

포항 지열개발지역에서의 SP 장기 관측

임성근*, 이태중*, 조병욱*, 송성호**, Kasumi Yasukawa***, 송윤호*

*: 한국지질자원연구원

** : 농업기반공사 농어촌연구원

*** : Geological Survey of Japan AIST

1. 서론

포항 지열개발지역에서 자연전위(Self-Potential; SP) 탐사를 수행하고 양수시험을 하는 동안 발생하는 심부의 지열수 유동 변화를 탐지할 목적으로 장기간에 걸친 SP 모니터링을 실시하였다. 심부 시추 작업이 시작되기 이전에 대상 지역의 자연전위의 분포를 알아보기 위하여 SP 탐사를 세 번에 걸쳐서 수행하였다. 또한 128 채널 자동 SP 측정 시스템을 이용하여 1 km 심도 시추 후 2003년 12월에 시행한 1 일간의 시험 양수와 1.3 km 심도 시추 후 2004년 3월에 시행한 3일간의 양수 시험 기간 동안에 장기 관측을 하였다.

이 지역은 10 ohm-m의 낮은 전기비저항을 보이는 제 3기 퇴적층이 약 400 m 두께로 덮혀 있는데, 이로 인하여 심부의 지열수 흐름에 의해서 발생하는 유동 전위는 지표 부근에서 심하게 감쇠할 것이다. 또한 지표 토양의 상태, 일변화, 온도의 변화 등이 잡음으로 작용하여 양수 시에 on/off에 의한 유동전위의 효과는 뚜렷하게 구분되지 않는다. 하지만 지하수위의 변화와 양수된 온도를 SP 자료와 비교한 결과 양수 시험의 작동 여부에 따라서 반응하는 일정 지역내의 몇몇 측정점들을 확인할 수 있었다.

2. 본론

2-1. 배경 SP 탐사

포항 지열개발지역에서 심부 시추 작업을 시작하기 전에 두 번에 걸쳐서 시추 예정 지역을 중심으로 반경 약 1-2 km 정도의 범위에 걸쳐 측정 간격 100-150 m 간격으로 SP 탐사를 수행하였다. 하나의 전극을 조사 지역의 영향이 미치지 못하는 원거리에 설치하여 이를 자연전위의 기점으로 설정하고, 나머지 한 전극을 각 측정점으로 이동시키면서 기준점에 대한 상대적인 전위차를 측정하는 절대 전위 측정법을 이용하여 총 400 여 곳에서 자료를 획득하였다. 시험 시추공 위치를 중심으로 한 대상 지역에서 측정한 SP 값들을 Fig. 1에 나타내었다.

지열수 유동의 효과에 대한 Ishido(1981)의 정량적인 모델은 지열수의 순환으로 인하여 발생하는 대부분의 유동전위가 지표면에서 양의 이상으로 관측된다는 사실을 보여주었다. 따라서 지열 대상 지역에서 SP 분포는 다소 복잡한 면은 있지만 지열수의 상승 영역에 대한 지시자로 사용하고 있다. 이를 근거로 Fig. 1을 살펴보면, 시추공을 중심으로 나타나는

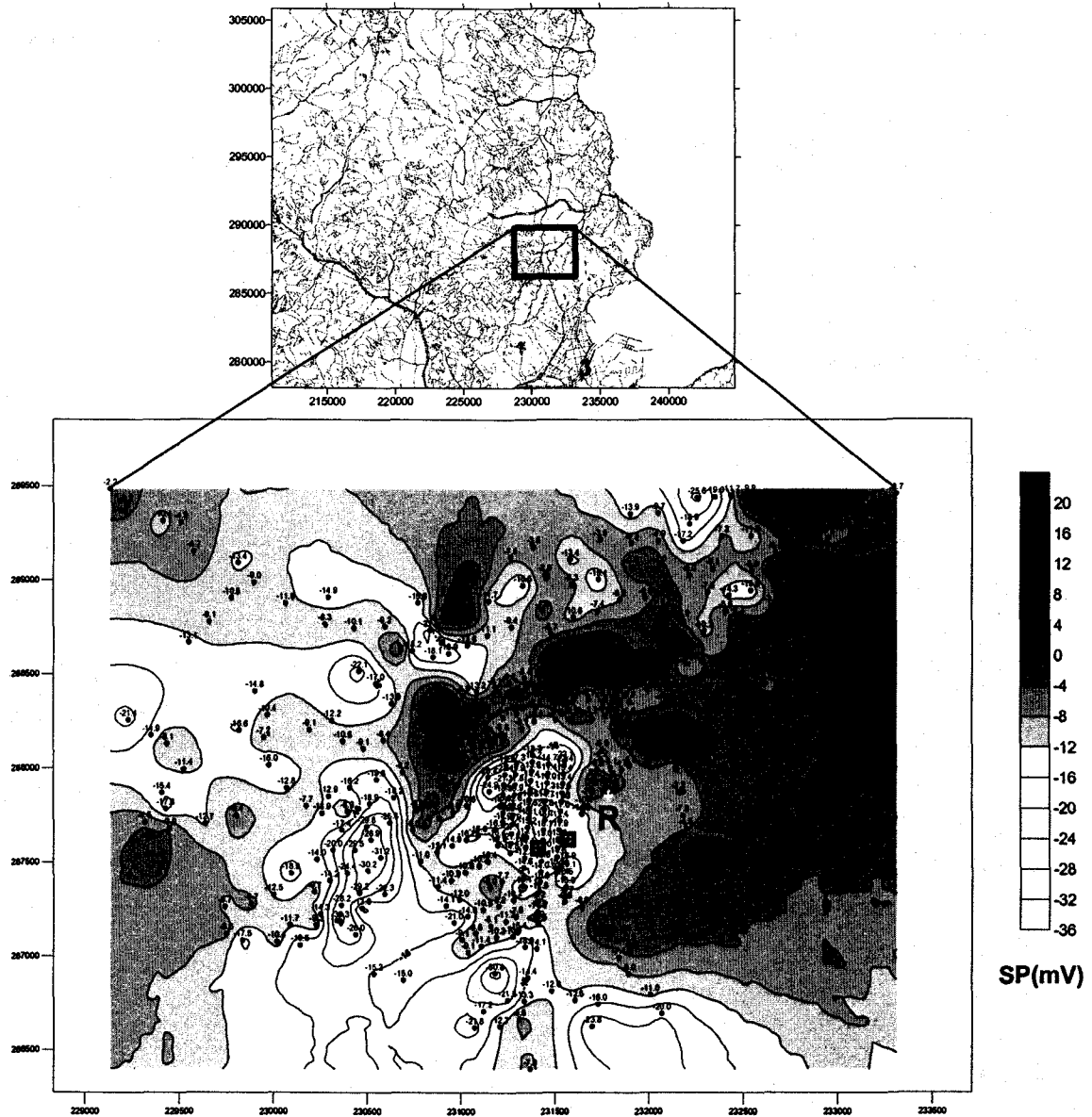


Fig. 1. Contour map of SP measurements superimposed on the survey station map (dots) in Pohang. Reference point is located in the center of map as 'R'.

음의 이상 영역과 시추공에서 북쪽으로 나타나는 양의 이상 영역을 구분할 수 있다. 하지만 이에 대한 명확한 해석을 위해서는 보다 많은 다른 배경 자료와 연구 조사가 필요하다.

2-2. 양수시험

양수시험은 지하수공이 관통하고 있는 대수층의 수리적 특성(투수량계수, 저류계수, 적정채수량 등)을 파악하기 위하여 실시하는 수리시험이다. 투수량계수와 저류계수를 산출하기 위해서는 통상 일정량 양수시험(constant pumping rate)을 실시하고, 적정양수량을

계산하기 위해서는 단계양수시험(step drawdown pumping test) 또는 일정량을 장기간 양수하기도 한다. 단계양수시험은 여러 단계의 양수량으로 양수시 각 양수량 단계의 수위강하량을 측정하여 적정양수량을 산정하는 방법이다.

1차 양수 시험은 2003년 12월에 24시간 동안 constant decreasing 방법으로 시행하였다. 양수가 진행됨에 따라서 지하수위가 낮아지기 때문에 양수량은 서서히 줄어드는데, 양수 경과시간 70분 후부터는 오히려 양수량이 증가하기 시작하는 특징을 보였다. 2004년 4월의 2차 양수시험을 실시하기 전에 양수시의 양수량을 결정하기 위하여 예비양수시험을 실시하였다. 2차 양수 시험은 여러 번의 예비양수시험으로 지하수위가 상당히 낮아진 상황에서 72시간 동안 수행하였다. 예비 양수시험시의 지하수위와 양수량을 비교할 때 본 양수시험 시에는 양수량이 더 증가하였고 이에 따라 지하수위는 상승하였다.

2-3. SP 장기 관측

이론적으로 SP 장기 관측은 SP 이상을 일으키는 주요한 요인이 유동 전위라고 가정하면, 지열 저류층(reservoir)의 모니터링에 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, 태양광 활동에 의한 자기장의 변동, 강우 영향 등이며 지하에서 유체 흐름에 의해서 일어날 수 있는 SP 변화와 구분하는 것은 쉽지 않다.

포항 지열개발지역은 2002년 11월부터 광범위한 지구물리화학적 방법으로 조사가

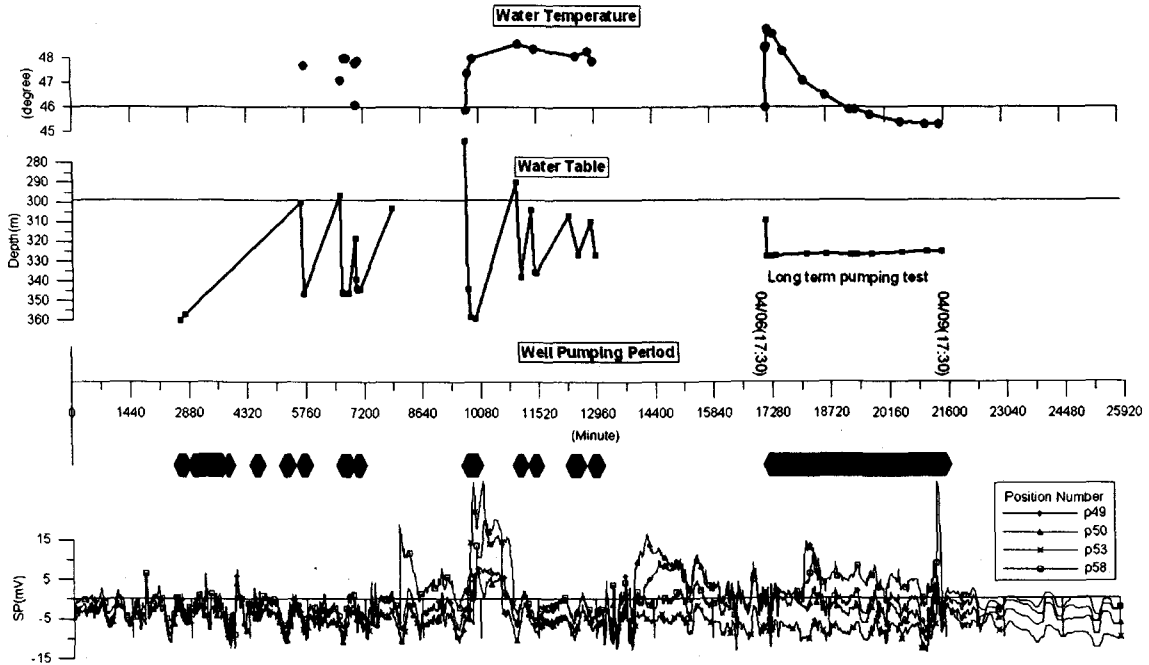


Fig. 2. SP responses in several channels along with water table and water temperature variation during second pumping test.

이루어졌으며, 양수 시험을 위한 1.3 km 심도 시추공과 모니터링을 위한 1.1 km 심도 시추공이 165 m 정도 거리를 두고 위치하고 있다. SP 장기 관측은 1차와 2차의 양수 시험 기간 동안에 실시하였는데, 1차 모니터링은 2003년 12월 16일부터 2004년 1월 6일까지, 2차 모니터링은 2004년 3월 25일부터 4월 21일까지 수행하였다. 이 연구에서 자연전위 측정을 위한 장치는 이미 저수지와 같은 구조물에서 누수 유로의 탐지 등에 적용된 128 채널 장기 모니터링용 자연전위 측정 시스템을 이용하였다(송성호, 2001). SP 장기 관측은 양수 시작 및 종료로 인한 저류층의 변동으로 발생하는 지열수 유동계의 변화 양상을 탐지할 목적으로 수행하였다. 1차 SP 장기 관측에 사용된 측점은 양수 시험을 위한 시추공 주위로 총 107개 채널이었다. SP 측정 결과인 Fig. 1을 살펴보면, 양수 시작과 동시에 약간의 값의 진폭은 있었지만 양수 중간과 양수 종료 후에도 변화가 미약하였다. 이는 24 시간의 짧은 양수 시험 및 적은 양수량(350 ton/day 내외)으로 인하여 심부 저류층에 대한 심각한 변화는 발생시키지 않아 상대적으로 작은 유동 전위를 일으켰을 것이며, 또한 10 ohm-m의 낮은 전기비저항을 보이는 퇴적암이 400 m 두께로 덮혀 있는 영향으로 유체의 유동에 의한 자연전위가 지표 부근에서 감쇠되어 버린 결과로 풀이된다.

2차 SP 장기 관측에 사용된 측점은 총 88개 채널이었다. 2차 양수 시험을 하기 전에 여러 차례의 예비 양수 시험을 시행하였는데 이로부터 시추공 및 주변에 있는 지하수공의 수위 변화량, 그리고 양수 표출 온도의 변화 등을 알 수 있었다. 2차 SP 모니터링 자료는 중간값 필터로 잡음을 간단히 제거하였고, 이와 함께 양수 시험으로부터 얻어진 자료를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 그래프에 나타낸 자료는 모니터링 자료 중에서 변화량이 크고 분명한 대표적인 자료들이며, 3월 25일 19시를 0분 기준점으로 하여 분단위로 도시한 것이다. 일단 양수가 진행되면, SP 값에 영향을 미치는 두 가지 상반된 효과가 발생한다. 지표면을 기준으로 하향하는 액체상의 흐름은 SP 값의 감소를 야기하고 반면에 시추공으로 향하는 지열수 흐름은 SP 값의 증가를 일으킨다(Yasukawa et al., 2002). 이와 같은 사실을 바탕으로 Fig. 2를 살펴보면, 시추공 양수로 인하여 지하수위가 높은 곳과 양수 표출 온도가 높은 곳을 중심으로 SP 값이 갑작스럽게 큰 폭으로 변하고 있음을 알 수 있다. 2차 SP 장기 모니터링 자료 중에서 예비 양수시험 및 양수시험 동안에 양수 영향으로 판단되는 SP 변화가 보이기 시작 하기 직전부터 5 시간 간격으로 SP 분포도를 작성하여 Fig. 3에 도시하였다. 여기서 2차 양수 시험은 9,726 분에 시작하였다. 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. 3의 (f)) 유지되다가 (e)와 거의 비슷하게 양수하기 이전 SP 분포도로 돌아옴을 볼 수 있다. 음의 이상에서 양의 이상으로 SP 이상의 뚜렷한 증가와 상당한 기간동안 안정적으로 지속된 이러한 양상은 양수로 인하여 저류층이 변동을 일으켜서 발생하는 지하수 유동전위에 의한 것으로 생각된다. 1차 및 2차 장기 모니터링을 종합하여 살펴보면, 앞서 설명한 바와 같이 상부에 두꺼운 전도성 매질로 인하여 전체적으로 큰 변화의 폭은 보이지 않지만 Fig. 4에 닫힌 원으로 표시한 것과 같이 시추공을 중심으로 특히 남서부 지역에서 양수를 시작한 후에 뚜렷한 SP 반응 값을 보였다. 이러한 SP 반응을 보이는 지역은 이전에 수행한 MT탐사 자료의 3차원 역산 결과인(송윤호 등, 2004) 600 m-1,000 m 범위에 걸친 저비저항대와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각한다.

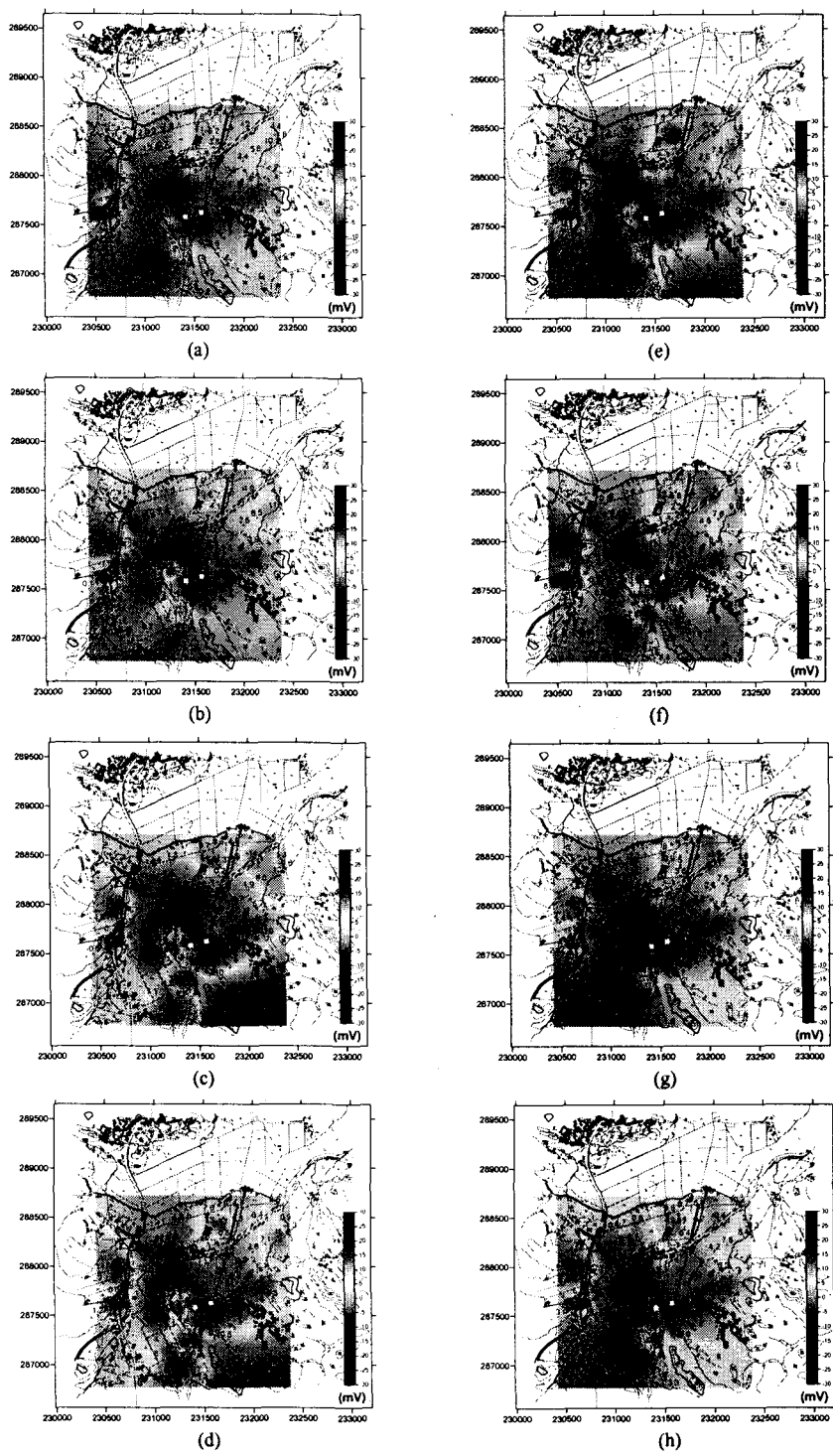


Fig.3. SP distribution at the time of (a) 9,660, (b) 9,960, (c) 10,260, (d) 10,560 (e) 10,860, (f) 11,160, (g) 11,460 and (h) 11,760 min.

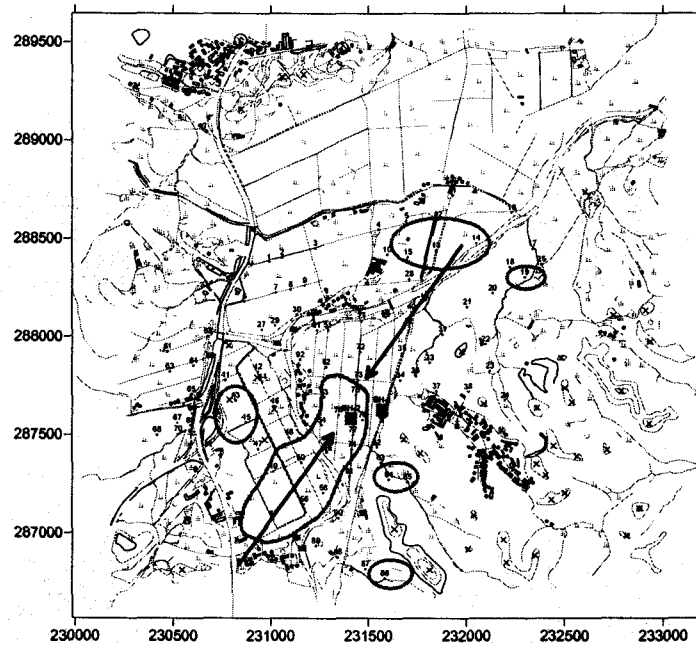


Fig. 4. Survey stations and areas showing clear changes in SP (closed circle).

3. 결론

1차 및 2차 양수시험 기간을 전후로 실시한 SP 장기 관측을 실시한 결과는 대상 지역의 상부가 두꺼운 전도성 매질로 덮혀있는 지질학적인 요인 등에 의하여 지하수의 유동에 의한 SP 값의 변화량은 기대보다 크게 나타나지 않았다. 하지만 몇몇 측점에서 나타나는 SP 값은 지하수위의 변화와 양수시험 시의 지열수 온도의 변화 양상과 밀접한 관련성을 가진다. 양수시험 동안에 SP 값의 변화량이 비교적 크고 확실하게 나타나는 곳은 시추공을 중심으로 남서부 지역인데, 지열수 유동에 의한 저류층의 변동이 이 곳에서 집중적으로 일어났으며 수리지질학적으로 연결되어 있음을 생각할 수 있다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 일반사업인 심부 지열에너지 개발사업 결과 중의 일부분이다.

참고문헌

1. 송성호, 2001, 자연전위법을 이용한 수리지질물 누수 탐지: 교육학박사학위논문, 서울대학교.
2. 송윤호, 이태종, 이성곤, Uchida, T., Mitsuata, Y., and Graham, G. B., 2004, 포항 지역

지열개발을 위한 3차원 MT 탐사, 이번 학술발표회.

3. Ishido, T., 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, 1981.

4. Yasukawa, K., Ishido, T., Suzuki, I., Kusdinar, E., Takahashi, M., Muraoka., H., 2002, Geothermal reservoir monitoring by continuous self-potential measurements : Proceedings 24th NZ Geothermal Workshop.