한국지하수토양환경학회지 Vol. 11, No. 3, pp. 20~30, 2006 ≪原著≫

양수시험에 의한 포항 흥해지역 심부지열수의 수리지화학적 규명

조병욱* · 윤 욱 · 송윤호
한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Evaluation of Hydrogeochemistry of Geothermal Water at Heunghae, Pohang Using Pumping Test Results

Byong Wook Cho* · Uk Yun · Yoon Ho Song
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

Hydrogeochemistry of deep geothermal water (temperature: 42.2-47.9°C) at Heunghae, Pohang was evaluated using core logging, temperature and electrical conductivity (EC) logging before and after pumping tests, chemical analysis of geothermal water with depth, and observation of water quality variations during pumping tests. The geology of the area is composed of highly fractured marine sedimentary rocks. The hydrogeochemistry of geothermal water varies with drilling depth, distance from the coast, and pumping duration. According to the temperature and EC variations during 4 times of pumping tests, main aquifer of the area is considered as the fractured zones (540 to 900 m) developed in rhyolitic rocks. The high content of Na and HCO_3 in geothermal water can be explained by the inflow of deep groundwater from inland regulated by dissolution of silicates and carbonates. High TDS, Na and Cl concentrations indicate that the geothermal water was also strongly affected by seawater. The molar ratios of Na:Cl (0.88~2.14) and Br:Cl (21.0~24.9 × 10^{-4}) deviate from those of seawater (0.84 and 34.7 × 10^{-4}, respectively), suggesting that water-rock interaction also plays an important role in the formation of water quality.

Key word : Geothermal water, Drilling depth, Pumping test, Electrical conductivity, Seawater

요 약 문

코아검층, 양수시험 전후의 온도와 전기전도도 검층, 심도별 지열수의 수질분석, 양수시험시 지열수의 수질변화 관측을 통하여 포항 흥해지역 심부지열수(42.2-47.9°C)의 수리지화학적 특성을 고찰하였다. 연구지역의 지하지질은 파쇄정도가 심한 해성 기원의 퇴적암류로 구성되어 있으며, 지열수의 수질은 굴진심도, 해안으로부터의 거리, 양수시간에 따라 달라짐을 보였다. 4차례의 양수시험시 수온, 전기전도도 변화를 볼 때, 연구지역 지열수의 주 대수층은 심도 540-900 m까지의 유문암에 발달된 파쇄대로 판단된다. 연구지역 지열수의 Na와 HCO_3 함량이 높은 것은 탄산염과 규산염의 용해가 활발한 내륙쪽에서 유입되는 심부 지하수의 기여 때문으로 판단된다. 연구지역 지열수는 높은 총고용물질, Na, Cl 함량으로 보아 해수의 영향을 많이 받았으나, Na : Cl 몰비가 0.88~2.14로 해수의 0.84보다 높으며, Br : Cl 함량비도 21.0~24.9 × 10^{-4}으로 해수의 34.7 × 10^{-4}에서 벗어나고 있어서 물-암석반응에 의해서도 영향을 받았음을 지시한다.

주제어 : 지열수, 굴진심도, 양수시험, 전기전도도, 해수

*Corresponding author : cbw@kigam.re.kr
원고접수일 : 2005. 8. 3 게재승인일 : 2006. 3. 24
질의 및 토의 : 2006. 8. 31 까지

1. 서 론

포항지역 일대는 높은 지열류량을 가지는 지역으로 알려져 있어서(김형찬 외, 2004) 온천 개발과 같은 지열이용과 관련된 많은 조사, 연구가 수행되어 왔다. 이 중에서도 연구지역인 포항시 흥해읍 일대에서 수행된 온천공 조사로는 영일 성곡지구(배두종 외, 1993), 포항(성곡) 지구(문상호 외, 2000), 포항(장성) 지구(이철우 외, 2002), 포항(이인) 지구(이철우 외, 2003) 등이 있다. 이들 온천공들의 심도는 290~620 m이고, 2~3일간의 비교적 짧은 양수시험 시 양수온도는 26.7-38.1°C, 분석된 수질은 전기전도도가 601~8,110 μS/cm이고 수질유형은 Na-HCO_3에서 Na-Cl형을 나타낸다. 한편 연구지역 심부 지열수에 대한 지화학적 연구도 이루어졌으나(고동찬 외, 2004; 김통권 외, 2004), 이 역시 1회 양수시험 시 채취된 지열수의 수질분석자료를 이용하였다.

그러나 여러 대수층을 관통한 지하수공에서 양수시에는 영향범위 내에 있는 모든 대수층의 지하수가 섞여서 배출되기 때문에 짧은 양수시험, 또는 1회성 양수시험 시 채취된 분석 자료로 그 지역 지하수의 수질을 결정지우는 데는 어려움이 많다(Gaona-Vizcayno et al, 1985). 특히 본 지역과 같이 해안가에 가까이 위치해 있어 해수의 영향이 예상되고, 지하 지질이 단일암이 아닌 지역에서는 양수시 배출되는 지하수의 수질은 그 지하수공이 관통하고 있는 지질, 대수층의 발달상태, 지하수공의 공내 설계 등에 의해서 달라질 수 있다. 즉, 지하수공이 관통한 지질이 여러 개일 경우에는 양수시험시 비록 수리역학적으로는 안정에 도달한 것처럼 보여도 수질적인 측면에서는 계속 변화가 일어날 수 있다. 반면에 단일암에 발달한 대수층을 관통한 지하수공의 수질은 양수 초기나 양수 후기, 장기간 양수 후에도 큰 변화가 없을 것이다.

본 연구지역은 해안에 가까이 위치해 있으며, 제 3기의 이암, 응회암, 사암 등으로 구성된 포항시 흥해읍에 굴착된 지열수공에서 코아검층, 3회의 온도검층과 전기전도도 검층을 수행하고 아울러 굴진심도별 4회의 양수시험시 수질분석을 수행함으로써 이 지역 심부지열수의 수리지화학적 특성을 파악하고자 하였다.

2. 지질 및 굴착공 현황

연구지역은 제 3기 포항분지의 중부에 해당하는 포항시 흥해읍 성곡리 일대로서 포항시 도심에서 북쪽으로 약 6 km, 동해안으로부터는 약 6~8 km 정도 떨어져 있다(Fig. 1). 연구지역 일대는 일종의 분지형태를 띠고 있는데, 북동 방향을 제외한 지역은 높은 산지로 둘러 쌓여 있으며, 따라서 주 하천인 초곡천도 북동쪽으로 흘러서 곡강천에 유입되고 있다. 이 지역은 백악기 경상누층군의 하양층군에 속하는 퇴적암류를 최저 기층으로 하여, 이를 분출하여 덮거나 관입한 제 3기 에오세의 석질결정질응회암(lithic crystal tuff), 흑운모화강암, 규장암, 결정질응회암

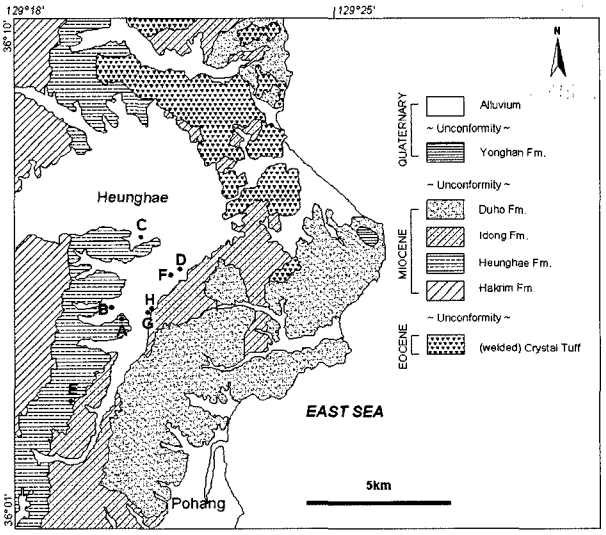

Fig. 1. Geology and borehole location of the study area.

Table 1. Depth and location of geothermal wells in the study area

Well	Depth (m)	Casing (m)	X UTM (m)	Y UTM (m)	El. (m)	Distance from the coast (km)
A	490	–	530355	3993332	18.0	7.5
B	570	–	530007	3993410	16.0	7.2
C	500	–	531165	3994930	13.0	8.0
D	303	–	532062	3994211	11.7	6.8
E	435	–	529257	3990864	81.0	7.0
F	200	–	531716	3994009	12.5	7.1
G	1505	420	531655	3993064	14.1	6.2
H	1100	600	531813	3993107	13.0	6.0

등이 기반암을 이루고 있다. 이 기반암에 천북역암, 학림층, 홍해층, 이동층, 두호층 등으로 구성된 제 3기 마이오세의 연일층군 지층들이 덮혀있다(송윤호 외, 2004). 이 지층들은 최하위에 육성 기원의 퇴적층을 일부 포함하나, 주로 해성환경 기원의 반고결 쇄설성퇴적암류로 구성된다(Hwang, 1993).

현재까지 지열수를 직접 이용하기 위하여 연구지역내에 굴착된 지하수공은 8개가 있는데(Fig. 1), 이들의 굴착심도와 위치 등은 Table 1과 같다. 이들 굴착공 중에서 코아검층, 물리검층, 양수시험이 모두 실시된 곳은 굴착공 G이다. 굴착공 G의 굴진방법은 연구지역의 지층이 반고결층에 가깝고 파쇄정도가 심하기 때문에 로타리식으로 굴진되었다. 굴진 당시 주입수가 손실되는 구간은 대수층으로 구분하여 이 구간에는 스트레나가 설치되어 있다. 굴착공 G의 우물설계는 Fig. 2와 같은 바, 굴진 공경은 14"~6.5", 케이싱 구경은 12"~5"이다. 심도 420 m까지는 무공 케이싱이, 심도 420~1,335 m까지는 국부적으로 스트레나가 설치되어 있으며, 1,335 m부터 공저까지는 나공(open hole)이다. 굴착공 G에서 지열수의 수질변화를 파악하기 위한 양수시험은 여러 차례 실시되었으나, 본 연구에 이용된 양수시험은 4차례로서 각 양수시험 당시 굴착공 G의 굴진심도는 1,030 m(1차), 1,335 m(2차), 1,505 m(3, 4차)이다.

3. 연구방법

연구지역 지열수의 수리지화학적 특성을 파악하기 위한 연구방법은 크게 코아검층과 물리검층, 심도별 수시료 채취와 분석, 양수시험시 현장 수질변화 측정과 실내 수질분석으로 구분된다.

지하수나 지열수의 수리지화학적 특성은 지질과 밀접한 관계가 있기 때문에, 굴착공 G와 H의 굴진시 회수된 슬러리(slurry)와 코아를 이용하여 연구지역의 지하지질을 파악하였다. G와 H에 대한 물리검층은 여러 항목이 이루어졌으나, 이들 공은 지열수를 개발할 목적이었고, 해안가에 가까이 위치하고 있기 때문에, 본 연구에서는 검층심도가 가장 깊은 굴착공 G의 온도검층과 전기전도도검층 자료만 이용하였다. 온도검층과 전기전도도검층은 굴진이 경과함에 따라 수차례에 걸쳐 이루어졌으나, 양수 전후 공내 수질분포 비교를 위하여, 1차 양수시험 직후인 2003년 12월 22일과(검층심도 1,000 m), 2차 양수시험 전후인 2004년 3월 15일과 4월 22일(검층심도 1,325 m)의 자료를 이용하였다. 한편 양수시의 수질과 공내 수질을 비교하기 위하여 샘플링 손데(sonde)를 이용, 굴착공 G에서 일정 심도별로 지열수 시료를 채취하였다. 검층에 이용된 기기는 영국 Robertson Geologging사의 Micro Logger II였다.

양수중 수질변화 관측은 총 4회에 걸쳐 이루어졌으며(Table 2), 각 양수시험 시 굴착공 G의 공내 사항은 Fig. 2와 같다. 양수를 위해서는 1차 양수시험시에는 40마력의

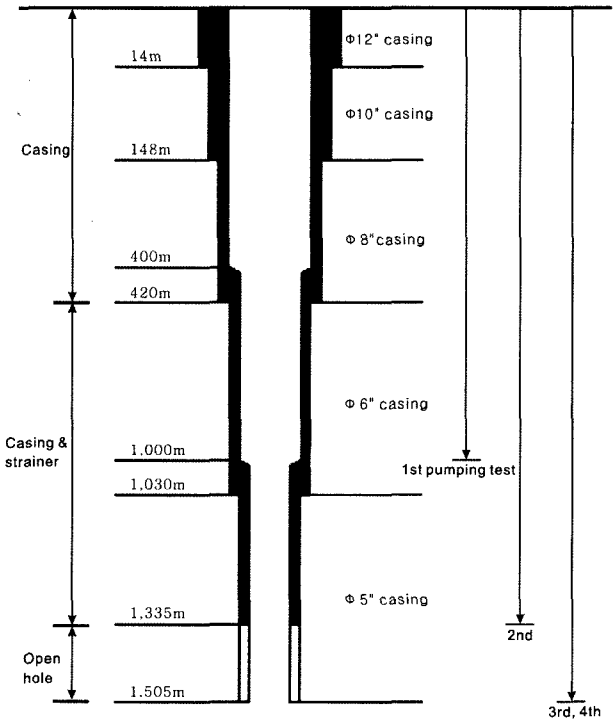

Fig. 2. Construction details of borehole G.

Table 2. Borehole conditions and results of the pumping tests

	Drilling depth (m)	Pump		Duration (min)	Q (m^3/d)	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	Eh (mV)	Date
		Capacity (Hp)	Depth (m)							
1st	1030	40	400	1450	360	42.2	8.28	2080	−97	12/19/03
2nd	1335	60	800	4320	340	45.3	8.05	2780	−48	04/06/04
3rd	1505	60	800	10920	340	46.3	8.12	2930	−103	10/27/04
4th	1505	60	800	8640	200-300	47.9	7.86	3550	−169	01/21/05

수중펌프를 심도 400 m에 설치하였으며, 2, 3, 4차시는 60마력의 수중펌프를 심도 800 m에 설치하였다. 양수량 조절은 오리피스 웨어(Orifice weir)를 사용하였다. 양수방법은 1, 2, 3차는 일정량에 가깝게 양수하였고, 4차는 200 m^3/d, 250 m^3/d, 300 m^3/d의 단계양수를 하였다.

양수 중에는 경과시간에 따른 지열수의 수질변화를 파악하기 위하여 휴대용 측정기를 이용, 일정시간별로 온도(SK-1250MC II, Sato), pH(HM-20P, TOA), EC(CM-21P, TOA), Eh(RM-20P, TOA)를 측정하였다. 온도 측정은 오리피스 토출구에서 직접 이루어졌으나, 수질측정은 공기접촉을 막기 위하여 Flow cell를 이용하였다. 알카리도는 0.0239 N의 황산으로 현장에서 적정하였다. 실내분석용 수시료는 각 양수시험의 종료 직전에 채취하였으나, 2차 양수시험시에는 일정시간별로 총 9회에 걸쳐서 채취하였다. 시료 채취는 0.45 μm의 여과지를 통과시킨 뒤 이루어졌으며, 양이온 시료의 경우는 흡착, 침전 등을 막기 위하여 농질산(65%)을 첨가하였다. 분석된 성분은 주 성분과 해수와 관계있는 Br 등이었으며, 양이온은 원자흡수분광광도계(AAS)와 유도결합플라즈마 원자방출분광광도계(ICP-AES)를, 음이온은 이온크로마토그래피(Dionex 300)를 이용하였는바, 모두 한국지질자원연구원에서 수행되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 코아검층 및 물리검층

굴착공 G의 굴진 시 얻은 슬러리(slurry)와 G로부터 165.3 m 떨어진 시추공 H의 굴진 시 회수된 코아를 이용하여 연구지역의 지하지질을 파악하였다. 구성 암석은 상부로부터 반고결이암, 조면현무암-응회암질퇴적암-화산력응회암-이암교호대, 유문암, 사암-이암교호대로 4대분되며, 굴착공 G와 H의 횡적 연속성은 좋은 편이다(Fig. 3). 코아감정에 따르면 전 심도에 걸쳐서 파쇄정도가 심하며, 파쇄대에는 대개 단층각력이 함유되어 있다. 각 암층별 지열수 유동과 관련되는 파쇄정도를 기술하면 다음과 같다.

반고결 이암층은 지표에서 심도 350 m까지의 구간으로서 부분적으로 박층의 사암 및 실트스톤이 협재되어 있다. 심도 350 m에서 540 m까지는 조면현무암-응회암질퇴적암-화산력응회암-이암교호대로서 평균 절리간격은 5~20 cm이다. 심도 540 m에서 900 m까지는 중성 맥암이 관찰되는 유문암체로 이루어져 있는데, 일부 구간을 제외한 대부분 구간에서 심한 균열이 발달되어 있어, 4대분된 암층 중에서 가장 심한 파쇄를 보인다. 평균 절리간격은

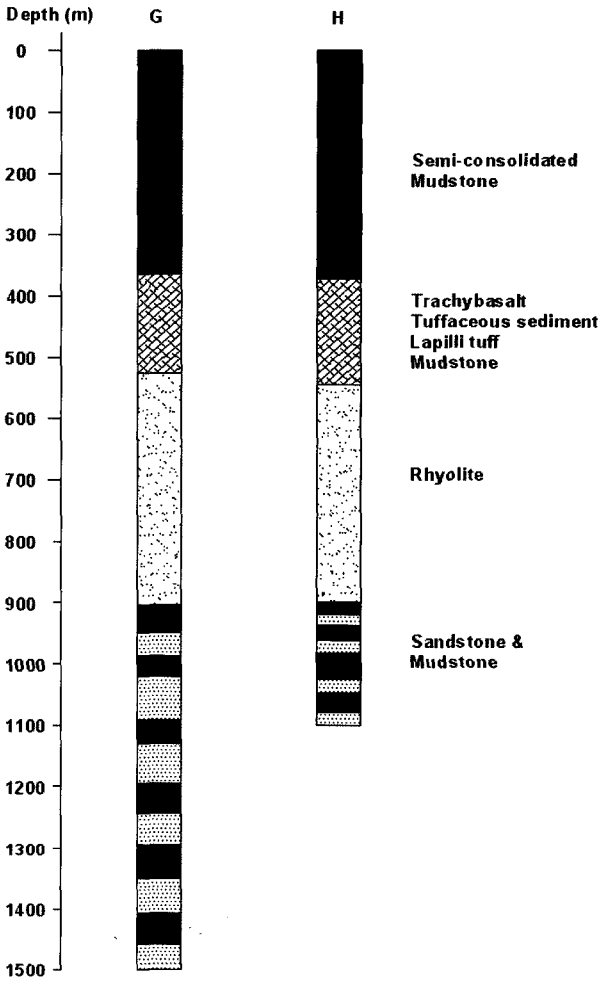

Fig. 3. Stratigraphy of the study area from the borehole log G and H.

1~5 cm이다. 심도 900 m에서 공저인 1,505 m까지는 사암과 이암의 호층으로 구성되는데, 박층의 역암과 흑색 세일이 협재하며, 평균 절리간격은 5~20 cm이다(송윤호 외, 2004). 전체적으로 보아서 전 심도에 걸쳐서 파쇄가 심하나, 특히 540~900 m까지의 유문암에서 그 정도가 가장 심하다.

물리검층은 굴착공 G에 대한 온도검층과 전기전도도검층 자료를 이용하였다. 이는 이 지역 일대가 지열대이고, 또한 해안가에 가까이 위치하고 있기 때문이다. 굴착공 G에서는 굴진이 진행됨에 따라 수차례에 걸쳐 검층이 이루어졌으나, 대표적으로 1차 양수시험이 실시된 직후인(굴진심도 1,030 m) 2003년 12월 22일과 2차 양수시험 전과 후인(굴진심도 1,335 m) 2004년 3월 15일, 4월 22일의 검층자료를 이용하였다(Fig. 4). 온도검층 결과에 따르면 케이싱 설치 부근인 심도 420 m에서 35.0~37.3°C이

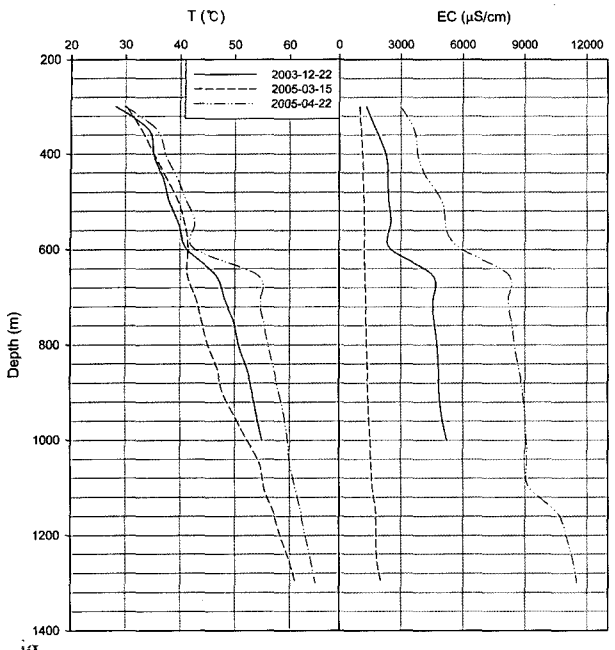

Fig. 4. Temperature and electric conductivity loggings at borehole G.

고, 심도 1,300 m에서 61.0~64.6℃를 나타낸다. 전반적으로 보아서 양수시험 후의 공내 온도가 양수시험전보다 높으며, 특히 심도 670 m에서 급격한 온도변화를 보인다. 전기전도도 검층결과는 온도검층 결과보다도 양수의 효과를 더 뚜렷이 보여준다. 2차 양수시험 전의 공내 전기전도도 분포는 심도 400 m에서 1,130 μS/cm이며, 심도 1,300 m에서 약 2,020 μS/cm를 보이나, 양수시험 후 검층결과는 심도 400 m에서 3,800 μS/cm, 심도 1,300 m에서 11,500 μS/cm 정도를 기록하여, 심도가 깊어질수록 전기전도도 값은 증가하고, 또한 양수 전보다는 양수 후에 전기전도도가 증가함을 알 수 있다.

이와 같이 양수 전후 공내 지열수의 온도와 전기전도도에 큰 차이를 보이는 것은 양수 전에는 굴진을 위하여 주입된 지표수에 의해서 정상적인 공내 온도와 전기전도도보다 낮아졌기 때문이며, 양수 후 검층된 온도와 전기전도도는 양수 시 공저 부근의 높은 온도와 전기전도도를 가진 지열수가 수중펌프로 흡입된 영향이 아직 공내에 남아 있기 때문으로 판단된다. 따라서 정확한 공내 온도와 전기전도도를 파악하기 위해서는 충분한 시간동안 공내 안정을 이룬 후 실시되어야 할 것이다. 예를 들면 심도 1,000 m의 수온과 전기전도도는 2차 양수시험 전 검층 시에는 각각 52.2℃, 1,500 μS/cm이고, 2차 양수시험 후 검층 시에는 각각 59.6℃, 9,050 μS/cm이나, 심도 1,000 m의 실제 수온과 전기전도도 값은 1차 양수시험 후 검층된 54.9℃와 5,200 μS/cm가 정확한 값으로 볼 수 있다. 양수시험 전, 후의 공내 온도, 전기전도도 검층결과를 볼 때, 굴착공 G의 주 대수층은 심도 670 m 부근으로 예상되며, 심도 1,100 m 부근에서도 어느 정도의 지열수를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 코아검층시의 지질대별 절리발달에서와 같이 심도 540~900 m 유문암 구간에서 절리발달이 가장 우세하다는 사실과 일치한다.

4.2. 심도별 지열수의 수질

지열수나 지하수의 수리지화학적 특성은 굴착공의 굴진심도에 따라 변할 수 있다. 즉, 굴진이 증가함에 따라 지질이 서로 다른 새로운 대수층을 만날 경우에 지하수나 지열수의 수리지화학적 특성이 변할 수 있다. 굴착공 G의

Table 3. Physicochemical data of groundwater samples with depth from borehole G

Sample depth (m)	pH	EC (μS/cm)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO_4	HCO_3	Br	F	SiO_2
			(mg/L)									
500	9.58	3890	12.3	866.2	1.9	2.4	625.0	212.6	1072	1.7	3.5	7.1
635	8.34	5330	16.4	1188	19.6	7.8	994.0	540.8	939.0	2.7	3.3	30.4
700	8.38	5340	15.9	1150	19.2	7.4	1002	550.1	933.3	2.8	3.4	32.3
760	8.33	5330	15.2	1150	19.7	7.6	984.2	533.6	934.1	2.5	3.4	30.8
850	8.44	5350	15.2	1152	20.3	7.9	1005	549.3	927.5	2.3	3.4	31.0
1100	8.39	6390	18.6	1311	26.4	10.2	1346	676.0	820.9	3.5	2.4	32.7
1230	8.32	6470	19.3	1430	27.8	10.7	1371	702.3	804.4	3.1	2.4	34.5
1350	8.29	10590	32.1	2164	84.7	30.4	3165	353.3	624.4	8.4	2.2	21.6
1497	7.89	20100	58.3	4036	264.1	76.7	7101	192.0	302.6	20.9	1.0	6.6
Seawater[1)]	7.96	50700	440	9850	364	1180	20150	2730	134	71.0	0.1	0.19
Seawater[2)]			380	10500	400	1300	19000	2650	140	65.0	1.3	–

1) Seuldo lighthouse (Cho et al., 2003), 2) Garrels et al., 1975

심도별 공내 수질변화를 파악하기 위하여 굴착공 G에서 제 4차 양수시험 직전인 2005년 1월에 Micro Logger II의 샘플링 손데를 사용, 지열수를 채취하여 현장에서 수질을 측정하고, 실내 수질분석을 하였다(Table 3). 이 심도별 샘플링 시점은 최종적으로 양수가 이루어진 2004년 11월 18일로부터 약 50일이 지난 뒤여서 어느 정도 공내 수질이 안정된 시기이기도 하다. 전체적인 심도별 지열수의 전기전도도 분포 형태는 2차 양수시험 후에 검층된 전기전도도 결과(Fig. 4)와 비슷한 값을 보인다. 즉, 심도가 깊어질수록 전기전도도가 증가하여, 공저 부근인 심도 1,497 m 지점에서는 해수의 절반에 가까운 20,100 μS/cm을 기록한다. 심도 1,100 m, 1,350 m에서 채취된 전기전도도 값 6,390 μS/cm, 10,590 μS/cm은 비교적 정확한 전기전도도 값으로 볼 수 있는 심도 1,000 m, 1,350 m의 5,200 μS/cm, 11,500 μS/cm과 비슷하다. 굴착공 G의 4개 암층중 유문암 구간(540 m~900 m)으로 알려진 심도 635 m, 700 m, 760 m, 850 m 지점에서 채취된 시료의 전기전도도와 분석된 수질 성분의 함량은 서로 비슷하여, 다른 지질 구간에 비해서 이 구간의 지하수 흐름이 활발함을 예상할 수 있다.

굴착공 G에서 채취된 심도별 지열수의 주요 성분 함량을 비교하였다(Fig. 5). Fig. 5에서 보는 바와 같이 심도가 깊어질수록 HCO_3, F, SiO_2 함량은 감소하고 나머지 주요 성분들의 함량은 증가하여, 지열수의 수질 조성은 점점 해수에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 음이온 중에서 HCO_3의 함량이 높은 이유는 탄산염광물의 풍화와(윤욱과 조병욱, 2005), 2차 양수시험시 지열수의 CO_2의 함량이 24~48 mg/L로 높은 점(김통권 외, 2004) 등을 들 수 있다. 양이온 중에서는 Na의 함량이 높은데, 이는 해수 기원뿐만 아니라 이 지역 지질환경과도 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉, 검출된 Na의 상당 부분은 높은 CO_2 함량에 의해 규산염광물 내 알카리 원소의 용해도 증가에 기인한(Ellis and Mahon, 1977) 것으로 판단된다. Na : Cl 농도비는 담수가 해수를 대치하거나 해양성퇴적물을 세척하였을 때 증가한다고 보고된 바도 있기 때문에(이상규 등, 2000), 천부 지하수의 유입 또는 내륙쪽 에서 유입되는 심부 지하수의 기여가 높아져서(Chae et al., 2006) 지열수의 Na : Cl 몰비가 증가했을 가능성도 있다. 따라서 연구지역 지열수의 수질조성은 해수의 형태를 보이나, Na:Cl 몰비는 해수의 비로 알려진 0.84(Morris and Riley, 1966), 울산 슬도등대 해수의 0.75(조병욱 외, 2003)보다 훨씬 높은 0.88~2.14의 범위를 나타낸다(Table 3). 한편 지열수의 Mg 양은 상당히 적은데, 이는 본 연구지역이

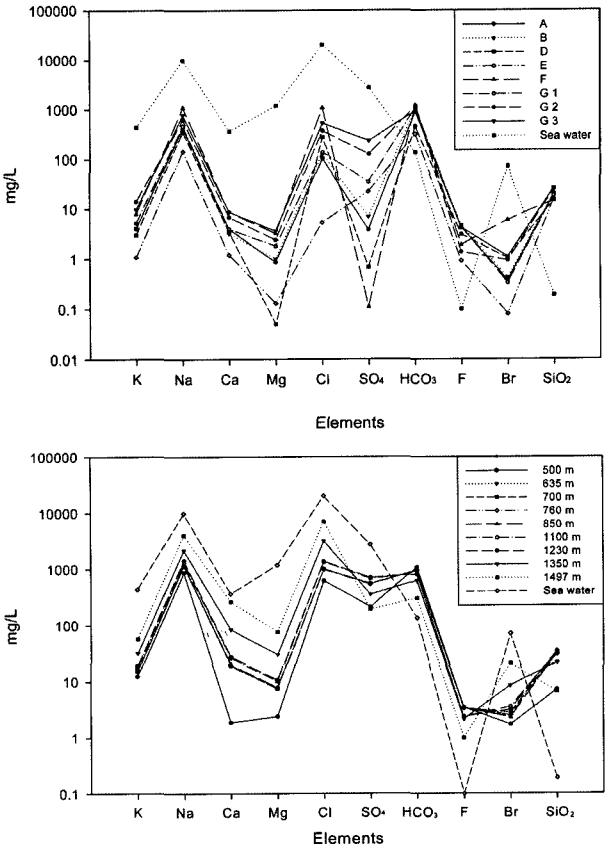

Fig. 5. Diagram showing the change of major ion concentrations in seawater and groundwater samples with depth from borehole G.

지열대이고, 심도가 깊어서 규산염광물내 이온교환반응에 따른 Mg 이온의 고갈 때문으로(Ellis, 1971) 판단된다. 굴착공 G의 심도별 수질을 볼 때, 지열수의 수질은 심도가 깊어질수록 해수의 영향을 많이 받았으나, 물-암석 반응에 의해서도 영향을 받았음을 지시한다.

심도별 지열수의 수질조성을 해수와 비교하기 위하여 Fig. 6에서와 같이 주요 성분들의 epm%를 Piper diagram에 도시하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 지열수의 수질조성은 심도가 깊어질수록 점점 해수에 가까워짐을 보인다. 즉, 양이온의 삼각다이아그램보다는 음이온의 삼각다이아그램에서 뚜렷한 차이를 보이는데, 이는 심도가 깊어질수록 천부지하수의 유입이 용이하지 않고, HCO_3보다는 해수의 영향에 의한 Cl과 SO_4의 함량이 차지하는 비율이 점점 높아지기 때문으로 판단된다. 심도별 지열수의 주요 성분 함량과 수질조성을 볼 때 각 지질대에 따른 지열수의 수질특성을 관련시키기는 어려운데, 이는 물-암석반응에 의한 영향보다는 해수에 의한 영향이 더 크기 때문으로 판단된다.

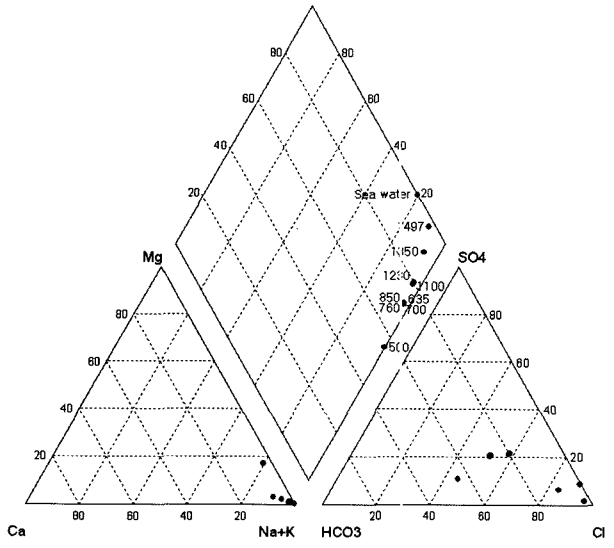

Fig. 6. Piper plot showing the chemistry change of groundwater samples with depth from borehole G.

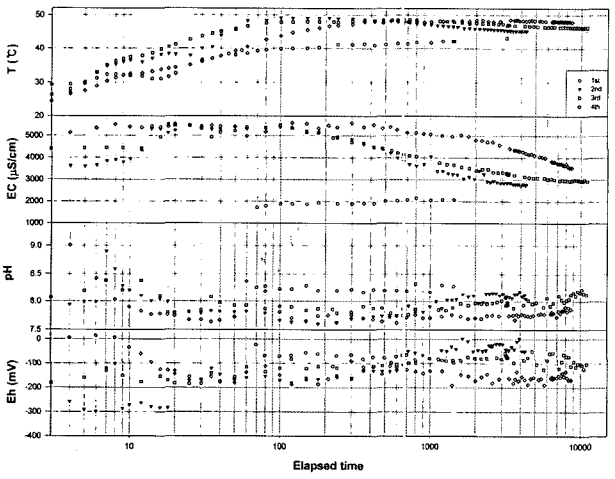

Fig. 7. Temperature, Ec, pH, and Eh variations during pumping test for the well G.

4.3. 양수시간에 따른 지열수의 수온, 현장수질 변화

굴착공 G에서는 여러 차례의 양수시험이 있었으나, 여기서는 대표적으로 2003년 12월 17일(1차), 2004년 4월 6일(2차), 2004년 10월 27일(3차), 2005년 1월 21일(4차) 양수시험 결과만을 이용하였다. 4차례 양수시험 결과에 대한 자세한 사항은 Table 2와 같다. Fig. 7은 4차례의 양수시험기간 동안 측정된 지열수의 수온, 전기전도도, pH, Eh 변화를 도시한 것이다.

먼저 지열수의 수온 변화를 보면 다음과 같다. 굴진심도가 1,030 m인 상태에서 실시된 1차 양수시험시의 수온은, 경과시간 3분에 29.3°C부터 상승하여 양수종료시인 1,450분에는 42.2°C로 거의 안정을 이룬다. 굴진심도가 1,335 m인 상태에서 3일간 실시된 2차 양수시험에서는 경과시간 4분에 27.0°C에서 상승하여, 경과시간 100분에 49.2°C로 최고 수온을 보이다가 점점 낮아져서 양수종료시인 4,320분에는 45.3°C를 기록한다. 굴진심도가 1,505 m인 3차 양수시험에서는 경과시간 3분에 26.3°C, 720분에 48.6°C로 최고를 기록한 후 계속 낮아져서, 양수종료시에는 46.3°C로 안정을 이룬다. 역시 굴진심도가 1,505 m인 상태에서 실시된 4차 양수시험은 양수량이 200, 250, 300 m^3/d인 단계양수시험으로 실시되었다. 양수시간 4분에 32.5°C부터 시작하여 경과시간 210분에 49.9°C로 최고를 기록하나, 이후 계속 낮아져서 경과시간 7,500분부터 양수종료시까지는 47.7°C를 유지한다. 3차, 4차 양수시험은 Table 2에서 보는 바와 같이, 양수조건이 거의 같은데도 불구하고, 4차 양수시험시의 수온이 높은 것은, 굴진시 사용되었던 주입수가 3차 양수시험으로 인해서 상당부분 제거되었기 때문으로 보인다. 4차례의 양수시험 시 측정된 수온변화를 보면, 굴진심도가 깊어질수록 양수 수온이 상승함을 보인다. 그러나 굴진심도가 1,030 m에서 1,335 m, 1,505 m로 증가하였음에도 불구하고 양수종료시 수온이 42.2°C에서 45.3°C, 46.3°C, 47.9°C로 온도검층시 공저온도인 54.9°C(1,030 m), 65.2°C(1,335 m), 70.2°C(1,505 m)에 비해서 크게 증가하지 못한 것은, 지하 심부로 갈수록 투수성이 낮아진다는 점, Fig. 2에서 보는 바와 같이 공저로 갈수록 굴진 구경이 작아지는 점, 코아검층에서와 같이 심도 540~900 m 구간의 유문암체에서 파쇄대의 발달이 가장 큰 점 등을 들 수 있다. 1차 양수시험시에는 수온이 계속 상승하면서 42.2°C로 안정을 이루는 반면, 2, 3, 4차 양수시험시에는 양수경과시간 200분경부터 수온이 낮아지면서 45.3°C, 46.3°C, 47.9°C로 안정에 가까워지는 점과, 심도 1,030 m의 온도가 54.9°C인 점 등으로 볼 때, 굴착공 G의 주 대수층은 심도 540-900 m 부근의 유문암체임을 지시한다.

양수시험시 지열수의 전기전도도 변화는 온도변화와 비슷한 경향을 보인다. 1차 양수시험시의 전기전도도는 온도 변화와 마찬가지로 양수종료시까지 상승하여 2,080 μS/cm을 보인다. 그러나 2, 3, 4차 양수시험 시 전기전도도 변화는 경과시간 20분 내외에서 5,500 μS/cm 내외의 최고값을 기록하고는, 서서히 낮아져서, 양수시험 종료시에는 각각, 2,780, 2,930, 3,550 μS/cm를 기록한다. 이러한 지열수의 전기전도도 값은 검층시 얻은 심도 1,000 m의 5,200 μS/cm보다도 낮은 값으로서, 양수 시 수온변화와 마찬가지로 굴착공 G의 주 대수층은 심도 540-900 m

내외의 유문암체임을 지시한다. 1차보다는 2차, 2차보다는 3, 4차 양수시험시 전기전도도 값이 높은 것은 굴진심도가 1,030 m, 1,335 m, 1,505 m로 증가였기 때문이며, 굴진심도가 깊을수록 전기전도도 값이 증가하기 때문이다 (Table 3, Fig. 4).

양수시험시 pH와 Eh값도 수온과 전기전도도처럼 일관된 변화양상을 보인다. 즉, 굴진심도가 깊은 양수시험일수록 pH는 낮아져(Table 2) 해수에 가까운 값을 보인다. 양수종료시의 Eh도 굴진심도가 깊은 3, 4차 양수시험시가 1, 2차시보다 낮은 값을 보여서 보다 심부의 지열수가 배출됨을 의미한다. 양수시간 경과에 따른 pH와 Eh 값의 변화는 1차 양수시험을 제외하고는 양수시간이 경과할수록 약간씩 높아져서, 보다 천부의 지열수가 굴착공 G로 유입됨을 시사한다.

4차례의 양수시험시 지열수의 수온, EC, pH, Eh 변화를 종합하면 다음과 같다. 굴진심도가 1,030 m인 1차 양수시험시에는 양수시간이 경과할수록 수온과 전기전도도는 점점 상승하고, Eh는 감소하여 보다 공저 부근의 지열수가 배출됨을 시사한다. 그러나 2차 양수시험(굴진심도 1,335 m)과 3, 4차 양수시험(굴진심도 1,505 m)시에는 양수시간이 지날수록 지열수의 수온과 전기전도도는 점점 낮아지고, pH와 Eh는 점점 높아져서, 보다 상부 대수층의 지열수가 굴착공 G로 유입됨을 시사하고 있다(Gaona-Vizcayno et al., 1985). 또한 Fig. 7에서 보는 바와 같이 1, 2, 3, 4차 양수시험시 수온과 전기전도도도 양수시간이 경과할수록 그 차이가 점점 적어져, 굴진심도 차이 만큼의 수온과 전기전도도 차이 효과를 보이지 않는다. 즉, 굴진심도가 1,030 m, 1335 m, 1505 m로 달라져도, 굴착공 G의 주 대수층은 심도 540-900 m 내외의 유문암체임을 지시한다. 굴착공 G에는 심도 420 m까지 케이싱이 설치되어 있고(Fig. 2), 심도가 490 m와 303 m인 굴착공 A, D에서의 양수시험 시 수질, 수온변화 결과에서도(문상호 외, 2000; 배두종 외, 1993) 연구지역 일대의 주 대수층은 유문암에 발달된 파쇄대 임을 시사하고 있다.

4.4. 양수중 지열수의 주요 성분 함량 변화

양수시간 경과에 따른 지열수의 주요 성분의 함량 변화 파악을 위하여 대표적으로 2차 양수시험시에는 일정시간별로 총 9회에 걸쳐서 수시료를 채취하고 분석하였다 (Table 4). 분석된 결과에 따르면 양수가 진행됨에 따라서 지열수의 주 성분과 Br의 함량은 감소하는 반면에 HCO_3와 F의 함량은 증가하여, 공저 부근의 해수 기여가 강한 지열수보다는 보다 천부 또는 내륙쪽에서 유입되는 전형적인 심부 지하수의 기여가 높아지는 지열수가 배출됨을 지시하고 있다. 이러한 양수중 지열수의 주요 이온 함량 변화는 양수시간이 경과할수록 지열수의 수온과 전기전도도가 감소하고 Eh는 증가하여, 보다 천부 지열수의 유입이 점점 증가하는 경향과 일치하고 있다. 또한 양수가 진행됨에 따라서 Na : Cl 몰비도 경과시간 120분의 1.87에서 양수 후기인 경과시간 3,810분에는 2.94까지 상승함을 보인다.

양수시간에 따른 지열수의 수질조성을 파악하기 위하여 주 성분의 epm%를 Piper diagram에 도시하였다(Fig. 8). Fig. 8에서 보는 바와 같이 양이온의 삼각다이아그램에서는 양수시간이 경과해도 지열수의 주성분은 Na임에 변화가 없다. 그러나 음이온의 삼각다이아그램에서는 Cl과 SO_4 우세 영역에서 점점 HCO_3 우세 영역으로 이동하고 있어서 역시 천부 지열수의 유입을 지시하고 있다. 이와 같이 양수시간이 지남에 따라 음이온의 주 성분이 Cl에서 HCO_3로 이동하는 것은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 공저에서 상부로 올라올수록 지열수의 수질조성이 Cl 영역에서 HCO_3 영역으로 이동하고 있는 것과 비슷하며, 양수

Table 4. Physicochemical variations during 2nd pumping test from borehole G

Elapsed time (min)	EC (μS/cm)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO_4	HCO_3	F	Br	SiO_2
		(mg/L)									
120	5360	23.61	1280	17.5	7.14	1057	635.0	909.2	0.10	2.79	28.7
900	3700	18.15	830	9.66	3.96	656.2	277.5	915.3	0.72	1.41	25.5
1300	3290	17.41	743	8.38	3.19	548.7	213.9	1019	0.68	1.36	24.8
1650	3050	15.66	700	7.74	2.86	493.5	186.0	1043	1.39	1.27	24.4
2400	2920	14.91	651	7.21	2.57	267.6	98.3	1050	1.44	0.64	24.2
2560	2880	14.61	642	7.19	2.52	407.9	142.5	988.5	1.38	1.24	24.8
3060	2840	14.43	618	6.78	2.44	393.9	135.8	1068	1.31	0.96	24.4
3810	2800	14.34	611	6.87	2.38	320.8	107.9	1098	1.38	0.86	24.6
4170	2780	14.07	611	6.81	2.35	371.4	124.2	1129	1.37	0.92	24.4

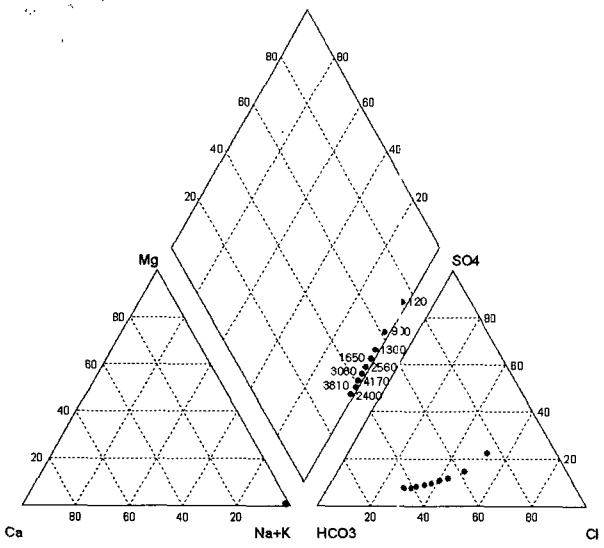

Fig. 8. Piper plot showing the change of water chemistry with pumping time at borehole G.

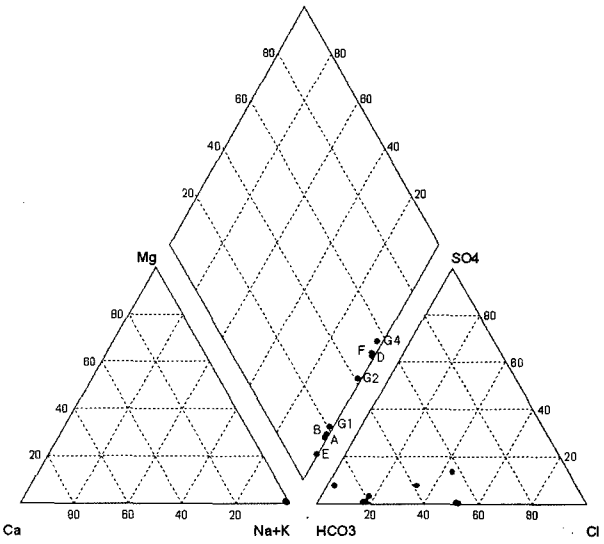

Fig. 9. Piper plot showing the chemistry of geothermal waters in the area.

가 진행 될수록 보다 천부 지열수의 배출이 우세함을 의미한다.

4.5. 굴진심도, 해안으로부터의 거리와 지열수의 수리지화학적 특성

심도별 연구지역 지열수의 수리지화학적 특성 변화는 굴착공 G에서 확인할 수 있었다. 굴진심도별 양수시 주요 성분의 함량변화를 파악하기 위하여 굴착공 G에서 양수 종료시 3차례의 시료채취가 이루어졌다. 시료 G1은 1차 양수시험(굴진심도 1,030 m), G2는 2차 양수시험(굴진심도 1,335 m), G4는 4차 양수시험(굴진심도 1,505 m) 종료시에 채취된 시료이다. 수질분석 결과는 Table 5와 같은 바 굴진심도가 깊은 양수시험일수록 전기전도도가 높아져 해수의 영향을 더 많이 받았음을 시사한다. 이와 같은 사실은 Fig. 9의 Piper diagram에서 확인할 수 있는데 굴진심도가 얕은 G1 보다는 G2, G2보다는 G4의 수질조성이 보다 해수의 것에 가까워지고 있음에도 잘 나타나고 있다.

굴진심도 뿐만 아니라 해안으로부터의 거리 또는 해발고도에 의해서도 과거 지열수에 미친 해수의 영향 정도가 달라지기 때문에, 양수시험이 이루어진 굴착공 G 주변 지열수공에 대하여 제원과(Table 1) 수질분석자료를 수집, 분석하였다(Table 5). 굴착공 F의 경우 굴진심도는 200 m에 불과하지만, 해안에 가까이 위치하고 있고, 해발고도도 12.5 m로 낮아서 전기전도도는 1,686 μS/cm이나, 굴착공 E는 굴진심도가 435 m이지만 해발고도가 81 m여서 전기전도도는 601 μS/cm로 굴착공 F의 전기전도도보다 훨씬 낮다. 굴착공 D의 경우는 심도가 303 m에 불과

Table 5. Result of chemical analysis of geothermal water in the area

Bore hole	EC (μS/cm)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO_4	HCO_3	F	SiO_2	Br	Br/Cl ($\times 10^{-4}$)	Date
		(mg/L)											
A	1806	4.01	424	3.94	0.85	102	3.82	884	4.25	19.6	0.37	36.3	17/04/05
B	1936	4.16	460	3.19	1.00	126	6.95	1007	4.62	20.1	0.42	33.3	17/04/05
D	1671	3.02	353	3.46	0.05	276	0.68	448	3.06	14.8	1.02	37.0	17/04/05
E	601	1.07	143	1.19	0.13	5.3	22.1	316	0.91	15.6	–	–	17/04/05
F	1686	3.20	350	4.30	0.40	280	3.00	449	3.20	15.3	0.87	31.1	09/21/04
G1	1987	5.22	466	3.96	1.81	136	34.7	1053	4.40	18.4	0.33	24.3	12/21/03
G2	2780	14.1	611	6.80	2.40	371	124	1129	1.37	24.4	0.92	24.9	04/09/04
G4	3550	9.70	766	8.70	3.60	525	233	909	4.20	25.8	1.10	21.0	01/27/05

하지만, 심도가 490 m, 570 m인 굴착공 A, B와 전기전도도 값이 비슷할뿐더러 수질조성은 해수에 더 가깝다(Fig. 9). 따라서 연구지역 지열수의 수질은 심도뿐만 아니라 해안으로부터의 거리, 해발고도에 의해서도 해수의 영향정도가 결정된다고 볼 수 있다.

Br : Cl 중량비는 해수침입 또는 해수 영향의 중요 지시자로 알려져 있다(Richter and Kreitler, 1993). 일반적으로 물속의 브롬과 염소이온은 비반응성이 가장 큰 화학적으로 안정한 이온이고, 환원환경에서 침전하지 않으며, 다른 광물이나 유기물에 흡착되지도 않는다(Fetter, 1993). 그러나 유기물의 분해나 점토광물과 철 산화물에 흡착되어 있는 브롬에 의해서 Br : Cl 중량비는 영향을 받을 수 있다. 연구지역 지열수의 Br : Cl의 중량비는 G1, G2, G4의 경우는 21~24.9 × 10^{-4}를 보이는 반면, 굴착공 E를 제외한 심도 200~570 m의 나머지 굴착공의 경우는 31.1~37.0 × 10^{-4}을 보여 일반적으로 해수의 Br : Cl 중량비로 알려진 34.2 × 10^{-4}(Morris and Riley, 1966), 울산 슬도 해수의 35.3 × 10^{-4}(조병욱 외, 2003)과 비슷한 값을 가진다. 굴착공 G를 제외한 나머지 공들의 Br : Cl 중량비가 해수의 것과 비슷한 반면, 굴착공 G의 경우는 해수의 것에서 벗어나고 있는 것은 굴진심도의 차이, 즉 물-암석 반응시간의 차이에 의한 것으로도 볼 수 있으나 이는 좀 더 연구해야할 사항이다.

5. 결 론

연구지역 지열수공에서 코아검층, 온도와 전기전도도검층, 심도별 수질, 양수시험시 수질변화, 주변 지열수공들과의 수질비교 등의 연구를 통하여 연구지역 지열수의 수리지화학적 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연구지역의 지하지질은 주로 해성환경 기원의 반고결 쇄설성퇴적암류로 구성되어 있으며, 상부로부터 반고결이암, 조면현무암-응회암질퇴적암-화산력응회암-이암교호대, 유문암, 사암-이암교호대로 4대분 된다. 전 구간에 걸쳐서 파쇄정도가 심하며, 특히 유문암구간에서 그 정도가 가장 심하다.

2. 지열수의 수질은 심도가 깊을수록, 해발고도가 낮을수록, 해안으로부터 가까울수록 해수의 영향을 많이 받았기 때문에 굴진심도, 양수시간, 위치에 따라 수질은 달라질 수 있다. 지하지질과 지열수 수질과의 관련성은 해수의 영향이 크기 때문에 뚜렷이 나타나지 않는다.

3. 양수시험 전후의 온도, 전기전도도검층 결과 비교, 4차례의 양수시험시 수온, 전기전도도, pH, Eh 변화로 볼 때, 연구지역의 주 대수층은 심도 900 m까지의 반고결이암, 조면현무암-응회암질퇴적암-화산력응회암-이암교호대, 유문암에 발달된 파쇄대로 판단된다.

4. G공 지열수는 전기전도도가 높고 주 원소도 Na, Cl (HCO_3)이기 때문에 해수의 영향을 많이 받았으나, Na : Cl 몰비가 0.88-2.14로 해수의 0.84보다 높으며, Mg 이온의 결핍, Br : Cl 함량비도 21-24.9 × 10^{-4}으로 해수의 34.7 × 10^{-4}에서 벗어나고 있어서 물-암석반응에 의해서도 영향을 받았음을 지시한다.

5. 지열수의 성분 중 Na와 HCO_3 함량이 높은 것은 탄산염과 규산염의 용해가 활발한 내륙쪽에서 유입되는 심부 지하수의 기여가 높아지기 때문으로 판단된다. Na는 심도에 관계없이 양이온의 주 성분이나, 음이온의 주성분은 심도가 깊어질수록 HCO_3에서 Cl로 바뀐다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '심부지열에너지 개발 사업'(OAA2003001-2005(3)) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

고동찬, 이진수, 이승구, 송윤호, 2004, 포항지역 지열수에 대한 고찰, 2004 지하수토양환경학회 추계학술발표회, p. 453-454.

김통권, 이진수, 이승구, 송윤호, 2004, 포항지역 지열수에 대한 지화학적 고찰, 2004 지하수토양환경학회 추계학술발표회, p. 101-103.

김형찬, 이사로, 송무영, 2004, 남한지역 지질특성과 지열류량의 상호관련성, 자원환경지질, **37**(4), 391-400.

문상호, 이철우, 성기성, 김용제, 2000, 포항(성곡)지구 온천공 조사보고서, 한국자원연구소 온천공조사보고서, p. 62.

배두종, 이승구, 김옥환, 홍기균, 1993, 영일 성곡지구 온천공 조사보고서, 한국자원연구소 온천공조사보고서, p. 66.

송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성곤, 이종철, 이병태, 박인화, 이태종, 조병욱, 염병우, 이승구, 이봉주, 기원서, 박노욱, 박영수, 임무택, 현혜자, 손정술, 임형래, 황세호, 오재호, 김세준, 이윤수, 김민규, 박찬, 정용복, 천대성, 김통권, 이진수, 임성근, 2004, 심부지열에너지 개발사업, 한국지질자원연구원, p. 226.

윤욱, 조병욱, 2005, 심도변화에 따른 흥해지역 지하수의 수리 지화학적 특성, 지질공학, **15**(4), 391-405.

이상규 황학수, 황세호, 이승구, 이대하, 염병우, 문상호, 최위찬, 고동찬, 성낙훈, 박인화, 이철우, 2000, 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발, 한국지질자원연구원, p. 474.

이철우, 성기성, 2002, 포항(장성)지구 온천공 조사보고서, 한국지질자원연구원, p. 61.

이철우, 이종철, 민충기, 김용제, 성기성, 조용찬, 김구영, 2003, 포항(이인) 지구 온천공조사 보고서, 한국지질자원연구원, p. 65.

조병욱, 이병대, 윤욱, 임현철, 2003, 지하수의 Br : Cl 함량비를 이용한 울산지역 해수침입 연구, 자원환경지질, **36**(5), 339-347.

Chae, G.T., Yun, S.T., Kim, K.J., and Mayer, B., 2006, Hydrochemistry of sodium-bicarbonate type bedrock groundwater in the Pocheon spa area, South Korea: water-rock interaction and hydrologic mixing, *J. Hydrology*, **321**, 326-343

Ellis, A.J., 1971, Magnesium ion concentrations in the presence of Mg-chlorite, calcite, carbon dioxide, and quartz, *Am. J Sci.*, **271**, 481-489.

Ellis, A.J. and Mahon, W.A., 1977, Chemistry and geothermal systems, Academic Press, New York.

Fetter, C.W., 1993, Contaminant hydrogeology, New York, Macmillan Publishing Co., p. 458.

Hwang, I.G., 1993, Fan-delta systems in the Pohang basin (Miocene), SE Korea, PhD Thesis, Seoul Nat'l Univ. p. 973.

Gaona-Vizcayno, S., Gordillo, T., and Farvolden R.N., 1985, Quality of water in an aquifer and its manifestation in pumping wells, *J. of Hydrology*, **78**, 165-181.

Garrels, R.M., Mackenzie, F.T., and Hunt, C.A., 1975, Chemical cycles and the global environment: assessing human influences, William Kaufmann, Inc., Los Altos, CA, p. 206.

Morris, A.W. and Riley, J.P., 1966, The bromide/chlorinity and sulphate/chlorinity ratios in seawater, *Deep-sea Research and Oceanographic Abstracts* **13**(4), p. 699-705.

Richter, B.C. and Kreitler, C.W., 1993, Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization: Boca Raton, FL, C.K. Smoley, p. 258.