포를 보여주는 Fig. 4에서, 시추공 중심으로 북쪽으로 뚜렷한 양의 이상 영역을 구분할 수 있다. 이것은 자연스럽게 순환하여 상승하는 지하수가 서로 다른 유동 결합계수의 경계를 통과하여 흐르는 경우에 유도되어 지표에 양의 SP 값으로 나타나는 것으로 해석된다. 따라서, 음의 이상을 보이는 남서쪽 지역으로부터 양의 이상을 보이는 시추

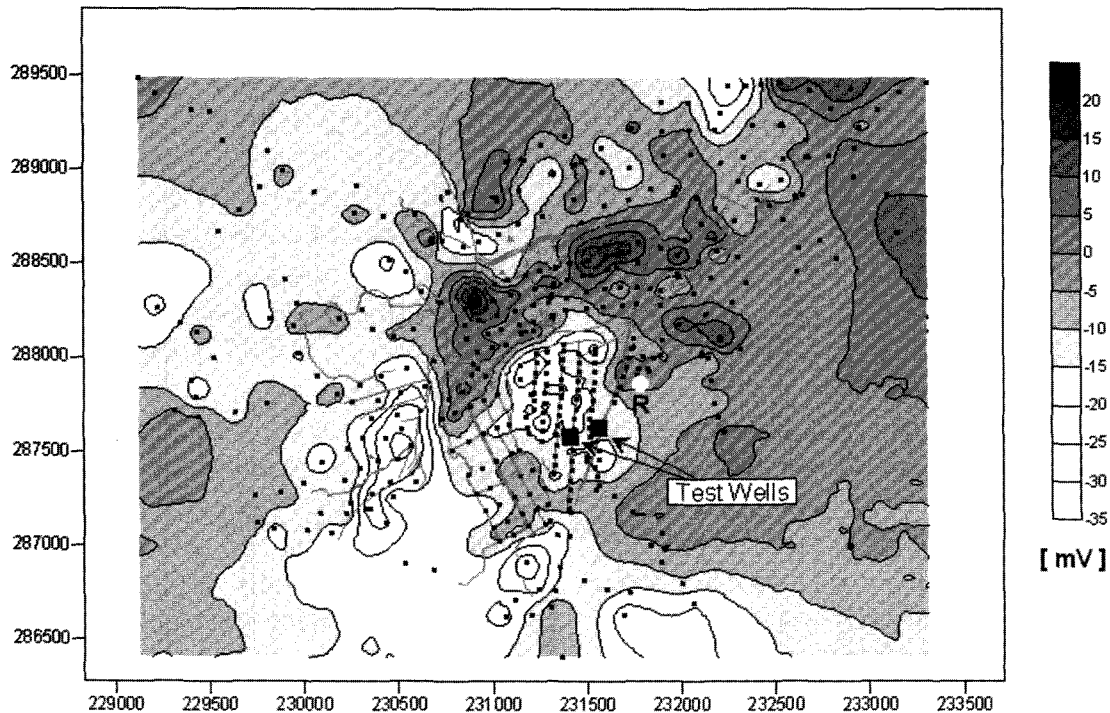


Fig. 4. Contour map of background SP measured before drilling. The positions of SP stations (black dot), the reference point (white dot with 'R'), and drilling site (black square) are also shown.

공 북쪽 지역으로의 지하수 흐름을 예상할 수 있다. 하지만 명확한 해석을 위해서는 지형 효과는 물론 전도성 매질, 토양의 화학적인 변화와 지질학적인 구조에 대한 연구 등이 필요하다 (Corwin and Hoover, 1979).

양수 시험과 SP 장기 관측

이론적으로 SP 장기 관측은 SP 이상을 일으키는 주요한 요인이 지열수 유동에 의한 전기역학적 전위라고 가정하면, 저류층의 모니터링(monitring)에 적용할 수 있다. 그러나 SP 장기 관측 자료를 해석할 만한 실용적인 방법이 없다. 또한 SP 장기 관측 자료를 해석하는데 있어서 어려운 것 중의 하나는 지표면의 SP를 변화시킬 수 있는 요인이 많다는 것이다. 이러한 것들로는 인공적인 잡음, 태양 활동에 의한 자기장의 변동, 강우 영향 등이며, 이들을 지하에서의 유체 흐름에 의해서 일어날 수 있는 SP 변화와 구분하는 것은 쉽지 않다. 일단 양수가 진행되면, SP 값에 영향을 미치는 두 가지 상반된 효과가 발생한다. 지표면을 기준으로 하향하는 액체상의 흐름은 SP 값의 감소를 야기하고 반면에 시추공 방향의 지열수 흐름은 SP 값의 증가를 일으킨다(Yasukawa *et al.*, 2002). 이러한 관점에서 보면 양수 시험 시에 발생하는 지하 저류층의 변화 양상과 주요한 흐름 방향은 SP 장기 관측으로 탐지가 가능하다.

SP 장기 관측은 두 번에 걸친 양수시험 기간 동안에 함께 실시하였는데, 1차는 2003년 12월 16일부터 2004년 1월 6일까지, 2차 모니터링은 2004년 3월 25일부터 4월 21일까지 수행하였다. 측정에 이용된 장비는 장기 모니터링용 다중 채널 자연전위 측정 시스템(multi-channel SP data monitoring system)으로 여러 측정에서 동시에 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 사용된 전극은 SP 특성을 고려하여 전극과 대지간의 간섭에 의해 발생하는 잡음(noise)의 영향을 최소화하기 위하여 비분극 전극을 사용하였다.

2003년 12월의 1차 양수시험은 당시 굴진 심도 1 km인 굴착공에서 실시하였는데, 사용된 수증 펌프의 성능은 40HP 30단이었으며, 심도 380 m에 설치하였다. 양수시험 결과는 양수가 진행됨에 따라서 지하수위가 낮아져서 양수량이 줄어들다가 양수 경과시간 70분 후부터는 오히려 양수량이 증가하기 시작하는 특징을 보였다. 2차 양수시험은 당시 굴진 심도 1.3 km인 굴착공에서 2004년 4월에 시행하였는데, 1차 양수시험보다 마력수가 증가한 60HP 27단의 수증펌프를 심도 400 m에 설치하였다. 또한 심부 지열수를 양수하기 위해서 4" 보조파이프를 수증펌프 하단에 400 m 길이로 연결하였다. 양수시험의 양수량을 결정하고 또한 시추 굴진 중에 사용되어서 스트레너 구간에 집적되어 있을 벤토나이트 성분을 씻어내기 위하여 총 5차례의 예비 양수시험을 대부분 2시간 정도로 짧게 실시하였는데, 양수량은 그다지 많지 않았다. 따라서 예비 양수시험으로 인한 SP 변화는 크지 않을 것으로 생각한다. 하지만,

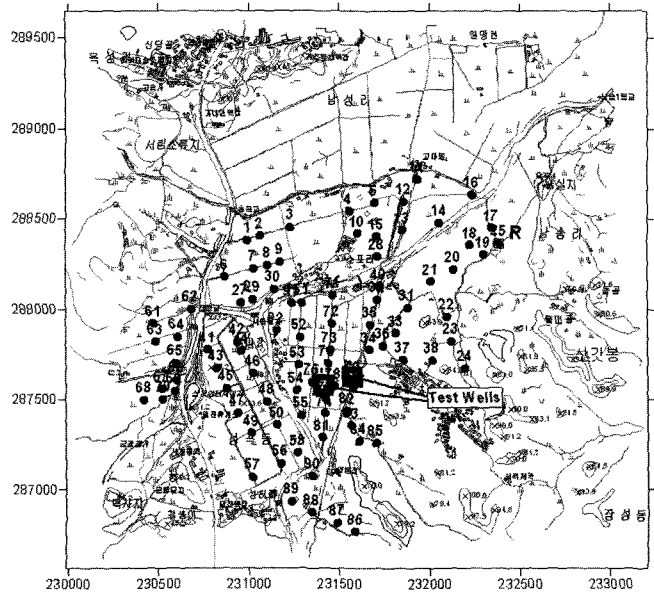


Fig. 5. Distribution of SP monitoring stations around the test wells. The reference point is denoted by 'R'.

여러 차례의 반복적인 예비 양수시험으로 시추공 내의 벤토나이트 성분으로 집적되어 막혀 있었던 부분이 떨어져 나간 영향으로 인한 빠른 지열수 흐름이 있다면 비교적 큰 SP 이상을 만들 것으로 생각한다. 2차 장기 양수시험은 이와 같은 예비 양수시험으로 인하여 지하수위가 상당히 낮아진 상황에서 72 시간 동안 수행하였다.

1차 양수시험 기간을 전후로 실시한 1차 SP 장기 관측 결과는 양수에 따른 변화가 미약하여 전체적으로 SP 변화 폭이 5 mV 이내로 외부의 잡음 혹은 일변화와 뚜렷하게 구분할 수 없었다(그림 생략). 이런 이유는 24시간의 짧은 양수 및 350 m³/d 내외의 적은 양수량으로 인하여 상대적으로 작은 지열수 유동에 의한 전기역학적 전위가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 또 다른 이유는 시추공 조사 및 다양한 불리탐사 방법으로 밝혀졌듯이 10 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 보이는 퇴적층이 360 m 두께로 상부를 피복하고 있어 지열수 유동에 의한 SP 효과가 이 퇴적층을 통과하며 심하게 감쇠된 결과로 해석된다.

1차 양수시험에 비해서 심도가 1.3 km로 증가한 후에 시행한 2차 양수시험 기간을 전후로 2차 SP 장기 관측이 이루어졌는데, 사용된 측정점은 총 88개였다(Fig. 5).

1차와는 달리 2차 SP 장기 관측 동안에는 여러 번의 예비 및 장기 양수시험을 통하여 지하수공의 수위 변화량, 지하수 온도 그리고 각종 지열수 분석 자료 등을 얻을 수 있었다(Fig. 7 참조). 2차 SP 장기 관측 자료 중의 몇몇 측정점들 중에서 일부를 중간값 필터(median filter)로 잡음을 간단히 제거하고 하루 단위로 Fig. 6에 나타내었다.

앞서 살펴본 바와 같이 상부에 전도성 매질이 두껍게 피복

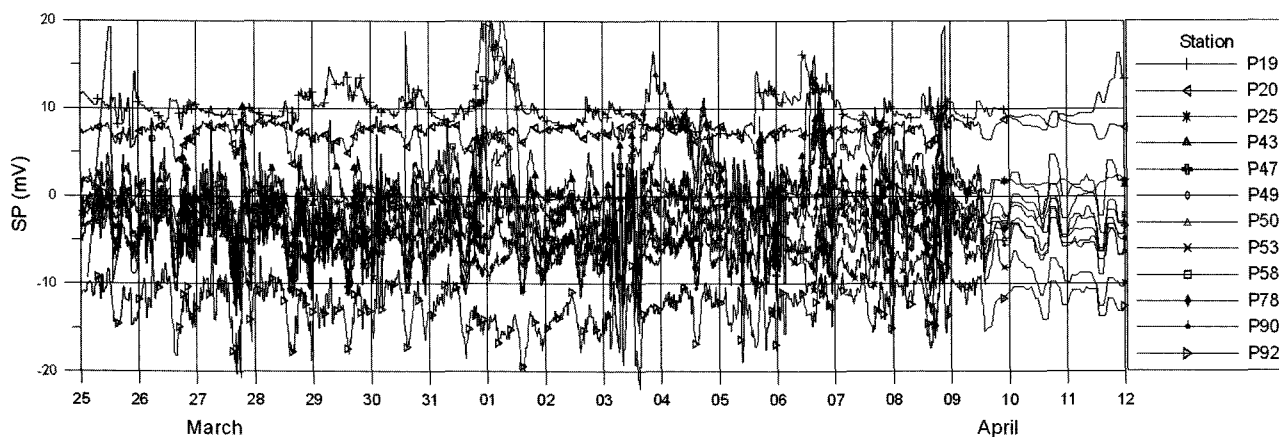


Fig. 6. SP time series observed in the period of second SP monitoring.

하고 있음에도 불구하고, 일부 지역의 몇몇 측정점에서 심부 저류층 변동 및 지하수 유동에 의한 영향으로 보이는 10 mV 이상의 비교적 큰 SP 변화가 예비 및 장기 양수시험 동안에 관측되었다. 이러한 1차와 다른 SP 변화는 여러 차례의 예비 및 장기 양수시험으로 비교적 많은 양의 지하수가 양수되었고, 또한 1차에 비하여 깊어진 시추공 심도로 인하여 보다 깊은 곳에서 저류층 변동이 크게 일어났기 때문이라고 생각된다.

비교적 큰 SP 변화가 Fig. 6에서 보이지만, 또한 하루 주기로 지자기 영향 등에 의한 일변화가 함께 나타나고 있다. 이러한 일변화 이외에도 기온, 강수, 토양수분함량 및 지중온도 등

의 현장 잡음요소가 복합적으로 작용하여 SP 효과를 일으키는 데(송성호, 2001), 양수시험 자료와 SP 장기 관측 자료를 비교하여 고찰하는 본 연구 방법에서는 이러한 작은 크기의 외부 잡음은 고려하지 않았다.

결과 및 고찰

2차 SP 장기 관측에서의 비교적 뚜렷한 SP 변화를 보이는 몇몇 측정점이 양수로 인한 영향이었던지를 알아보하고자 예비 및 장기 양수시험 분석 자료와 비교·고찰하여 보았다. SP 관

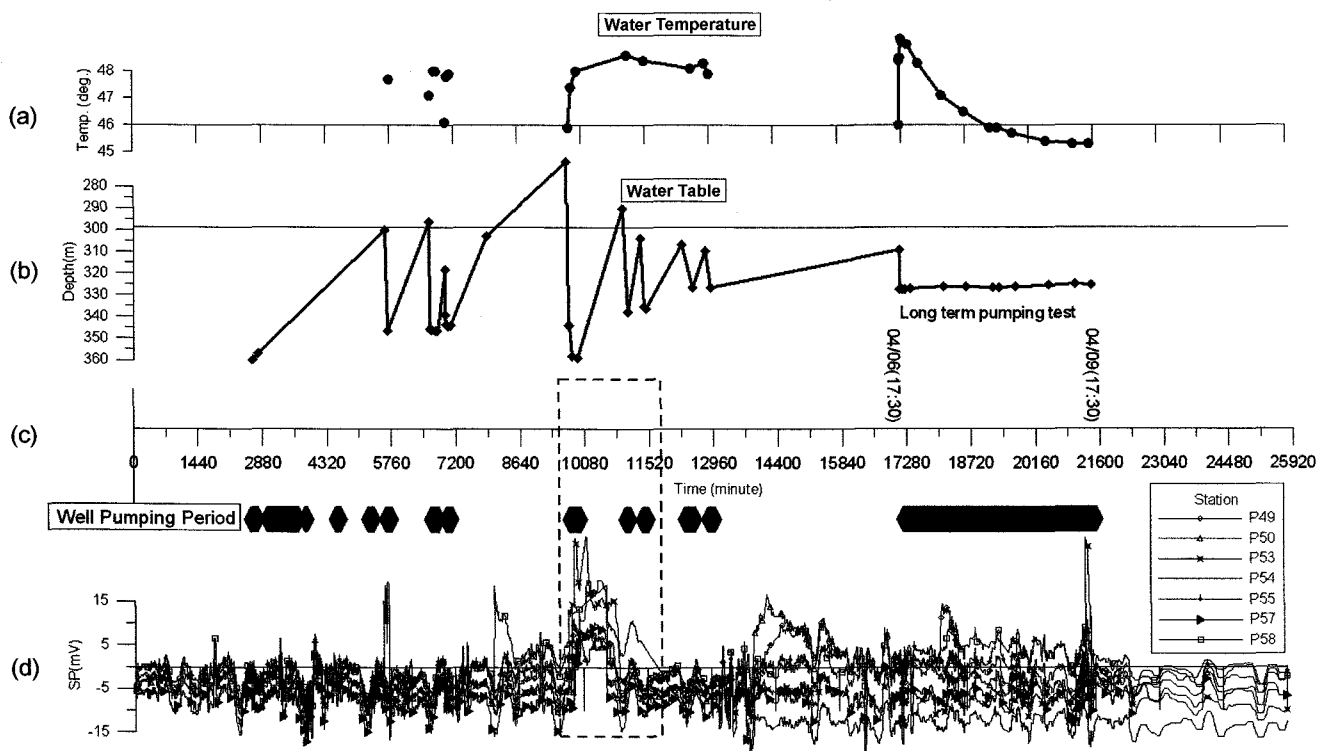


Fig. 7. SP responses of selected stations (d) along with the variation of water table (b) and water temperature (a) during pumping test (c).

측 자료에서 일정한 일변화를 보이며 이러한 일변화 영향을 제거한다는 것은 매우 어려운 일이다. 일변화에 의한 영향을 배제하는 한가지 방법으로 24시간 동안 얻어진 자료를 평균하여 오랜 기간의 전체적인 유동 양상을 파악하기도 한다. 여기에서는 중간 값 필터로 간단히 잡음을 제거한 SP 장기 관측 자료와 양수시험 결과를 비교하여 상관성을 알아보려고 하였다.

예비 및 장기 양수시험과 SP

SP 장기 관측 중에 실시한 예비 및 장기 양수시험으로부터 양수에 의한 지하수위와 지하수 온도의 시간적인 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 전체 표시 시간은 Fig. 6과 동일하며, 기준 시간인 0분은 3월 25일 19시로 하였다.

Fig. 7(d)는 비교적 크고 뚜렷하게 SP 변화를 보이는 측정들에서 얻은 자료를 나타낸 것이다. Fig. 7(c)의 양수한 구간과 SP 자료를 함께 비교하여 보면, 전체적인 SP 자료에서 양수 중, 양수 중단에 의한 직접적인 반응은 쉽게 구분되어 보이지 않는다. 이런 이유는 앞서 살펴본 바와 같이 시추공 주위의 상부를 전도성 매질이 두껍게 피복하고 있는 것과 짧은 양수 시간 때문인 것으로 생각한다. 그럼에도 불구하고, 예비 양수시험이 있었던 10,080분 시간대(Fig. 7의 점선으로 표시한 시간대)에서 SP 값이 크게 변함을 알 수 있었다. 9,726분에 양수하기 시작한 예비 양수시험에서는 지하수위가 제일 깊게 나타났고 수온도 이전과 비교하여 점차 상승하였다. 무엇보다도 일일 양수량이 많이 증가한 특징을 보였는데, 이러한 결과는 양수 자료와 몇몇 측정들에서 비교적 크게 변한 SP 변화 양상과 관련성이 있음을 의미한다. 전체 SP 장기 관측 자료 중에서 상기한 예비 양수시험 시간대에서 일어난 전체적인 SP 변화를 알아보려고 9,660분부터 5시간 간격으로 SP 분포도를 작성하여 Fig. 8에 도시하였다. 양수 시작하기 약 1시간 전인 (a)와 양수 후 약 4시간 후인 (b)를 비교하면 시추공의 남서부 지역에서 SP 증가가 뚜렷하게 보인다. 이러한 증가된 SP의 이상은 양수 24 시간 후까지(Fig. 8의 (f)) 유지되다가 이후에 양수하기 이전의 SP 분포도로 돌아옴을 볼 수 있다. 음의 이상에서 양의 이상으로 SP 이상의 뚜렷한 증가와 장 기간 동안 안정적으로 지속된 이러한 SP 변화 양상은 양수로 인한 심부 저류층 변동으로 발생하는 지열수 유동전위에 의한 것으로 생각된다. 전체 자료에서 살펴보면 SP가 큰 폭으로 변한 시간대는 2차 SP 장기 관측 기간 동안 몇 차례 더 관측되었다.

장기 양수시험과 SP

2차 SP 장기 관측 기간 동안에 72시간의 장기 양수시험이 시행되었다. 일반적으로 양수시험을 하면 현장에서 지하수위, 수온, 산화 환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 수소이온농도(pH) 등 양수 시간에 따른 다양한 지하수 자료를 얻게 된다. 본 절에서는 장기 양수시험 자료와 관측된 SP와의 상관성을 알아보려고 하였는데, 이를 위해서 양수시험에 따른 지하수 분석 자

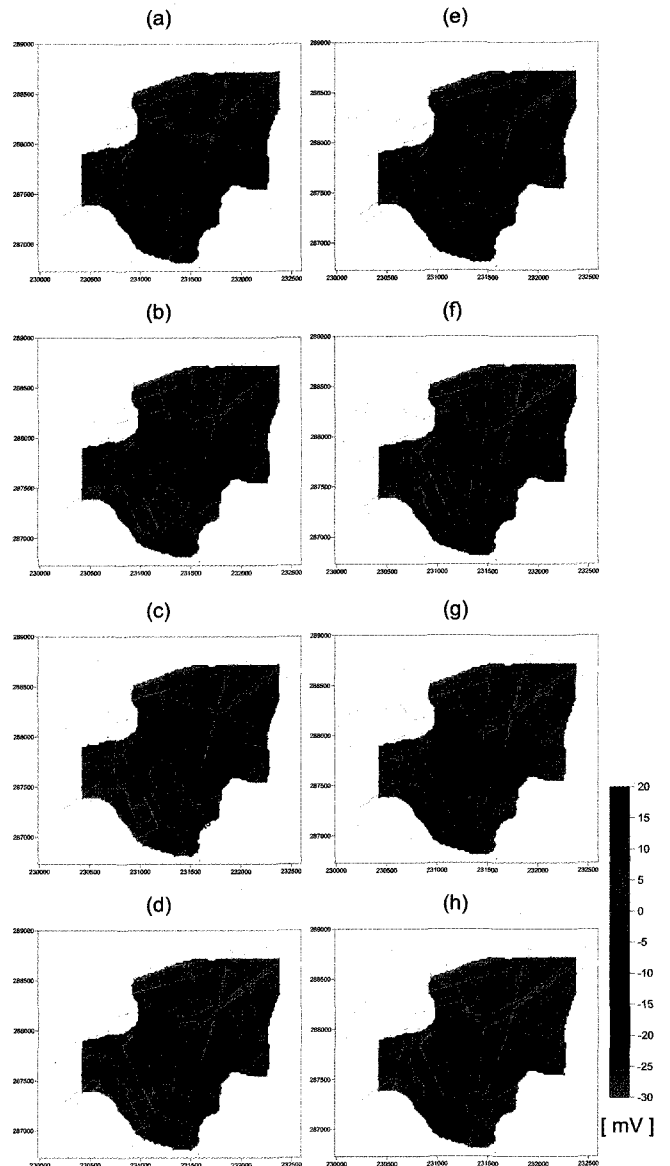


Fig. 8. Contour map of SP values at every 5 hours during preliminary pumping around 10,080 minutes. (a) 9,660, (b) 9,960, (c) 10,260, (d) 10,560, (e) 10,860, (f) 11,160, (g) 11,460, and (h) 11,760 min.

료와 동일 시간에 비교적 크게 SP 변화를 보인 측정들에서 얻은 자료를 함께 Fig. 9에 도시하였다.

장기 양수 시험은 17,190분에서 21,510분까지 실시하였다. 일반적으로 심부 지열수의 특징은 Eh가 낮고, 수온과 EC가 높다. 양수시험 동안에 얻은 지하수위, 수온, EC, Eh와 동일 시간에 얻은 SP를 비교하여 살펴보면, SP 변화가 비교적 크게 나타난 시간대는 17,900분 부근이다(Fig. 9의 점선으로 표시한 시간대). 특히, 이 시간대는 Eh는 낮아지고 EC가 소폭으로 다시 증가하는 양상을 보이는데, 이것은 양수로 인하여 시추공에 심부 지열수가 유입된 결과로 생각한다. Fig. 10은 장기 양수 시험 동안에 비교적 크게 SP 변화를 보인 지역을 나타낸 것

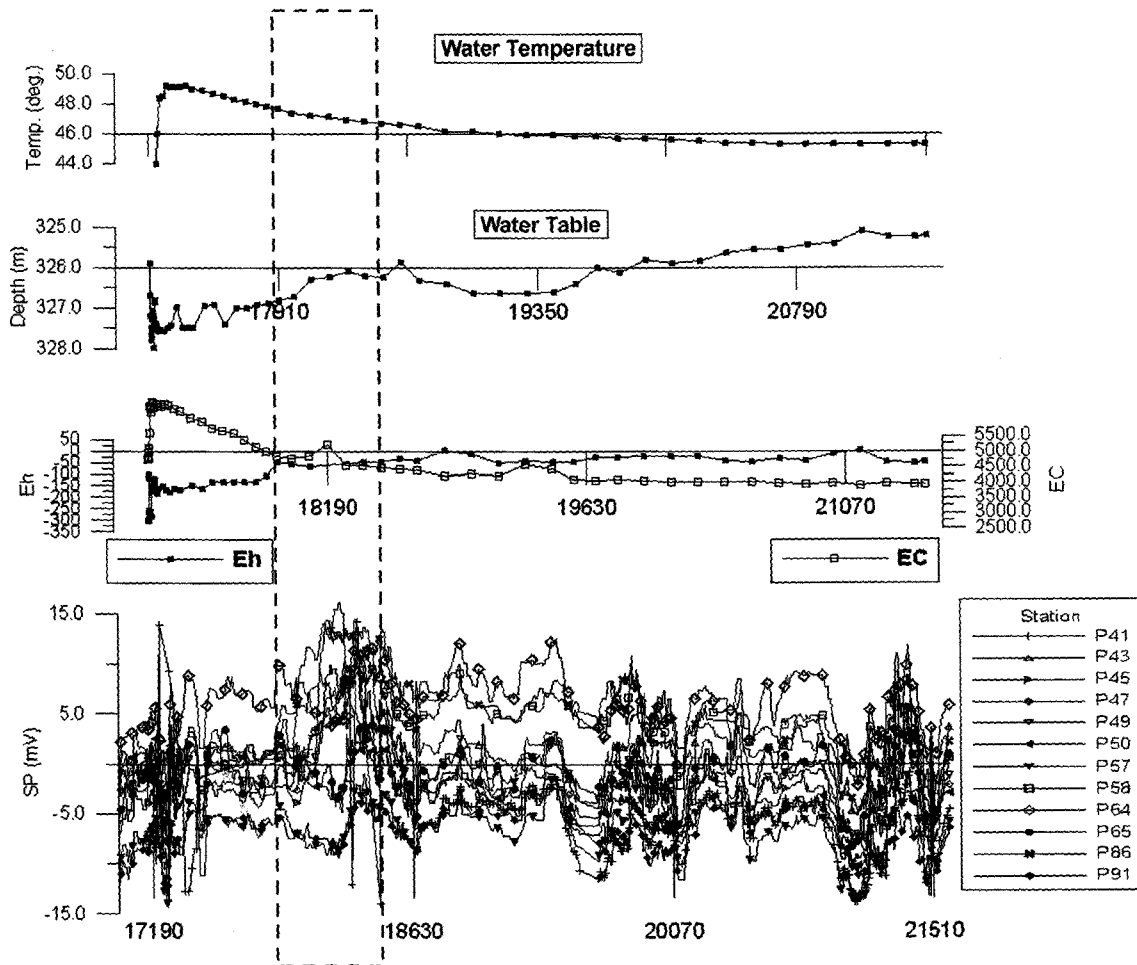


Fig. 9. Comparison between temperature, water table, EC, Eh, and SP during the second long-term pumping test.

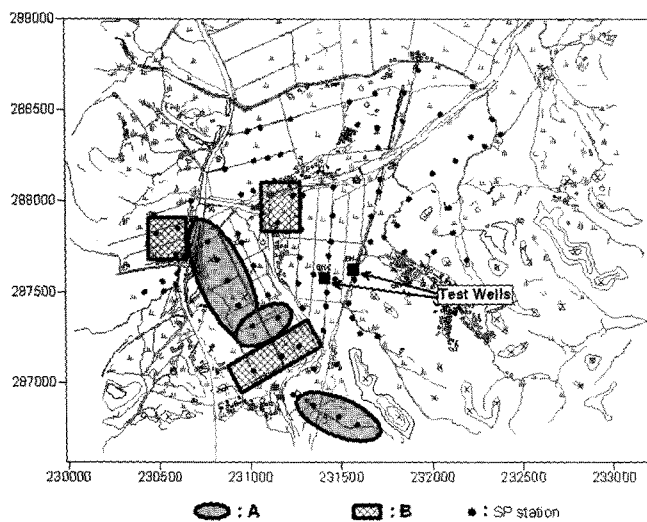


Fig. 10. Two types of Areas (A and B) showing similar SP changes between 17,900 min and 18,630 min during the second long-term pumping test.

이다.

양수시험 자료와 SP를 비교한 결과 수온과 EC가 소폭으로

커지기 시작한 순간에 SP가 증가하는 Fig. 10의 A 지역과 다시 수온과 EC가 작아지기 시작한 시간에 SP가 증가하는 Fig. 10의 B 지역으로 구분되었다. 이것은 조금 더 깊은 심도의 저류층 변동과 지열수 유동에 의한 SP 변화는 B 지역에서보다 A 지역에서 일어난 것으로 생각된다. 장기 양수시험 동안에 비교적 SP가 크게 변한 축점은 양수정을 중심으로 동쪽을 제외한 대부분 지역에 위치하고 있다. 이러한 원인은 양수로 인한 지열수 유동이 대부분 대상 지역의 수평적인 층 구조를 따라서 일어났기 때문이라고 생각한다.

SP 장기 관측 결과와 3-D MT탐사

앞서 설명한 바와 같이 대상 지역은 상부에 전도성 매질이 두껍게 존재하는 지질 특성을 갖는데, 이로 인하여 전체적으로 기대한 만큼 큰 변화는 보이지 않았다. 하지만, 2차 SP 장기 관측 자료와 양수시험 자료를 비교한 결과는 두 자료 사이에 좋은 상관성을 보이는 몇몇 축점들 확인할 수 있었다. 또한 전체적으로 보면 양수 시에 비교적 SP가 크게 변하는 몇몇 축점들이 나타났다. 지금까지 살펴본 바를 토대로 양수의 영향으로 비교적 크게 변했다고 여겨지는 SP 축점들이 위치한 모든 지

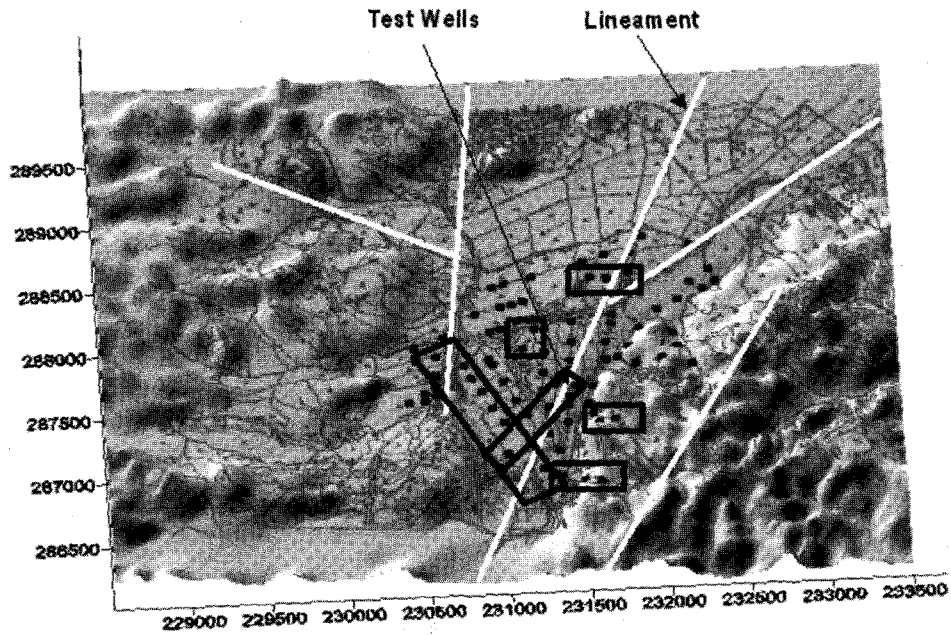


Fig. 11. A relation of lineaments (white lines) with areas (black rectangles) showing clear SP changes during the whole pumping test. SP stations are indicated by black dots.

역을 Fig. 11에 사각형으로 표시하였고, 여기에 앞서 살펴본 시험 시추공 주변의 선구조를 함께 도시하였다. 예비 양수시험 및 장기 양수시험 동안에 SP 변화가 비교적 뚜렷하게 보이는 곳은 양수정을 중심으로 동쪽을 제외한 대부분 지역에서 나타나고 있는데, 이러한 SP 반응은 대부분 함께 도시한 선구조의 방향과 다른 지역에서 보였다. 이것은 양수로 인한 지열수 흐름에 의한 전기역학적인 SP 효과가 선구조와 같은 방향으로 예상되는 수직적인 파쇄대가 아닌 수평적인 층을 따라서 여러 지역에서 발생하였기 때문이라고 해석된다. 특히, 예비 양수시험에서 양수정을 중심으로 남서부 지역에 위치한 측정점에서 SP가 양수시험 동안에 일정 기간 뚜렷하게 증가했다가 감소하였는데, 이 후의 장기 양수시험 동안에도 이와 비슷한 반응 양상이 같은 지역에서 반복하여 나타났다. 또한 이전에 수행한 MT탐사 자료의 3차원 역산 결과(송윤호 등, 2004)는 시추공을 중심으로 남서부 지역의 심도 600 m~1,000 m 범위에 걸쳐서 저비저항대가 발달함을 보였다. 따라서 SP 변화를 일으키는 지열수 흐름은 이러한 낮은 전기비저항대와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다.

그러나, 지금까지의 SP 장기 관측 결과에서는 배경 SP 탐사에서 나타난 바와 같은, 지열수 하강부에 해당하는 음의 SP 이상을 갖는 시추공의 남서쪽으로부터 상승부에 해당하는 양의 SP 이상을 갖는 북쪽 지역으로의 심부 지열수 흐름 즉, 수리 지질학적 연결성을 입증하지는 못한다. 이에 대한 보다 명확한 해석을 위해서는 더 깊은 심도의 시추공 굴착 및 계속적인 양수시험 기간 중의 SP 장기 관측을 수행한 결과와 주변 매질에 대한 지질학적인 정보를 이용한 SP 수치 모델링을 통하여 가능할 것이다.

결론

경북 포항의 심부 지열에너지 개발지역에서 시험 시추공을 중심으로 주변의 배경 SP 탐사를 실시하였고 또한 시추공 완공 후에 실시한 양수시험 동안에 SP 장기 관측을 시행하여, 심부 지열수 변동으로 인해 발생하는 유도전위로부터 지열수 거동 양상을 알아보고자 하였다. 양수시험 동안 얻어진 자료와 SP 관측 자료를 비교·고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

시험 시추공 공사가 시작되기 이전에 획득한 배경 SP 탐사에서 지하수의 순환 상승부에 해당한다고 볼 수 있는 양의 SP 이상이 시추공을 중심으로 북쪽에서 나타나고 있는 사실은 매우 흥미롭다.

1차 및 2차 양수시험 기간 동안에 실시한 SP 장기 관측 자료는 대상 지역의 상부가 전도성 매질로 두껍게 존재하는 지질학적인 특징으로 인하여 지표부근에서 심하게 감쇠가 일어나서 전체적으로 SP 값의 변화는 기대한 것보다 크게 나타나지 않았다. 하지만 2차 SP 장기 관측에서는 뚜렷한 변화를 보이는 몇몇 측정점을 확인할 수 있었으며, 양수시험 동안에 얻어진 EC, Eh 자료와 SP 관측 자료는 비교적 잘 일치하였다. 비교적 큰 폭으로 변하는 SP는 여러 방향의 측정점에서 동시에 관측되었는데, 이것은 지하 내부의 층서 구조를 따라서 지열수 유동이 일어난 결과로 해석된다. 이러한 지하 내부의 지열수 유동 양상과 밀접한 관련이 있는 SP 변화가 비교적 크고 뚜렷하게 나타나는 곳은 3-D MT 탐사 결과인 깊이 600 m~1,000 m의 낮은 전기비저항대와 비슷한 시추공을 중심으로한 남서부 지역인데, 지열수 유동에 의한 지열 저류층 변동이 이곳에

서 집중적으로 일어났으며 수리지질학적으로 연결되어 있다고 추정된다. 하지만, 배경 SP 탐사에서 양의 SP 이상을 보인 시추공 북쪽지역으로의 연결성과 지열수 흐름 양상은 분명하지 않다.

앞으로 대상 지역에 대한 많은 지질학적인 정보와 다양한 물리탐사 자료 등을 토대로 수치 모델링 등을 적용한다면 시추공 주위에서의 지열수 유동양상에 대한 좀 더 명확한 해석이 이루어질 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 일반사업인 심부 지열에너지 개발사업 결과 중의 일부분이다.

참고문헌

- 송성호, 2001, 자연전위법을 이용한 수리지질물 누수 탐지, 교육학 박사학위논문, 서울대학교.
- 송윤호, 이태중, 이성근, Uchida, T., Mitsuhashi, Y., and Graham, G. B., 2004, 포항 지역 지열개발을 위한 3차원 MT 탐사, 대한지구물리탐사학회/한국물리탐사학회 공동학술대회, 한국해양연구원, 260-265.
- Corwin, R. F., and Hoover, D. B., 1979, The self-potential method in geothermal exploration, *Geophysics*, **44**, 226-245.
- Corwin, R. F., and Morrison, H. F., 1977, Self-potential variations preceding earthquakes in central California, *Geophys. Res. Lett.*, **4**, 171-174.
- de Groot, S. R., and Mazur, P., 1962, *Non-Equilibrium Thermodynamics*, North-Holland, New York, 405-452.
- Ishido, T., 1981, Streaming potential associated with hydrothermal convection in the crust: a possible mechanism of self-potential anomalies in geothermal areas (in Jap., with Engl. Abstr.), *J. Geotherm. Res. Soc. Jpn.*, **3**, 87-100.
- Ishido, T., 1989, Self-potential generation by subsurface water flow through electrokinetic coupling, in *Detection of Subsurface Flow Phenomena*, Lecture Notes in Earth Sciences, **27**, edited by G.-P. Merkler *et al.*, 121-131, Springer-Verlag, New York.
- Ishido, T., Kikuchi, T., and Sugihara, M., 1989, Mapping thermally driven upflows by the self-potential method. in: *Hydrogeological regimes and their subsurface thermal effects*, *Geophys. Monogr.*, 47, IUGG Vol. 2, A.E. Beck *et al.* (Eds), AGU, 151-158.
- Ishido, T., and Pritchett, J. W., 1996, Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow. In: *Proc. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 143-149.
- Lee, D. S., 1977, Chemical composition of petrographic assemblages of igneous and related rocks in south Korea, *J. Korea. Inst. Mining Geol.*, **10**, 75-92.
- Matsushima, N., Kikuchi, T., Tosha, T., Nakao, S., Yano, Y., and Ishido, T., 2000, Repeat SP measurements at the Sumikawa geothermal field, Japan, In: *Proc. World Geothermal Congress*, Kyushu-Tohoku, Japan, 2725-2730.
- Onsager, L., 1931. Reciprocal relations in irreversible processes. 1, *Physical Review*, **37**, 405-426.
- Sill, W. R., 1982, *Self-potential effects due to hydrothermal convection-velocity crosscoupling*, DOE/ID/12079-68.
- Sill, W. R., 1983, Self-potential modeling from primary flows, *Geophysics*, **48**, 76-86.
- Yasukawa, K., Bodvarsson, G. S., and Wilt, M., 1993, A coupled self-potential and mass-heat flow code for geothermal applications, *Trans. Geotherm. Resour. Council.*, **17**, 203-207.
- Yasukawa, K. and Mogi, T., 1998, Topographic effects on SP anomaly caused by subsurface fluid flow - numerical approach -. *Butsuri-Tansa*, **51**, 17-26. (in Japanese with English abstract)
- Yasukawa, K., Andan, A., Kusuma, D. S., Uchida, T., and Kikuchi, T., 2002, Self-potential mapping of the Mataloko and Nage geothermal fields, central Flores, Indonesia for applications on reservoir modeling, *Bull., Geological Survey of Japan*, **53**, 285-294.
- Yasukawa, K., Kusdinar, E., and Muraoka, H., 2002, Reservoir response to a well test identified through a self-potential monitoring at the Mataloko geothermal field, central Flores, Indonesia, *Bull., Geological Survey of Japan*, **53**, 355-363.
- Yasukawa, K., Mogi, T., Widarto, D., and Ehara, S., 2003, Numerical modeling of a hydrothermal system around Waita volcano, Kyushu, Japan, based on resistivity and self-potential survey results, *Geothermics*, **32**, 21-46.