

지열자원 이용을 위한 행정중심복합도시내 3개 지하수공 모니터링 해석

이 철우¹⁾

Analysis of Monitoring Data Obtained from Three Boreholes in Haengbok (Sejong) City for Geothermal Resources Develoment

Cholwoo Lee¹⁾

Key words : borehole, geothermal resources, electric conductivity, barometric efficiency.

Abstract : Three boreholes (BE-1, BE-2 and BE-3) were drilled for geothermal resources development in Haengbok (Sejong) city. Monitoring of temperature, electric conductivity (EC) and piezometric head were carried out at each borehole. Temperatures were measured at 10 m depth, it ranges from 13.22°C to 14.47°C. EC of BE-1 and BE-3 declined with time because groundwater flowed in boreholes. Barometric efficiency was analysed by piezometric head of groundwater and atmospheric pressure, it ranges from 44.8% to 71.5%. These parameters can be used for a geothermal modeling.

1. 서론

우물내에서의 지하수위의 움직임은 대기압, 바다 및 지구의 조석간만, 지진, 지표에서의 하중변화 등에 의한(Jacob, 1939¹⁾; Robinson, 1939²⁾; Parker and Stringfield, 1950³⁾; Bredehoeft, 1967⁴⁾; van der Kamp, 1972⁵⁾; van der Kamp and Gale, 1983⁶⁾). 이들에 의한 지하수위의 움직임은 피압대수층의 매질이 견고하지 않으며, 이는 곧 압축될 수 있는 탄성의 성질을 가지고 있다는 것을 의미한다(Meinzer, 1928⁷⁾; Jacob, 1940⁸⁾).

지구조석간만(earth tide)에 관한 연구는 지금까지 수많은 조사가 진행되어 왔다. Klonne (1880)⁹⁾은 체코의 석탄광산에서 이 지구조석간만에 의한 수위변화를 보고한 바 있으며, Grablovitz (1880)¹⁰⁾는 Klonne의 관찰을 고려하여 지하수위 변화를 이 조석간만에 의한 것으로 여겼다. 또한 Robinson (1939)²⁾은 New Mexico와 Iowa에서 지구의 조석간만을 보여주는 몇 개의 우물에 대한 지하수위도를 발간하였다.

본 연구에서는 대수층 매질의 물성 및 지하수의 물성 등에 의해 좌우되는 기압효율(barometric efficiency, B.E.)을 해석하고, 향후 양수시험이나 순간충격시험(slug test), 패커 시험 등과 같은 현장시험을 통해 얻어진 수리적 특성과 상호 비교하고자 한다.

2. 이론적 배경

Jacob (1940)⁸⁾에 의해 사용되어 왔던 조석간만효율(T.E.)은 바다의 조석간만 진폭(H)에 대한 우물내에서의 압력수두(P)의 진폭변화비로서 정의되며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$T.E. = \frac{dP}{\gamma_w dH} = \frac{\beta_p}{\beta_p + n\beta_w} \quad (2.1)$$

여기에서 γ_w 는 물의 단위중량, β_p 는 매질의 압축계수, β_w 는 물의 압축계수 및 n 은 공극률이다.

기압은 우물내의 수위와 반비례관계를 가지고 있는데, 여기에서 기압효율(B.E.)은 대기압의 변화에 따라 우물내의 수위가 어느 정도 반응하는지의 정도로서 다음과 같은 식을 갖는다.

$$B.E. = \frac{\gamma_w dh}{dP_a} \quad (2.2)$$

여기에서 P_a 는 대기압, h 는 우물내의 수위이다.

1) 한국지질자원연구원 지열자원연구실
E-mail : lcw@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3085 Fax : (042)868-3358

대기압의 증가 혹은 감소는 우물내의 수두 압력에 더해지거나 감해져 나타난다. 따라서 대기압이 계속 변화하는 동안에 우물내의 물과 대수층내의 물의 압력에는 차이가 발생된다. 즉, 대기압이 증가하면 우물내의 수위는 하강하게 되고, 대기압이 감소하면 압력이 제거되어 우물내의 수위는 증가하게 된다.

위의 조석간만효율(T.E.)과 기압효율(B.E.)을 비저류계수(specific storage, S_s)와 관계된 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T.E. = \frac{\rho_w g \beta_p}{S_s} \quad (2.3)$$

$$B.E. = \frac{\rho_w g n \beta_w}{S_s} \quad (2.4)$$

여기에서 ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도 및 S_s 는 비저류계수이다. 조석간만효율과 기압효율의 합은 항상 1이 되며, 물의 압축계수, 기압효율 및 공극률을 알면 비저류계수를 산출할 수 있으며, 공극 매질의 압축계수와 조석간만효율을 알면 여기에서도 역시 비저류계수를 산출할 수 있다.

3. 모니터링 및 해석

3.1. 온도, 전기전도도 및 지하수위

조사지역 내에서의 자연지하수위를 장기간 관측하고 분석하기 위해 3개 조사공(BE-1, BE-2, BE-3)에 대해 자동수위기록계를 설치하여 10분 간격으로 수위, 온도 및 전기전도도를 측정하였고, BE-1호공에는 대기압에 의한 영향을 분석하기 위해 대기압 측정용 자동기록계도 함께 설치하였다. 이때 설치한 자동수위기록계는 Van Essen사의 Diver를 이용하였으며, 설치기간은 2006년 12월 5일부터 2007년 2월 13일까지 약 2개월 동안이다.

3개 공에 대한 온도 관측은 지표면으로부터 약 10 m 깊이에서 실시하였으며, 그 결과는 그림 3-1에서 보는 바와 같다. BE-1호공은 관측 초기 약 14.47 °C를 기록하였으며, 시간 경과에 따라 온도는 약간 상승하여 관측 말기에는 14.57°C로 약 0.1 °C 정도 상승하였다. BE-2, BE-3호공의 온도는 관측 초기 각각 약 13.65 °C, 13.22 °C이었으며, 이 공들에서도 역시 시간 경과에 따라 온도가 약간씩 상승하여 관측 말기에는 약 0.1 °C 상승하였다.

각각의 공들에서 수온을 관측하는 동안 BE-1호공에서 대기온도를 관측하였으며, 그 결과는 그림 3-2와 같다. 관측기간 동안 대기온도는 약 -1~8 °C 정도를 기록하였으며, 하루 중 오후 3시에서 4시 사이에 최고온도를 보였으며, 아침 7시를 전후하여 최저온도를 보였다. 보통 대기온도는 지하의 온도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나, 이 자료에 의하면 대기온도의 일변화가 즉각적으로 지하의 온도에 반영되지는 않는 것으로 보인다.

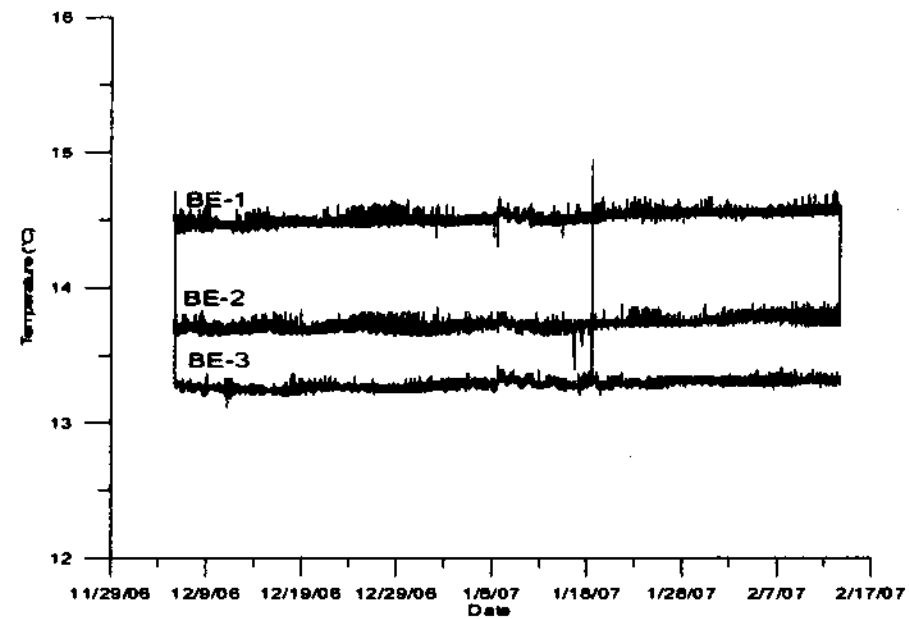


Fig. 3-1. Temperatures at 10 m depth in boreholes.

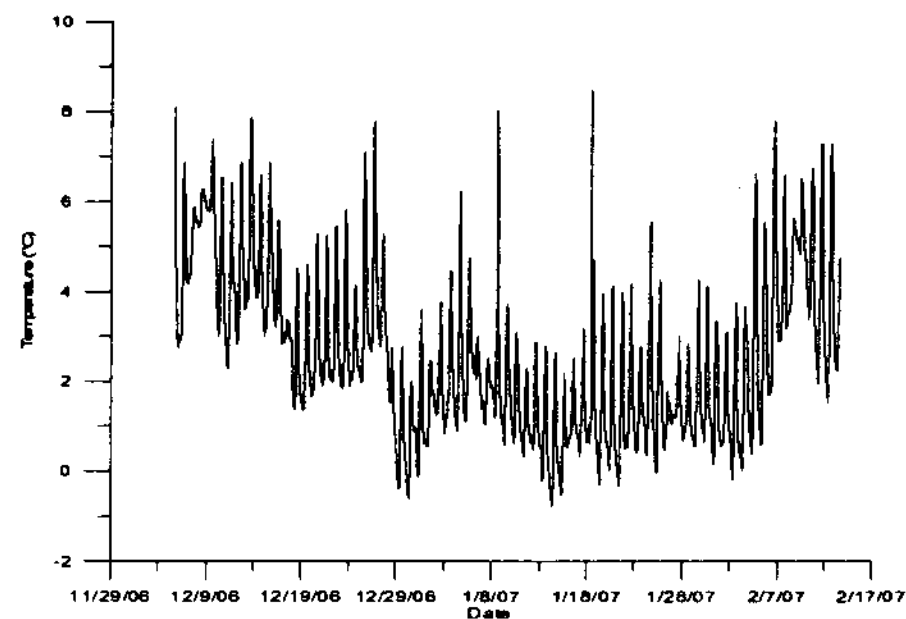


Fig. 3-2. Atmospheric temperatures at BE-1.

온도 관측과 함께 공내 지하수에 대한 전기전도도를 관측하였다. 그 결과는 그림 3-3과 같으며 관측기간 역시 2006년 12월 5일부터 2007년 2월 13일까지이다. 그림에서 보면 BE-1호공의 전기전도도값이 가장 높으며, BE-3호공의 전기전도도값이 가장 낮게 관측되었다. BE-1호공의 전기전도도값은 관측 초기에 약 0.5 mS/cm이었으나 시간이 경과함에 따라 그 값이 조금씩 낮아져 관측 말기에는 0.3 mS/cm를 기록하였다. 이의 원인은 전기전도도가 낮은 천부의 지하수가 시추공 내로 조금씩 유입되어 나타난 현상으로 추측된다. BE-2호공은 관측 기간 전반에 걸쳐 그 값이 안정되어 나타났으며, BE-3호공은 시간에 따라 전기전도도값이 약간 낮아지는 경향을 보이고 있어 이 공에서도 지하수의 유동이 있는 것으로 추측된다.

시추공에 대한 지하수위 관측 결과는 그림 3-4와 같다. 관측기간 역시 온도 및 전기전도도 관측기간과 동일하며, 관측 간격 또한 매 10분 간격이다. BE-1호공과 BE-3호공은 관측기간 동안 거의 일정한 수위를 유지하였으며, BE-2호공은 시간 경과에 따라 수위가 다소 낮아져 관측 초기보다 약 30 cm 가량 수위가 하강하였다. 각 공에 대한 평균수위를 보면 지표 케이싱을 기준으로 할 때 BE-1호공이 4.30 m, BE-2호공이 7.51 m, BE-3호공이 2.15 m 내외로 나타났다. 각 공에 대한 일일 수위변화를 보면 BE-2호공과 BE-3호공은 지하수의 움직임과 기압변화 등에 따라 수위가 상승 하강을 반복하고 있으며, BE-1호공의 경우

는 이외에도 달과 태양의 인력변화 등에 의해 일일 2회씩 약 20 cm 정도 유동하고 있다.

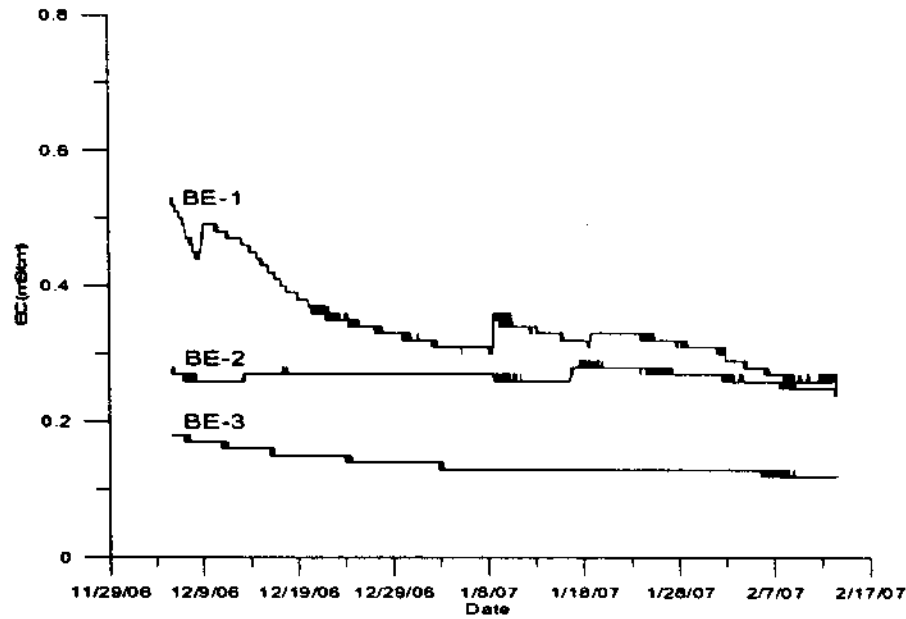


Fig. 3-3. EC at 10 m depth in boreholes.

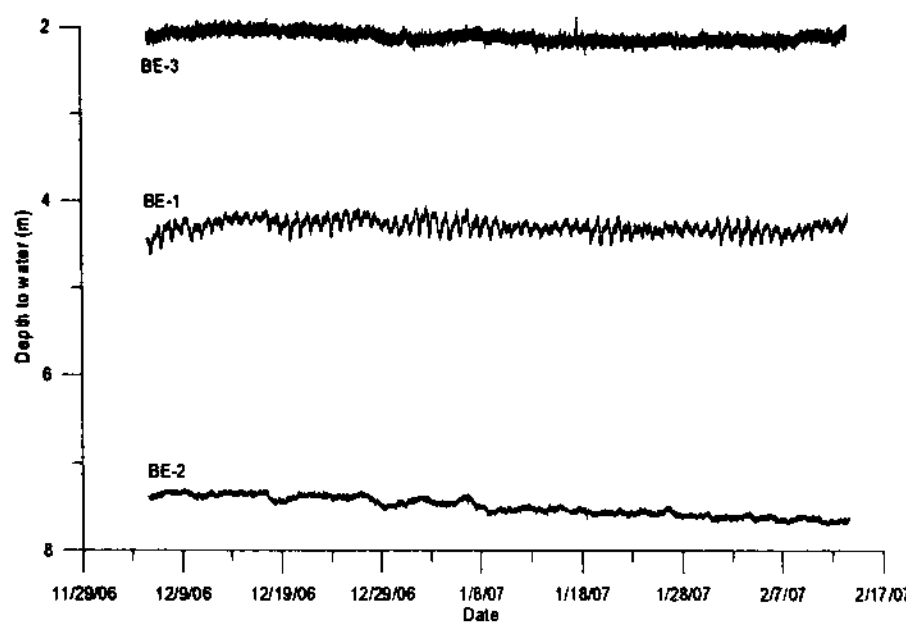


Fig. 3-4. Depth to water in boreholes.

각 공에 대한 평균 온도, 전기전도도 및 지하수위는 표 3-1에 정리하였으며, 온도는 13.25~14.51°C, 전기전도도는 0.14~0.34 mS/cm, 지하수위는 2.15~7.51 m의 범위를 보이고 있다.

Table 3-1. Temperature, EC and depth to water of boreholes

	온도(°C)	전기전도도 (mS/cm)	지하수위 (m)
BE-1	14.51	0.34	4.30
BE-2	13.68	0.27	7.51
BE-3	13.25	0.14	2.15

3.2. 기압효율 산출

관정내의 지하수위 변동이 대기압의 변화에 의해 영향을 받는다는 사실은 1973년 Blaise Pascal에 의해 처음 제기되었다 (Pascal, 1973¹¹); Gossard and Hooke, 1975¹²). 지하수위와 대기압과의 관계는 역의 관계를 가지는데, 대기압이 증가하면 지하수위는 감소하며, 대기압이 감소하면 지하수위는 증가한다. 이러한 대기압의 변화(ΔB)에 의한 지하수위의 변화(ΔW)율을 기압효율(barometric efficiency, B.E.)이라 한다.

이 조사에서는 Clark (1967)¹³의 방법을 이용하여 기압효율을 계산하였다. 이때 사용된 지하수위 자료는 양수시험에 의한 영향을 받지 않고 물리검층 등을 위해 자동수위기록계를 설치해 제하지 않은 시기를 택해 자연상태의 지하수위를 잘 반영할 수 있는 연속적인 자료를 이용하였다. 이러한 방법으로 선별된 자료는 2006년 12월 5일부터 2007년 1월 10일까지의 자료로서 Clark의 방법을 이용하여 $\Sigma \Delta B$ 에 대한 $\Sigma \Delta W$ 의 관계를 알아보았다. BE-1호공은 그림 3-5와 같으며 여기에서 구해진 기압효율은 71.5%, BE-2호공은 그림 3-6과 같으며 기압효율은 60.5%, BE-3호공은 그림 3-7과 같으며 기압효율은 44.8%로 산출되었다.

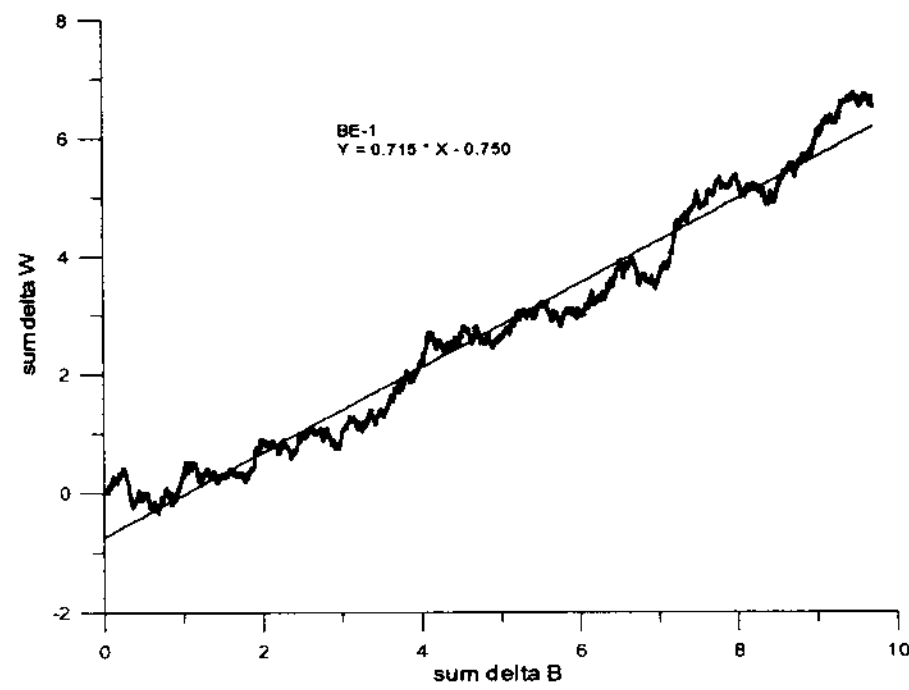


Fig. 3-5. Relationship between $\Sigma \Delta B$ and $\Sigma \Delta W$ at BE-1.

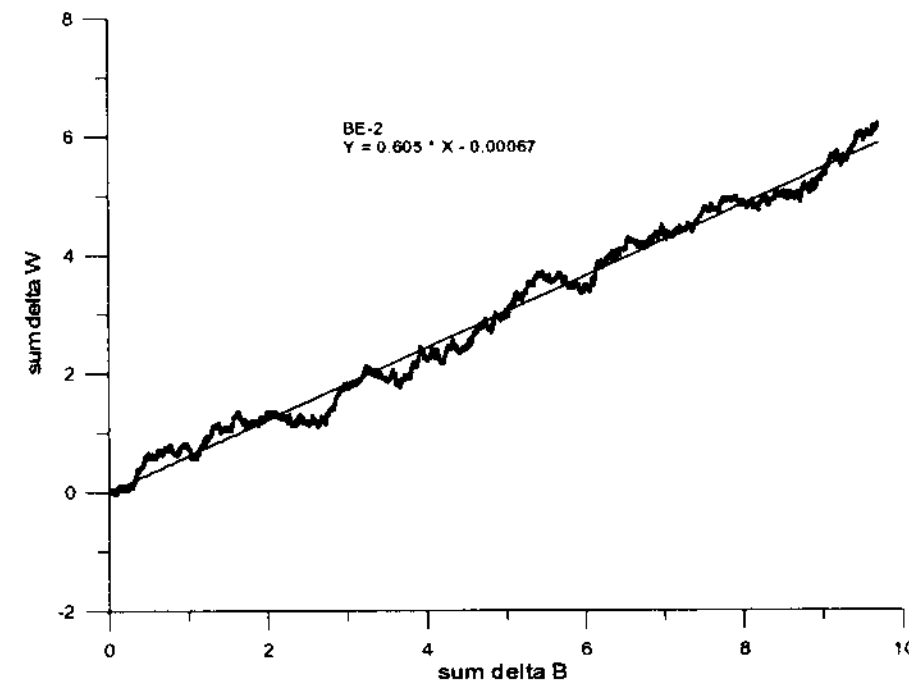


Fig. 3-6. Relationship between $\Sigma \Delta B$ and $\Sigma \Delta W$ at BE-2.

조사지역에 분포하고 있는 대수층의 기압효율과 물의 압축계수 및 대수층의 공극율 등을 알면 비저류계수를 산출할 수 있다. 조사지역에 시추한 3개 공에 대한 기압효율은 이미 계산된 바와 같으며, 물의 압축계수는 Domenico and Mifflin (1965)¹⁴에 의해서 구해진 $4.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 을 식 (2-4)에 대입하면 각 공에 대한 S_s/n 의 값은 표 3-2와 같다.

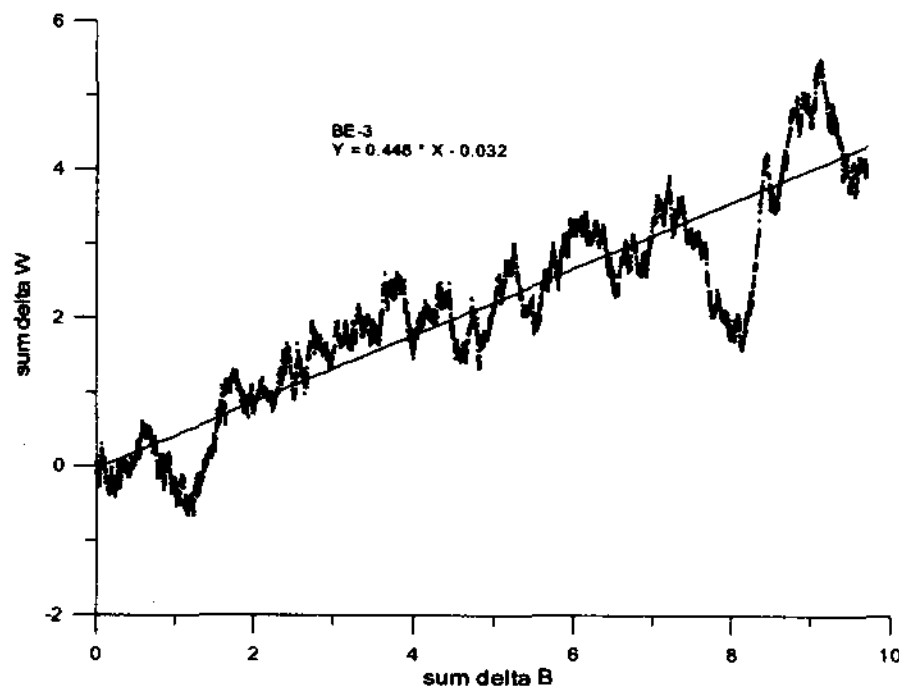


Fig. 3-7. Relationship between $\sum \Delta B$ and $\sum \Delta W$ at BE-3.

Table 3-2. S_s/n values of boreholes.

	BE-1	BE-2	BE-3
S_s/n (m^{-1})	6.51×10^{-6}	7.70×10^{-6}	1.04×10^{-5}

한편 비저류계수는 공극률과 비례관계에 놓여 있으며, 대수층의 공극률을 알면 조사지역 대수층의 비저류계수 또한 계산되어진다. 따라서 여기에서 구한 기초자료는 추후 양수시험, 순간충격시험 등에서 구한 수리상수에 반영되며, 대수층에 대한 이 수리상수들은 지열자원 활용시 지하수 유동 모델링의 주요 인자로서 이용된다.

4. 결과

조사지역내에 시추된 3개 공에 대한 온도, 전기전도도 및 수위변화를 약 2개월간 관측하였다. 지표로부터 약 10 m 하부의 온도변화는 관측 기간 동안 약 0.1°C 상승하였으며, 각 공들에서 관측된 평균 온도의 범위는 13.25~14.51°C이다. 각 공에 대한 전기전도도의 평균값은 0.14~0.34 mS/cm의 범위를 보였으며, BE-1, BE-3호공 내에서 지하수의 유동이 있는 것으로 추측되었다. 각 공에 대한 지하수위는 지표로부터 약 2.15~7.51 m의 범위를 보였으며, 지하수의 움직임, 기압변화, 달과 태양의 인력변화 등에 의해 일일변화를 보여주고 있다.

각 공에 대해 기압효율을 산출하였으며, 그 값을 이용하여 S_s/n 을 구하였다. 각 공에서 구한 S_s/n 의 범위는 $6.51 \times 10^{-6} \sim 1.04 \times 10^{-5} m^{-1}$ 정도이며, 추후 양수시험, 순간충격시험 등에서 구한 수리상수에 반영되고, 지열자원 활용시 지하수 유동 모델링의 주요 인자로서 이용된다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지열수자원 실용화 기술개발(GP2007-002)' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Jacob, C. E., 1939, Fluctuations in artesian pressure produced by passing railroad trains as shown in a well on Long Island, New York: Amer. Geophys. Union, v. 20, p. 666-674.
- [2] Robinson, T. W., 1939, Earth tides shown by fluctuations of water levels in wells in New Mexico and Iowa: Trans. Amer. Geophys. Union, v. 20, p. 656-666.
- [3] Parker, G. G., and Springfield, V. T., 1950, Effects of earthquakes, rains, tides, winds and atmospheric pressure changes on the water in geologic formations of southern Florida. Econ. Geol., v. 45, p. 441-460.
- [4] Bredehoeft, J. D., 1967, Response of well-aquifer systems to earth tides: J. Geophys. Res., v. 72, p. 3075-3087.
- [5] Van Der Kamp, 1972, Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea: Ottawa, Env. Canada reprint 242, p. 101-106.
- [6] Van Der Kamp and Gale, J. E., 1983, Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. Water Resources Res., v. 19, p. 538-544.
- [7] Meinzer, O. E., 1928, Compressibility and elasticity of artesian aquifer: Econ. Geol., v. 23, p. 263-291.
- [8] Jacob, C. E., 1940, On the flow of water in an elastic artesian aquifer: Trans. Amer. Geophys. Union, v. 22, p. 574-586.
- [9] Klone, F. W., 1880, Die periodischen Schwankungen in den inundirten Kohlschachten von Dux (the periodical fluctuations in the flooded coal shafts of Dux): Akad. Wiss. Wien Sitzungsber., v. 81, p. 101, Wien.
- [10] Grablovitz, G., 1880, Sul Fenomeno di marea osservato nelle miniere di dux in Bohemia, Boll. Soc. Adriatica sc. nat. trieste vi. p. 34.
- [11] Pascal, B., 1973, The Physical Treatises of Pascal. Octagon Books, New York.
- [12] Gossard, E.E. and Hooke, W.H., 1975, Waves in the Atmosphere, Atmospheric Infrasound and Gravity Waves-Their Generation and Propagation. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 466p.
- [13] Clark, W.E., 1967, Computing the barometric efficiency of a well, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 93(HY4), p.93-98.
- [14] Domenico, P. A. and M. D. Mifflin, 1965, Water from low permeability sediments and land subsidence: Water Resources Res., v. 4, p. 563-576.