

해안 대수층에서 지하수 장기 모니터링을 통한 수리 특성 조사

심병원* · 이철우

한국지질자원연구원 국토지질연구본부 지열자원연구실

Hydrologic Characterization through Ground Water Monitoring in a Coastal Aquifer

Byoung Ohan Shim* and Cholwoo Lee

Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Groundwater in small islands is used as main water resource but the overuse of groundwater may cause seawater intrusion and temperature decrease in geothermal wells. This study aimed to characterize the hydrogeology of Maeum-ri area in Seokmo Island of Ganghwagun using long-term monitoring at groundwater wells and geothermal wells. In the monitoring period seasonal water level change, consistent drop or increase of water levels are not detected. The groundwater temperature about 10 m below ground surface shows year cycle variation having two to five months difference with ambient temperature cycle. The storativity was calculated by tidal method. The storativity estimated by adapting tidal efficiency factor showed some larger values than that by using tidal time lag. The result suggested that the tidal method assuming several assumptions on aquifer condition may produce broad ranges but the calculated ranges at this application are reasonable. The similar shape of groundwater level change and tidal effects was observed at several wells clustered east-south-east direction which may implicate the distribution of vertical fracture system strongly related with groundwater flow channels. The applied methodology and study results will be valuable to evaluate optimal pumping rate for the preservation of groundwater resources, and to manage geothermal development.

Key words : coastal aquifer, tidal method, geothermal well, hydrogeology, long-term monitoring

도서지역의 지하수는 중요한 수자원으로 이용되고 있으나 지하수의 과잉 개발은 해수침투를 유발하거나 온천공에서는 온도 저하 등의 문제를 일으킬 수 있다. 본 연구는 석모도 배운리 일대의 온천공 및 지하수공에서 장기 모니터링을 실시하여 연구지역의 수리지질 특성을 추정하였다. 온천공 모니터링 결과 계절적인 수위 변화나 지속적인 수위 하강 또는 상승은 나타나지 않았으며, 공내 약 10 m 내의 심도에서 측정된 지하수온은 몇 개의 공에서 대기 최고온도와 2~5개월 정도의 시간차를 보이며 일년 주기로 나타났다. 그리고 조석 변동에 따른 유효응력 변화를 분석하여 저류계수를 계산하였다. 조석 영향을 분석한 결과 조석효율 요소를 이용하여 계산된 저류계수가 시간지연 요소를 이용한 값들보다 다소 크게 나타났다. 여러 가지 대수층 조건을 가정한 조석 분석법은 넓은 범위의 저류계수 값을 산정할 수 있으나, 본 연구에서 적용한 조석 분석법으로 계산된 값은 합리적이라 판단된다. 측정된 수위 및 조석 변동 형태가 동남동 방향으로 유사한 이유는 지반내 수리지질적인 연결성 또는 단열계의 분포특성에 의한 것으로 추정된다. 본 연구의 결과는 적정 지하수 사용량 또는 지하수 부존 평가나 온천공들의 개발 및 허가량 등에 대한 평가 자료로 이용될 수 있다.

주요어 : 해안대수층, 조석 분석법, 온천공, 수리지질, 장기모니터링

1. 서 론

대부분의 해안지역에서는 인구밀도가 높고 지하수의

이용량이 많아서 대수층의 보존 및 관리를 위한 체계적인 조사와 분석이 요구된다. 이를 위하여 해안대수층에 대한 모니터링 조사는 해수침투 방지, 수자원 관

*Corresponding author: boshim@kigam.re.kr

리, 해안 지하수 이용 등 여러 목적에 적용되어 왔다 (Kim *et al.*, 2005). 국내 해안대수층은 대부분 규얼암 반 대수층이며, 특히 서해안의 경우 해안에서의 조석 변화가 커 이에 따른 지하수위 변동도 비교적 크다. 해안대수층에서는 내륙에서 나타나는 광역적인 지하수 유동보다는 해안에서의 조석변화와 해안선 형태, 지형 등과 같은 경계조건이 지하수유동에 많은 영향을 미친다. 수자원의 효율적인 관리를 위하여 장기 지하수위 모니터링을 통한 조사방법은 지하수 부존 형태와 지질 구조적 연결성을 파악하는데 효과적일 수 있다. 그리고 그 자료를 이용하여 강수량과 지하수 분포의 연관성 또는 지류 특성 파악과 지하수 이용을 위한 지하수 사용량 평가 등이 가능하다. 이러한 모니터링 자료 분석은 수자원의 관리를 위해 중요하며 우물의 정보, 이용 형태, 지하수의 지화학 정보, 지표면 형태, 대수층 수리인자(투수률계수, 수리전도도, 저저류계수, 비저류계수, 분산지수), 충전율, 추정된 해수침투 경계면 및 심도 등과 더불어 전체적인 대수층의 수리지질 특성을 파악하는데 유용하다(Cheng and Ouazar, 2004).

해안대수층은 일반적으로 해수와 지하수간의 수리적 평형(hydrostatic balance) 관계에 의하여 유지되고 있으나 과도한 지하수 및 지열수의 이용은 수리적 불균형을 초래하여 지하수의 오염 및 온도저감 가능성을 높일 수 있다(Niroshana Gunawardhana and Kazama,

2009). 연구 지역은 대부분 간이상수도를 지하수 개발을 통하여 음용수 및 생활용수로 이용하고 있으므로 지속적인 대수층 모니터링에 의한 수자원 관리가 필요하다. 최근 온천수를 이용한 인근 주택의 난방방과 온실 및 양식장 운영 등으로 지열수 사용량이 증가하고 있으므로 효율적인 관리가 없을 경우 장기적으로 수온 및 수질 저하 등의 문제가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 석모도 매음리 해안지역(Fig. 1)의 전반적인 수리적 연결성과 대수층 특성을 파악하기 위하여 온천공과 지하수공들을 중심으로 수위 및 수온 장기 모니터링과 조석 영향을 분석하여 수리인자를 추정하였다. 이 지역에서는 60~70°C 정도의 고온 지열수가 대량으로 자연용출하는 공들이 분포하여 최근 10여 년 전부터 많은 온천공 개발이 지속되고 있다(Lee *et al.*, 2009). 또한 휴양시설 관련 건물들이 대규모로 건축되고 있어 지열수 뿐만 아니라 천부의 지하수 사용량이 급속히 증대될 것으로 판단된다.

2. 온천공 및 지하수공 모니터링

조사공들이 위치한 석모도 매음리 해안지역(Fig. 1)은 상부에 퇴적층 또는 매립층이 다양한 두께로 피복되어 있으며, 그 하부는 단열암반으로 이루어져 있다. 기반암은 중립질 흑운모 화강암이며, 남쪽 어류정 일

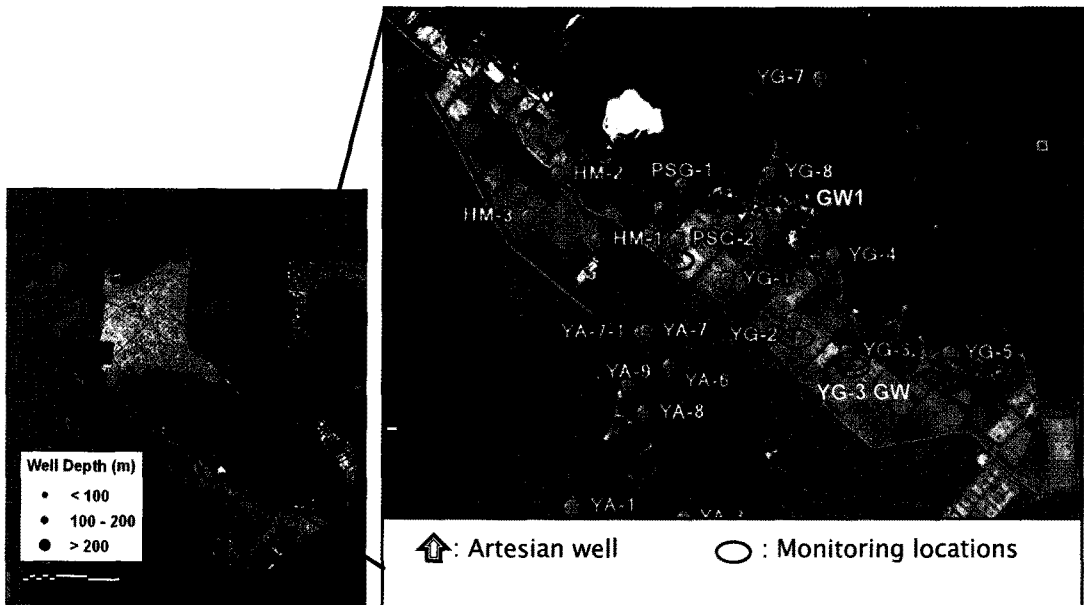


Fig. 1. Location map of the study area and monitoring wells at Seokmo Island of Ganghwagun. Red circles represent monitoring wells and up arrow indicates artesian well.

대는 장군편암으로 이루어져 있다(Hwang and Kim, 2005). 본 지역의 온천공 수질은 염분 농도가 높아 일

반적인 용수로는 부적합하나 개발가능량이 많고 온도가 높아 지속적으로 개발되고 있다(Lee *et al.*, 2009).

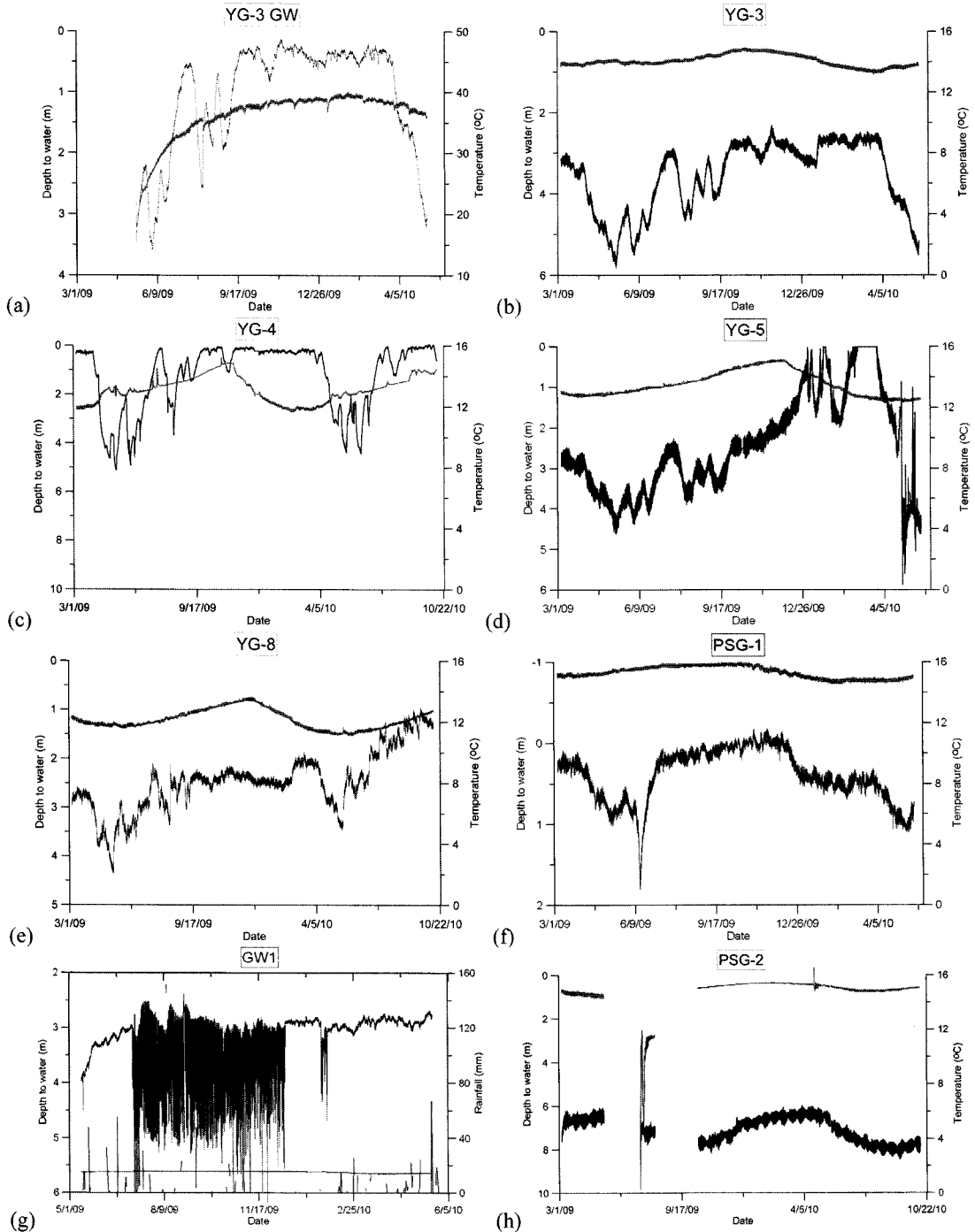


Fig. 2. Long term monitoring of groundwater level (black line) and temperature (red line) of geothermal wells (YG-3, 4, 5, 8, PSG-1, and 2) and groundwater wells (YG-3GW and GW1).

그러나 대수층 온도나 수자원을 보호하기 위한 조사나 적절한 평가 없이 무계획적인 개발이 이루어지고 있어 지속적인 관리가 요구된다. 이 지역에 대하여 지질, 물리탐사 및 지화학 조사가 진행되고 있으며 부분적으로 지질 경계 및 균열 분포 특성 등에 대한 결과가 분석되었다(Lee *et al.*, 2010; Lee and Song, 2010; Park and Lee, 2010).

본 연구에서는 2009년 3월부터 2010년 10월까지 9개의 조사공에 대하여 온도 및 지하수위 모니터링을 실시하였다(Fig. 1). 온천공들의 시추 심도는 대략 450 ~ 1440 m 범위에 있으며, 케이싱은 온천수가 유출되는 심도 전까지 설치하여 그 심도는 대략 70 ~ 300 m 사이에 있다. 따라서 이 지역의 온천수가 저류하는 암반대수층의 심도는 다양한 것으로 추정된다.

2009년 3월부터 2010년 10월까지 20분 간격으로 자동측정시스템(DIVER)을 이용하여 지표하 8~10 m 심도의 지하수위 및 온도, 전기전도도를 측정하였다(Fig. 1). 피압된 온천수가 자연용출하는 공(YG-1, YG-2, PSG-1, HM-1)들은 상방향 화살표로 표시되었으며 그 수량은 각 공마다 다양하며 YG-1 호공에서 최대 약 2,000 m³/day 정도이다.

Fig. 2는 각 조사공들에서 측정된 장기 수위 및 온도 변동을 그래프로 도시한 것이다. 같은 위치에 설치된 YG-3 온천공(심도 451 m)과 심도가 얇은 YG-3GW 지하수공(심도 100 m)의 수위 변동 형태는 유사하나 10 m 심도 공내에서 측정된 수온은 YG-3보다 지하수

공이 높게 나타난다(Fig. 3a, b). 그 이유는 지하수공 하부가 고온의 지하수를 포함하는 균열대와 연결되어 높은 온도의 지하수가 부존하는 것으로 추정된다. 이 지역에서 피압된 고온의 온천수가 자연용출하는 양상은 이와 같이 심부 지반과 천부 지반내 균열들이 상호 연결되어 고온의 지하수가 연결된 통로를 따라 천부로 이동하기 때문이다. 이것은 국내 여러 온천의 생성과 유사하게 고온의 지하수가 심부 파쇄대를 따라 상부로 유동하는 것으로 판단된다(Lee, 2009). 지각 상부 10 km 이내에서 균열대는 매우 광범위하게 분포하는 것으로 알려져 있으며(Ramsay *et al.*, 2000), 지열탐사를 위해 라인 지구대의 화강암 기반암에 굴착된 시추공에서도 3.0 km 하부 심부의 균열대에서 지열수 유동이 보고되었다(Aquilina *et al.*, 1997).

간헐적으로 소량 자연용출하는 PSG-1, 2호공의 지하수온은 15°C 내외에서 변동하고 있으나 구릉지와 평지 경계부에 위치한 YG-4, 5, 8호공에서는 지하수온이 12 - 14°C 내외로 변동하고 있다. YG-3, 4, 5, 8, PSG-1, 2호공에서는 1년 주기의 수온 변화가 약하게 나타나고 있으며, 공별로 최고점 주기도 다르게 나타난다. 지표면 부근의 얇은 토양층은 태양 복사열에 의해 주기적으로 온도가 변동하고 있으나, 설치된 온도 센서가 지표하 약 8~10 m로서 복사열보다는 지하수 온의 영향을 많이 받는 것으로 추정된다.

Fig. 2g는 GW1 지하수공에서 약 1년간 측정된 강수량, 수위 및 온도를 나타낸 것이며, 굴착 심도는 30 m이다. 이 공은 한 교회의 생활용수로 사용되고 있으며 여름철에는 많은 지하수 사용으로 순간적인 수위변동이 급격히 나타나고 있으나 전체 측정기간에서 다소 일정한 수위를 유지한다. 강수량에 따른 지하수위 및 온도 변동도 큰 연관성이 보이지 않는다.

3. 지하수위와 조석의 관계

Table 1은 연구지역내 조석 영향을 파악하기 위하여 요약된 자료를 나타낸 것으로서 공심도, 지하수위 변동폭, 최저 및 최고 지하수위, 조석영향에 의한 지하수위 진폭, 해안으로부터 공의 거리 등을 기재하였다. 해안지형에 따라 해안으로부터의 공까지의 거리는 조석 변동에 따라 크게 달라지지만 이 지역의 남서쪽 해안선 경계부터 공 위치까지로 산정하였다. YG-2호공은 온천수를 양수하지 않는 경우 수위가 지표하 8 m 부근에 위치하지만 일정 기간 양수가 이루어지면 사이펀(siphon) 현상처럼 지속적으로 자연용출한다. 그리고 수

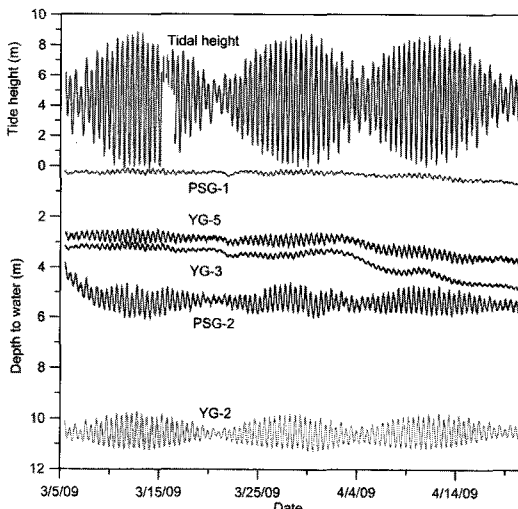


Fig. 3. Tidal heights and water levels measured at geothermal wells from 3 March to 26 April 2009.

Table 1. Descriptions of the groundwater level and the fluctuations associated with tidal effect at the monitored wells from 3 March to 26 April 2009

Well No.	Hole depth (m)	Average depth to water (m)	Lowest water level (b.g.l)	Highest water level (b.g.l)	Fluctuation by tide (m)	Distance from the coast line (m)
YG-2	1442.3	9.89	11.29	8.29 (overflow)	1.51	850
YG-3	451.5	3.56	5.82	2.33	0.43	1170
YG-3 GW	?	1.05	3.58	0.12	-	1170
YG-4	951.6	1.26	5.1	0.03	-?	1110
YG-5	491.1	2.39	5.87	overflow	0.61	1510
YG-8	694.2	2.69	4.37	1.85	-	1010
PSG-1	957.9	0.40	1.81	overflow	0.30	691
PSG-2	724.1	5.0	6.38	2.96	1.42	470
GW1	30?	3.0	6.18	2.7	-	1030

량은 다르지만 자연용출하는 YG-2, 5, PSG-1 공들은 거리와 상관없이 뚜렷한 조석 영향을 나타내고 있으므로, 해안과 지반내 연결성이 발달되어 있는 것으로 추정된다. 간이 양수에 의한 측정결과로서 YG-1, 2호공에서 1,000~2,000 m³/day 정도의 온천수 자연용출이 가능하다.

균열암반 대수층은 지하수가 대부분 암반내 균열을 따라 이동하므로 투수량계수는 그 일정한 범위의 지하수 유동 통로에 대한 수리인자로 해석될 수 있다. 또한 본 연구지역과 같이 해안 조석의 영향을 받는 조건에서는 위치 및 심도에 따라 매우 큰 편차를 가질 수 있다. 조석자료는 강화도 외포리 선착장에서 조석 주기 24.83 hr과 조석진폭 9.27 m를 이용하였으며, 조사자료와 4장의 수식들을 이용하여 수위 변동을 해석하였다.

Fig. 2의 지하수위 모니터링 그래프를 보면 YG-3, 4, 5, 8, PSG-1 온천공에서 지하수위 변동 형태가 유사하며, Fig. 3에서 YG-2, 3, 5, PSG-1, 2가 조석에 따른 수위 변동이 뚜렷이 나타나고 있다. 그리고 해안과 가까운 YG-2, PSG-2에서 큰 진폭을 나타내며 내륙쪽에 있는 YG-3, 5, PSG-1에서는 진폭이 감소하여 나타난다. A-A' 라인을 따라 추정된 연결선 방향은 최근 이 지역에서 분석한 단열계의 분포 특성으로서 서북서-동남동 방향의 수직상 단열이 우세하여 구조적인 상관성이 있는 것으로 판단된다(Park and Lee, 2010). 각 온천공에서 측정된 수위변화도 A-A' 라인을 따라 유사성을 나타내는데, 이것은 해명산 상부로부터 유동된 지하수와 그 하부 평지에 부존하는 지하수간의 수리적 특성과 그 경계부에 나타날 수 있는 심부 파쇄대의 연결성에 의해 나타나는 특징으로 추정된다.

4. 조석 영향 분석

Fig. 3은 조석분석법을 이용하기 위하여 2009년 3월 5일에서 4월 26일까지 조석에 의한 지하수위변동을 도시하였다. 조석 높이(Tidal height)는 인천 해양조사원에서 20분 간격으로 측정된 것을 이용하였으며, 강화도 외포리의 측정치와 높이는 거의 유사하며 약 20분의 시차를 보인다. 온천공 중에 YG-2호공이 가장 뚜렷한 조석 영향이 나타나고 있으며, 나머지 공들에서는 약간 불규칙적인 형태를 보이고 있다. 불규칙적인 형태들은 대수층의 복잡한 형태나 시추공내 균열 분포 등에 의해 여러 경로로 조석의 유효용력이 대수층으로 전달되기 때문인 것으로 추정된다.

조석에 의한 해안대수층내 유효용력 변화는 대수층을 구성하는 매질과 공극내 지하수에 분산되므로 내륙으로 갈수록 지하수위 변동 진폭은 점점 작게 나타난다. 이러한 조석에 대한 대수층내 수위변화를 수식에 적용하면 저류계수(storage coefficient)와 투수량계수(transmissivity)의 비를 구할 수 있으며, 기존의 수리전도도나 투수량계수를 이용하여 저류계수를 계산할 수 있다(Carr and Van Der Kamp, 1969; Jiao and Tang, 1999). 본 연구지역의 굴착공들은 대부분 심부 고온의 지열수 개발을 위하여 단열암반 대수층에 굴착되었으므로 피압수위를 나타낸다. 연구지역의 전반적인 피압은 해명산으로부터 하부 해안방향의 지하수 유동에 의하여 발생되고 있으며, 해안대수층에서는 해수와 담수간의 수리평형 상태에 의한 피압도 받고 있는 것으로 사료된다.

해안대수층의 수위변동 해석을 통한 수리지질 특성 추정에 대한 연구는 1950년대 초 (Ferris, 1951)부터

지속적으로 진행되어 오고 있다(Ferris, 1951; Li and Jiao, 2001; Li *et al.*, 2000; Mehnert *et al.*, 1999; Shim and Chung, 2004; Xia and Li, 2009; Zhou, 2008). 각 시추공에서 측정된 초음파 텔레뷰어 검층자료 및 심도별 온도분포 자료에 의하면 대부분의 시추공에서 특정 구간에 암상변화와 파쇄대를 따라 지열수가 부존하는 것으로 나타난다 (Lee *et al.*, 2010). 따라서 연구지역은 대부분 피압대수층으로 판단되며, 조석영향은 남서쪽에서 동북쪽으로 전달되는 것으로 하였다. 조석의 영향을 받는 대수층의 지하수위 변동은 식(1)과 같은 1차원의 부정류 지하수 유동 방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S\partial h}{T\partial t} \tag{1}$$

$$h(x,t) = h_0 \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \sin(S\pi/t_0 - x\sqrt{t_0 S/4\pi T}) \tag{2}$$

$$TF = \exp(-x\sqrt{\pi S/t_0 T}) \tag{3}$$

$$t_l = x\sqrt{t_0 S/4\pi T} \tag{4}$$

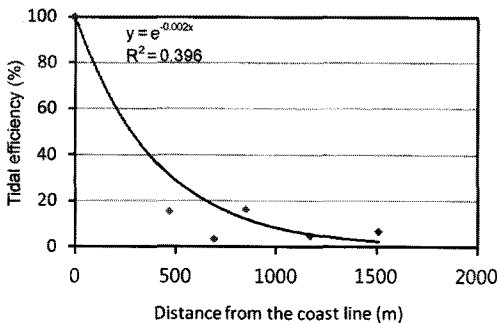
여기서 h 는 담수의 피압수두(L), h_0 는 조석의 진폭

(L), x 는 해안에서 관측공까지의 거리(L), t 는 시간(T), t_0 는 조석주기(T), S는 저류계수, T는 투수량계수(L²/T)이다. TF는 조석 효율 상수, t_l 는 지연시간(time lag)이다. 이 방법을 적용하기 위한 가정들로서 지하수는 수평적인 유동 형태이고 Darcy의 법칙을 따르며 조석범위에 비하여 대수층이 두꺼워야 된다(Carr and Van Der Kamp, 1969). 이 수식들이 반무한대(semi infinite)의 피압 대수층을 기본으로 가정하고 있으며, 지하수위 변동 범위가 포화된 대수층의 두께에 비하여 작을 경우에 적용이 가능하다(Todd, 1980). 경계조건 가정은 $x=0$ 일 경우 $h_x = h_0 \sin(\omega t)$, $x=\infty$ 일 경우 $h=0$, 각속도 (angular velocity) $\omega = 2\pi/t_0$ 이다. 식(2)은 균질한 피압대수층에서 압력이 사인곡선 형태로 대수층내에서 전달된다는 것을 보여주며, 조수위 변동과 관측공의 지하수위 변동 사이에는 지연시간이 발생하는 요소를 나타낸다. 조석효율(tidal efficiency)을 이용하여 식(3), (4)와 같이 대수층의 수리전도도와 비저류계수의 비 또는 투수량계수(T)와 저류계수(S)의 비를 산정할 수 있다.

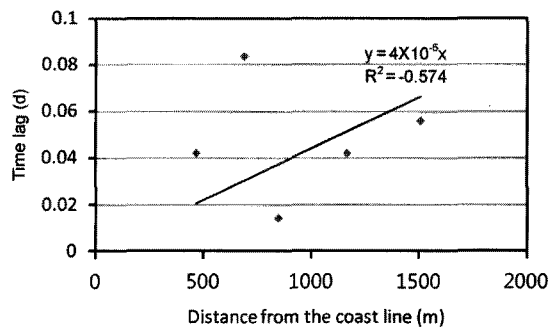
Table 2는 YG-2, 3, 5, PSG-1, 2의 수위 모니터링 결과에 의해 조석 영향을 조석 높이와 교차상관(cross correlation) 분석을 통하여 계산된 시간지연 요소로 나

Table 2. Calculation of storage coefficients with tidal efficiency factors and time lags associated with tidal effect at the monitored wells

Well No.	Cross correlation	Time lag (min)	Tidal efficiency factor (%)	Transmissivity (m ² /d) in HM-2, 3
YG-2	0.980	20	16.26	
YG-3	0.361	60	4.59	
YG-5	0.364	80	6.58	144,225
PSG-1	0.383	120	3.24	
PSG-2	0.937	60	15.32	



(a)



(b)

Fig. 4. Graphs of tidal efficiency (a) and time lag (b) versus the distance from the coast line at the monitored geothermal wells.

탄낸 것이다. Fig. 4는 조석효율과 시간지연 요소를 계산하기 위한 최적곡선을 도시한 것으로서, Fig. 4a, b의 각 수렴식과 식(3)과 (4)를 적용하면 저류계수와 투수량계수의 비(hydraulic diffusivity)를 구할 수 있다. 각 그래프에서 측정치들이 최적곡선에서 분산이 다소 큰 형태로 나타나 있다. 이것은 단열암반 대수층내 불균질하게 발달된 파쇄대와 그 이방성으로 인하여 유효응력 전달 경로가 복잡하여 조석의 영향이 다양한 경로로 이동하기 때문인 것으로 판단된다. 인근에서 실시된 수리시험 측정 자료로서 해명온천지구내 HM-2, 3호공(공심도 504, 412 m, 케이상심도 76, 85 m)의 투수량계수 144, 226 m²/d(Sung *et al.*, 2001)를 적용하였을 때 시간지연 현상을 이용하여 계산된 저류계수는 각각 3.25×10⁻⁶와 5.50×10⁻⁶이며, 조석효율에 의한 저류계수는 각각 1.19×10⁻⁴, 3.22×10⁻⁴로 나타났다. 두 방법에 의한 계산결과가 다소 차이가 나타났는데 이것은 피압대수층의 유효응력이 공내 수직적인 지하수위 변동으로 민감하게 나타나지만 유효응력 파형전달은 해안지형의 형태 및 대수층 불균질성 등을 복합적으로 받기 때문인 것으로 추정된다. Fig. 4에 도시된 회귀선들로부터 분산된 데이터의 영향을 고려하면 저류계수의 범위는 3.25×10⁻⁶에서 3.22×10⁻⁴정도로 추정할 수 있다.

5. 결 론

장기 모니터링에 의한 수위변동 해석을 통하여 석모도 매음리 일대 수리지질 특성을 파악하였다. 수위 모니터링에 의하면 대부분의 온천공에서 지속적인 수위 하강 또는 상승은 없으며, 경우에 의한 상관성은 거의 나타나지 않았다. 지표부근 지하수온은 연주기 변동형태를 나타내며, 대기온도와는 약 2~5개월 정도의 시간차를 보이지만 지속적인 온도 저감이나 상승은 나타나지 않았다. 조석에 따른 유효응력 영향을 조석효율과 시간지연 요소로 분석한 결과 조석효율을 이용하여 계산된 저류계수가 시간지연 요소를 적용한 값보다 다소 크게 나타났다. 저류계수는 3.25×10⁻⁶~3.22×10⁻⁴ 정도로 추정되며, 대수층의 불균질성과 아울러 공들의 다양한 심도, 해안선의 형태도 결과에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 조석 영향 분석법은 이를 적용하기 위해 여러가지 가정이 포함되어 계산된 수리인자가 실제 대수층과 다소 차이가 있을 수 있으나 본 해안대수층의 수리특성을 추정하기 위한 적절한 방법으로 판단된다. 지하수위 변동 양상과 조석 영향을 분석한 결과

기존 연구결과에 나타난 서북서-동남동 방향의 단열계가 지열수 대수층과 연관성이 있는 것으로 추정된다.

위 결과들은 적정 지하수 사용량 또는 지하수 부존 평가나 온천공의 개발 및 허가량에 대한 평가 자료로 이용될 수 있다. 장기모니터링에 의한 본 연구는 해안 대수층의 지열수 및 지하수 활용 및 관리를 위하여 매우 유용할 것으로 판단된다. 또한 추후 석모도내 보다 넓은 지역으로 모니터링을 확대하여 각 대수층별로 온도 및 수위의 체계적인 정보 수집이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “저온 지열 열병합 발전에 활용가능한 심부 지열수 자원 확보 기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- Aquilina, L., Pauwels, H., Genter, A. and Fouillac, C. (1997) Water-rock interaction processes in the Triassic sandstone and the granitic basement of the Rhine Graben: Geochemical investigation of a geothermal reservoir; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.61, n.20, p.4281-4295.
- Carr, P.A. and Van Der Kamp, G.S. (1969) Determining aquifer characteristics by the tidal method, *Water Resources Research*, v.5, n.5, p.1023-1031
- Cheng, A.H.D. and Ouazar, D. (2004) Coastal aquifer management: monitoring, modeling, and case studies. Lewis Publishers.
- Ferris, J.G. (1951) Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, *International Association of Scientific Hydrology*, v.33, n., p.148-155.
- Hwang, J.H. and Kim, Y.H. (2005) Geological report of the Gangwha-Onsuri sheet 1:50,000, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Jiao, J. and Tang, Z. (1999) Analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer, *Water Resources Research*, v.35, n.3, p.747-751.
- Kim, K.Y., Shim, B.O., Park, K.H., Kim, T., Seong, H., Park, Y.S., Koh, G.W. and Woo, N.C. (2005) Analysis of Hydraulic Gradient at Coastal Aquifers in Eastern Part of Jeju Island, *Economic and Environmental Geology*, v.38, n.1, p.79-89.
- Lee, C. (2009) The well distribution and the geological structure in hot spring areas, 2009 Spring Conference of The Korean Society for New and Renewable Energy
- Lee, T.J., Han, N. and Song, Y. (2010) Magnetotelluric survey applied to geothermal exploration: An example at Seokmo Island, Korea, *Exploration Geophysics*,

- v.41, n.1, p.61-68.
- Lee, T.J. and Song, Y. (2010) Geothermal Exploration for Combined Heat and Power Generation in Seokmo Island, Korea.
- Lee, T.J., Song, Y., Lee, C., Park, D., Kim, H.C., Lee, S., Lee, C., Lee, Y., Lee, S., Park, I., Shim, B.O., Hwang, S., Park, K., Lee, S., Kim, T., Lee, Y., Park, Y., Yoon, Y., Lee, G., Go, I., Lee, B., Kim, J., Chung, Y., Choi, J., Han, N., Park, J., Back, S., Nam, M. and Lee, C. (2009) Development of Geothermal Resources for Combined Heat and Power Generation GP2009-016-2009, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, The Ministry of Knowledge Economy, 177p.
- Lee, T.J., Song, Y., Park, D., Lee, S., Lee, C., Lee, Y., Lee, S., Kim, H.C., Park, I., Shim, B.O., Hwang, S., Park, K., Lee, S., Kim, T., Lee, Y., Yoon, Y., Lee, C., Kim, J., Park, J., Choi, J. and Lee, C. (2010) Development of Geothermal Resources for Combined Heat and Power Generation GP2009-016-2010, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, The Ministry of Knowledge Economy, 141p.
- Li, H. and Jiao, J. (2001) Tide-induced groundwater fluctuation in a coastal leaky confined aquifer system extending under the sea, *Water Resources Research*, v.37, n.5, p.1165-1171.
- Li, L., Barry, D., Stagnitti, F. and Parlange, J. (2000) Groundwater waves in a coastal aquifer: A new governing equation including vertical effects and capillarity, *Water Resources Research*, v.36, n.2, p.411-420.
- Mehnert, E., Valocchi, A., Heidari, M., Kapoor, S. and Kumar, P. (1999) Estimating transmissivity from the water level fluctuations of a sinusoidally forced well, *Ground water*, v.37, n.6, p.855-860.
- Niroshana Gunawardhana, L. and Kazama, S. (2009) Tidal effects on aquifer thermal regime: An analytical solution for coastal ecosystem management, *Journal of Hydrology*, v.377, n.3-4, p.377-390.
- Park, D.-W. and Lee, C.B. (2010) Characteristics of Fracture System in Precambrian Metamorphic Rocks and Mesozoic Granites from Seokmo-do, Ganghwa-gun, *The Journal of the Petrological Society of Korea*, v.19, n.2, p.123-139.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I. and Lisle, R.J. (2000) The techniques of modern structural geology: Applications of continuum mechanics in structural geology. Academic Pr, 1061p.
- Shim, B.O. and Chung, S.Y. (2004) Hydrogeologic parameter estimation by using tidal method in a fractured rock aquifer, *The journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, v.9, n.3, p.27-32.
- Sung, J., Lee, M. and Soon, J. (2001) The report of geothermal well investigation of Haemyoung hot spring area., Hankookgunup engineering Co., Ltd., 86p.
- Todd, D.K. (1980) *Groundwater hydrology*. Second edition. John Wiley & Sons, 535p.
- Xia, Y. and Li, H. (2009) The Estimation of Aquifer Parameters Using Tidal Effect in a Coastal Aquifer: A Case Study in Beihai Peninsula, *Earth Science Frontiers*, v.16, n.6, p.276-281.
- Zhou, X. (2008) Determination of aquifer parameters based on measurements of tidal effects on a coastal aquifer near Beihai, China, *Hydrological Processes*, v.22, n.16, p.3176-3180.