

포항 지열 개발지역에서의 지열 저류층에 대한 SP 모델링

임성근, 이태종, 송윤호, Kasumi Yasukawa*, 송영수**

한국지질자원연구원(KIGAM), *일본산업기술총합연구소(AIST), **전북대학교 자원·에너지공학과
(sklim@kis.kigam.re.kr)

<요약문>

Self-potential (SP) survey was carried out at Pohang geothermal field. SP measurement showed clear positive anomaly at northern part of the test wells, which can be a up-flow zone of the deep geothermal water due to electrokinetic potential generated by hydrothermal circulation. To give a clearer image of the fluid flow pattern around the test wells, a two-dimensional numerical simulation was applied to construct a numerical block model of the fluid flow system based on SP and magnetotelluric survey results. The result suggests existence of two high permeability zones including the main manifestation area in the northern part of the test wells.

key word : self-potential, geothermal, electrokinetic, simulation, permeability

1. 서론

자연전위(Self-potential; SP) 탐사는 지열 개발 지역에서 폭넓게 이용되어 왔으며, 최근 우리나라 경우에는 인공적으로 축조된 수리시설물에서의 누수 탐지 등에 적용되고 있다(송성호, 2001; Yasukawa *et al.*, 2002). 그러나 SP 자료의 해석에 있어서는 대부분 단순한 정성적인 해석이 주로 이루어지는데, 예를 들면 양의 SP 이상은 유출(discharge) 영역으로, 음의 SP 이상은 유입(recharge) 영역으로 해석된다(Ishido, 1989). 그러나 이러한 큰 SP 이상이 단순히 유체의 흐름에 의한 것이라고 간주하기에는 다소 무리가 있는데, SP 이상에 영향을 미치는 요인 중 천부의 지질구조의 불균질성(heterogeneity) 등도 크게 영향을 미치기 때문이다(Yasukawa *et al.*, 1993). 따라서 수리지질학적 요소 뿐 아니라 전기비저항 구조 등도 함께 고려하는 SP 자료 해석은 매우 중요하다(Yasukawa and Mogi, 1998).

본 연구에서는 포항 지열 개발지역에서 심부 시추공사가 시작되기 이전에 자연전위 탐사를 수행하고 시추공 주변에 대한 SP 분포를 구하였다. 이때 측정된 SP 자료에서는 시추공을 중심으로 북쪽 지역에서 뚜렷한 양의 이상을 보였다. 이러한 SP 반응의 좀더 정량적인 해석을 위하여 이 SP 이상을 포함한 남북 방향 축선을 설정하고 이 축선에 대한 2차원 SP 수치 모델링을 수행하였다. 즉, SP 관측 자료와 자기지전류(magnetotelluric, MT) 탐사 결과 얻어진 지하의 전기비저항 구조를 기초로 하여 유체 흐름에 대한 수치적인 격자 모델을 만들고 2차원 SP 모델링을 수행함으로써, 결과적으로 시험 시추공 주변에 대한 지열수 흐름 양상 및 지열 저류층(reservoir) 순환계의 특성을 파악하고자 하였다.

2. 본론

2-1. 배경 SP 탐사

포항 지열개발지역에서 심부 시추 작업이 시작되기 이전에 시추 예정 지역을 중심으로 반경 약 1~2 km 정도의 범위에 걸쳐 측점 간격 100~150 m 간격으로 SP 탐사를 수행하였다. 하나의 전극을 비교적 잡음으로부터 자유로운 곳에 위치시켜 이를 자연전위의 기점으로 설정하고, 나머지 한 전극을 각 측정점으로 이동시키면서 기준점에 대한 상대적인 전위차를 측정하는 방식으로 측정이 이루어졌으며 총 386 측정점에서 자료를 획득하였다. 시험 시추공을 중심으로 하여 연구 대상지역에서 측정한 배경 SP 탐사 결과를 그림 1에 도시하였다. 특징적인 사실은 지열수의 상승 영역으로 생각되는 양의 SP 이상이 시추공을 중심으로 북쪽에서 나타나고 있다는 사실이다. 하지만 이에 대한 명확한 해석을 위해서는 보다 많은 지질학적인 자료 및 연구 조사가 필요하다. 본 연구에서는 이에 대해 좀더 정량적인 해석을 위하여 그림 1에 표시된 측선 A-A'의 SP 반응 및 같은 위치에서 수행된 MT 탐사로부터 얻어진 지하의 전기비저항 구조를 기초로 하여 2차원 SP 모델링을 수행하였다.

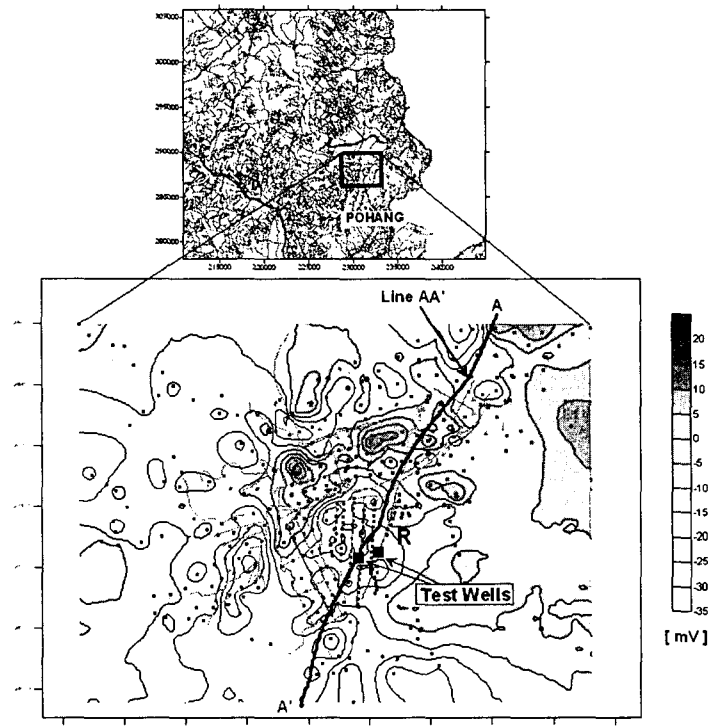


Fig. 1. The location and contour map of SP measurement, which is performed before the drilling. The positions of SP stations (black dot), the reference point (white dot with 'R'), and drilling site (black square) are superimposed.

2-2. SP 수치 모델링

2차원 SP 모델링을 위해 본 연구에서는 PTSP 시뮬레이션 프로그램(Yasukawa *et al.*, 1993)을 이용하였다. 모델링에서는 우선 모델내의 온도와 압력의 분포를 적절한 경계 조건에 대한 에너지 보존 법칙과 질량 보존의 법칙에 기초하여 계산되고 이로부터 모델내의 유체 속도의 분포가 구해지고 나면 유체 흐름에 의해서 발생하는 전류원(current source) 분포는 이 속도 분포와 전기 역학적인(electrokinetic) 상호결합 계수(cross-coupling coefficient)에 대한 다음과 같은 관계식으로부터 구하여 진다.

$$S = -\nabla L_v \cdot u - L_v \nabla \cdot u$$

여기서 S , L_v 그리고 u 는 각각 전류밀도, 속도 상호결합 계수(velocity cross-coupling coefficient) 그리고 유체의 속도장(velocity field)이다. PTSP의 계산에 필요한 입력 자료는 투수율, 전기비저항, 속도 상호결합 계수, 그리고 경계 조건이다. 최종적으로 SP는 주어진 전기비저항 구조로부터 계산되어진다. 이 연구에 이용된 PTSP 시뮬레이션 상에서 압력과 지표 온도 분포(1 atm, 20°C)를 일정하게 주었고 깊이에 따른 온도 분포는 연구 대상 지역에 맞는 지온 증가율(40°C/km)을 고려하여 초기 조건으로 주었다. 모델 계산에 사용된 격자 크기는 가로, 세로 방향으로 각각 100 m, 200 m로 설정하였다. 본 PTSP 시뮬레이션을 통하여 얻어지는 SP는 오직 모델의 전기비저항 및 투수율 분포 특성에 의해서만 발생한다고 가정하였다.

이 연구에서는 시험 시추공 주변의 배경 SP 자료에서 한 측선(Fig. 1의 A-A')을 2차원 모델로 설정하여 PTSP 프로그램을 이용한 지열 저류층의 유동 양상에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 포항 지열개발 지역은 2002년 10월부터 다양한 지질학적, 지구물리학적 방법으로 광범위하게 조사되었다. 이 중 3차원 MT 탐사 및 최근의 심부 시추 작업을 통하여 확인된 지질학적인 가장 큰 특징은 10 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항을 보이는 제 3기 미고결 퇴적층이 약 360 m 두께로 상부를 피복하고 있으며 이 층은 남쪽에서는 이보다 두껍고 북쪽으로 갈수록 얇아진다는 것이다.

SP 수치 모델링 계산에 이용한 전기비저항 모델은 시추공 주변에서 시행되었던 2차원 및 3차원 MT 탐사의 결과(송운호 등, 2004) 얻어진 전기비저항 구조를 중심으로 시추결과와 지질조사 결과를 참고하여 구성하였다(Fig. 2). 한편, 2차원 투수율 모델의 구조 및 물성은 주로 검층 자료 및 대상 지역이 일정한 투수율을 갖는 단순한 층서 구조라는 가정에서 출발하여 반복적인 시행착오(trial and error)를 거쳐서 관측된 SP 자료와 잘 일치하도록 꾸준히 갱신되어 결정되었다(Fig. 3(a)).

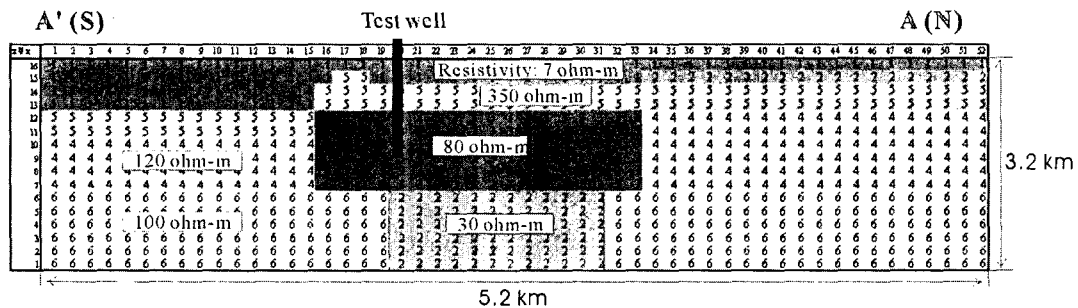


Fig. 2. Physical property grids of the model for resistivity distribution.

모델링에서는 양수나 기타 특별한 외부적인 유입이나 유출이 없다고 가정하여 우선 모델의 최하부에 적절한 유체원(fluid source)을 준 후, 이에 의한 유체의 흐름이 안정되었다고 생각되는 1만년 후의 SP 반응을 계산하였다. 모델링의 결과는 Fig. 3과 같은데, 조사 지역의 지질학적인 구조 및 시추공 주변 지역의 물성 특성이 아직은 명확하지 않아서 약간의 차이는 있지만 관측된 SP 값과 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이 측선 상에서 주변에 비해 비교적 SP 반응이 높은 지열수 순환계의 상승부로 여겨지는 두 군데의 투수율이 높은 지역이 존재하는 것으로 보이며, 수리지질학적인 경계로 작용하고 있는 것으로 추정된다.

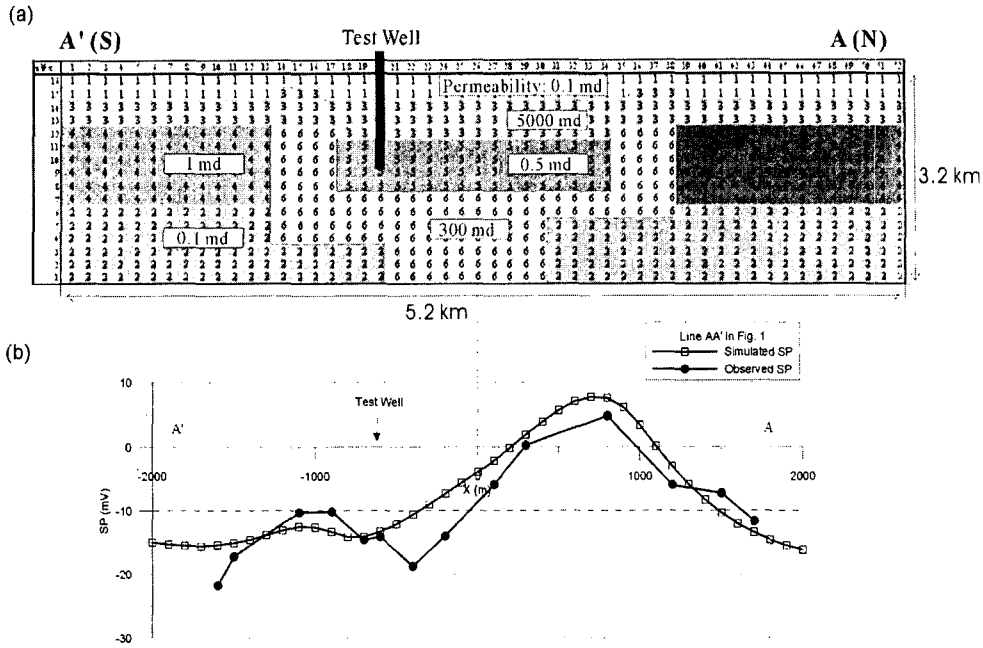


Fig 3. The result of PTSP simulation along with line AA' in Fig. 1.

- (a) Physical property grids of the model for permeability distribution.
- (b) Comparison simulated SP with observed SP.

3. 결론

포항 지열 개발지역에서 SP 탐사를 수행한 결과는 시추공을 중심으로 지열수 상승 영역으로 해석되는 북쪽에서 뚜렷한 양의 SP 이상을 보였다. 이에 대한 좀더 정량적인 해석을 위해서 SP 자료와 MT 탐사의 전기비저항 자료를 이용하여 2차원 수치 모델링을 수행한 결과 주변보다 높은 SP 분포를 보이는 시추공의 북부와 남부에서 투수율이 높게 나타났는데, 이는 지열수 순환의 상승 영역일 가능성을 시사한다. 추후 모델 계산에 이용되는 주변 지질의 물성에 대한 더 많은 연구가 이루어진다면 시추공 주변에 대한 지열수 유동 양상을 좀 더 명확하게 밝힐 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 일반사업인 심부 지열에너지 개발사업 결과의 일부분이다.

4. 참고문헌

송성호, 2001, 자연전위법을 이용한 수리시설물 누수 탐지, 교육학 박사학위논문, 서울대학교.
 송윤호, 이태종, 이성근, Uchida, T., Mitsuhashi, Y., and Graham, G. B., 2004, 포항 지역 지열개발을 위한 3차원 MT 탐사, 대한지구물리학회/한국물리탐사학회 공동학술대회, 한국해양연구원, 260-265.
 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. Merkle et al., 121-131, Springer-Verlag, New York.

- Yasukawa, K., Bodvarsson, G. S. and Wilt, M., 1993, A coupled self-potential and mass-heat flow code for geothermal applications. GRC Transactions, 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.