

온양 지역 온천수의 수질 특성 : 천부 지하수와 혼합 비율 분석

정복선, 구민호, 김형수*
공주대학교 지질환경과학과
*한국수자원공사 수자원연구소

요약문

온양온천지구의 13개 온천공에서 채취한 온천수의 수질 자료를 이용하여 심부 온천수와 천부 지하수의 혼합비를 추정하였다. 온천수의 pH, EC, 및 주요 이온의 농도는 40~54 °C의 범위를 나타내는 온천수의 온도와 뚜렷한 선형의 비례관계를 나타내며, 수온이 낮아질수록 천부 지하수의 수질 특성에 가까워지는 특성을 보인다. pH, K^+ , F^- , 및 Si 는 온도와 정(+)의 비례관계를, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , 및 EC는 부(-)의 비례관계를 나타낸다. 온천수의 온도와 수질과의 이러한 상관성은 수질 특성이 상이한 고온의 심부 온천수와 저온의 천부 지하수가 각 온천공에서 서로 다른 비율로 혼합되어 나타난 결과로 해석된다. 최고 온도를 나타내는 온천수와 온천지구 내 지하수의 수질을 끝 성분(end member)으로 가정하고 혼합비를 계산한 결과, 온천지구에서 현재 채수되는 온천수에는 20% 내외의 천부 지하수가 혼합되고 있는 것으로 나타났다. 온천수와 지하수의 수질 자료를 파이퍼 다이어그램에 도시한 결과 $Na^+ - HCO_3^-$ 의 유형을 나타내는 13개 온천수는 전체적으로 직선상에 분포하는 경향을 보였으며, $Ca^{2+} - HCO_3^-$ 의 유형을 나타내는 지하수는 직선의 연장선상에 분포하여 온천수와 지하수의 혼합이 일어나고 있음을 보여 준다. 온천공 수질 검층 결과, 심도 145m를 경계로 지하수와 온천수가 상하부에 부존되어 있으며, 경계부에서 혼합이 발생하고 있는 것으로 추정된다.

1. 서론

온양온천은 국내에서 가장 오래된 온천의 하나로 삼국시대부터 이미 알려졌다고 세종실록지리지에 기록되어 있으며, 1920년대 이후 온천공을 개발하기 시작하여 현재 온양온천지구에는 30여 개의 온천공이 밀집되어 위치하고 있다. 개발 초기에 자연 용출되었던 온천의 수위는 1970년대 이후 채수량의 증가와 함께 점차 강하하여 현재에는 100m 이상의 심도를 유지하고 있다. 온천 지역에서의 과도한 수위 강하는 온천 주변에서 함양되는 천부 지하수가 하부의 온천수 대수층으로 유입되어 혼합되는 결과를 초래할 것으로 예상된다. 국내 온천에 대한 최근의 연구로는 주로 온천수의 수질 특성(김규한·최현정, 1998; 한석종의, 1999)과 수위 변동(이동영·임정웅, 1995; 염병우·김용제)에 관한 논문이 보고되었다. 본 연구에서는 온양온천지구 13개 온천공의 수질 측정 및 우물 검층 자료를 이용하여 심부 온천수와 천부 지하수의 혼합이 발생하고 있음을 규명하였다.

2. 현장측정 및 화학분석 결과

Table 1. 온양온천지구 온천수의 현장 수질 측정 및 화학 분석 결과

Well No.	Thermal Water													Groundwater (average)
	2002	2004	2007	2008	2009	2010	2011	2015	2016	2022	2023	2029	2031	
Temp (°C)	49.1	49.9	49.0	43.8	40.1	49.2	45.3	46.4	53.5	51.8	53.9	52.0	42.3	21.5
pH	8.79	8.77	8.68	8.44	7.93	8.64	8.33	8.17	8.81	8.67	8.86	8.76	8.01	7.36
EC (μS/cm)	340	327	353	385	424	349	376	371	325	325	318	331	395	613
Alk (mN)	1.83	1.91	2.09	2.06	2.21	1.67	1.95	1.83	1.67	1.58	1.59	1.61	1.94	
Ca	7.2	4.2	8.3	7.1	22.7	6.0	8.8	15.5	3.2	6.3	2.8	4.1	22.2	65.8
K	1.48	1.48	1.48	1.39	1.17	1.56	1.27	1.40	1.49	1.39	1.49	1.56	1.25	1.79
Mg	0.74	0.33	0.92	0.20	2.91	0.34	0.78	2.03	0.07	0.45	0.02	0.32	3.16	19.4
Na	65.2	66.6	66.8	78.8	66.0	68.6	72.9	63.4	67.6	62.5	65.7	63.9	61.5	24.4
Si	26.5	27.7	26.4	26.6	26.4	27.5	26.9	26.0	28.7	27.7	28.1	28.2	25.9	17.9
F	1.49	1.69	1.39	1.30	1.03	1.56	1.35	1.26	1.80	1.64	1.79	1.83	1.15	0.02
Cl	29.8	27.4	30.3	33.0	38.7	32.5	32.4	33.4	26.5	28.2	26.1	28.1	37.1	67.4
NO ₃	1.39	1.25	2.04	1.60	5.86	3.81	2.41	3.98	1.16	3.06	0.97	2.20	6.31	27.7
SO ₄	19.3	18.1	19.6	25.4	26.4	20.5	23.7	22.9	17.2	17.5	16.6	17.5	24.6	30.8
HCO ₃	111.7	116.8	127.3	125.4	134.6	101.9	118.8	111.3	101.8	96.3	96.7	98.5	118.1	182.0
CBE(%)	5.6	4.0	3.2	6.4	6.0	6.7	6.8	8.2	8.5	7.8	8.7	6.7	8.2	

온양온천지구에서 사용 중인 20여 개의 온천공 중 13개 공에서 온천수를 채취·분석하였다. 온천공의 위치는 Figure 1과 같다. 온도, pH, EC, 알칼리도는 현장에서 온천수를 채수 즉시 측정하였으며, 양이온과 음이온의 화학분석은 고려대학교 전략광물자원 연구센터의 IC(Ion Chromatography)와 ICP-AES를 이용하였다. 측정 및 분석 결과는 Table 1과 같다. 온천수의 수질은 표와 같이 40~54°C의 범위를 나타내는 온도와 선형적인 비례관계가 뚜렷하며, 수온이 낮아질수록 천부 지하수의 수질 특성에 가까워지는 특성을 보인다. pH, K^+ , F^- , 및 Si 는 온도와 정(+)의 비례관계를 보이며 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , 및 EC는 부(-)의 비례관계를 나타낸다. 온천수의 온도와 수질과의 이러한 상관성은 수질 특성이 상이한 고온의 심부 온천수와 저온의 천부 지하수가 각 온천공에서 서로 다른 비율로 혼합되어 나타난 결과로 해석된다. 즉 온도와 수질이 상이한 심부 온천수와 천부 지하수가 각 온천공에서 서로 다른 비율로 혼합되면서 이런 측정결과를 나타낸 것으로 예상된다. Table 1에서 지하수의 수질 자료는 자원연구소(1999)와 김규한·최현정(1998)의 분석 결과의 평균값을 나타낸 것으로, Figure 2와 같이 온천수와 지하수의 수질 자료를 파이퍼 다이어그램에 도시하였다. $Na^+ - HCO_3^-$ 의 유형을 나타내는 13개 온천수는 전체적으로 직선 상에 분포하는 경향이 뚜렷하며, $Ca^{2+} - HCO_3^-$ 의 유형을 나타내는 지하수는 직선의 연장선 상에 분포하여 온천수와 지하수의 혼합이 일어나고 있음을 보여 준다.

3. 온천수와 지하수의 혼합비 분석

온양온천지구 인근의 지하수 수질 자료의 평균값과 13개 온천공 가운데 최고 온도를 나타내는 2023호공의 수질 값을 끝 성분(end member)으로 가정하고 각 온천공 시료의 지하수 혼합비를 다음 식과 같이 계산하였다.

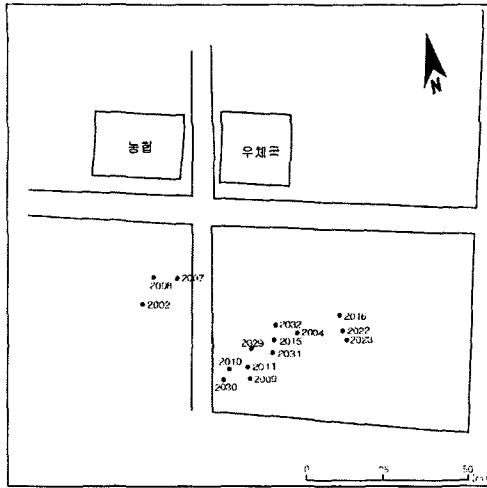


Figure 1. 온천공 위치도.

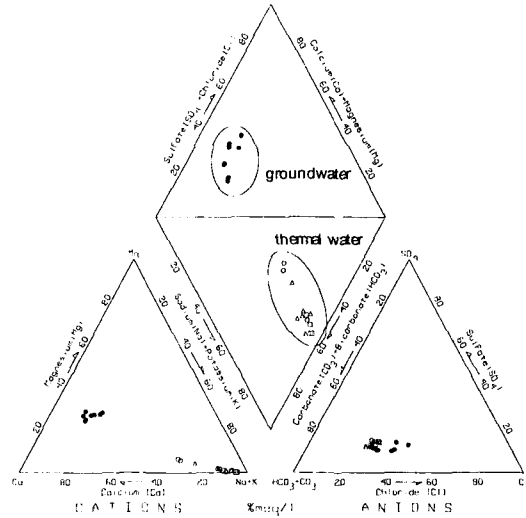


Figure 2. 온천수와 지하수의 수질.

$$\theta = \frac{C - C_{tw}}{C_{gw} - C_{tw}} \quad (1)$$

여기서 C 는 시료의 수질 측정값, C_{tw} 는 지하수와 혼합되지 않은 온천수의 수질 값, C_{gw} 는 지하수의 수질 값, θ 는 지하수의 혼합비를 나타낸다. Table 2는 혼합비의 계산 결과를 나타낸 것이다. pH, EC, 알칼리도(HCO_3^-), 및 F^- 자료를 이용하여 계산한 지하수의 혼합비는 20% 내외로 온도에 의한 계산 결과와 유사한 값을 보이는 반면, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , Si 는 5~13%, SO_4^{2-} 는 31%의 값으로 계산되어 온도에 의한 혼합비 계산 결과와 차이를 보인다. 따라서 주성분 원소에서의 이러한 값의 변화는 식 (1)과 같은 단순 혼합 모델로 수질의 변화를 해석할 수 없음을 나타내며, 지하수의 유동 및 혼합 과정에서 발생할 수 있는 용해 및 침전 기작이 수반된 것으로 해석된다.

Table 2. 지하수 혼합비 계산 결과

Sample No.	Temp. (°C)	pH	EC	Ca	K	Na	Mg	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	F	Si
2002	0.15	0.05	0.07	0.07	-0.02	0.01	0.04	0.09	0.02	0.19	0.18	0.17	0.16
2004	0.12	0.06	0.03	0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.03	0.01	0.10	0.24	0.06	0.04
2007	0.15	0.12	0.12	0.09	-0.02	-0.03	0.05	0.10	0.04	0.21	0.36	0.23	0.17
2008	0.31	0.28	0.23	0.07	-0.34	-0.32	0.01	0.17	0.02	0.62	0.34	0.28	0.15
2009	0.43	0.62	0.36	0.32	-1.07	-0.01	0.15	0.31	0.18	0.69	0.44	0.43	0.17
2010	0.15	0.15	0.11	0.05	0.02	-0.07	0.02	0.16	0.11	0.28	0.06	0.13	0.06
2011	0.27	0.35	0.20	0.09	-0.73	-0.17	0.04	0.15	0.05	0.50	0.26	0.25	0.12
2015	0.23	0.46	0.18	0.20	-0.31	0.06	0.10	0.18	0.11	0.44	0.17	0.30	0.20
2016	0.01	0.03	0.02	0.01	-0.02	-0.05	0.00	0.01	0.01	0.04	0.06	-0.01	-0.06
2022	0.06	0.13	0.02	0.05	-0.32	0.08	0.02	0.05	0.08	0.06	-0.00	0.08	0.04
2029	0.06	0.07	0.04	0.02	0.23	0.04	0.02	0.05	0.05	0.06	0.02	-0.02	-0.01
2031	0.36	0.57	0.26	0.31	-0.80	0.10	0.16	0.27	0.20	0.57	0.25	0.36	0.21
Avg.	0.19	0.24	0.14	0.11	-0.27	-0.03	0.05	0.13	0.07	0.31	0.20	0.19	0.10

4. 수질 검층

HORIBA사의 검층 장비(Water Quality Monitoring System U-20)를 이용하여 2007호 온천공에 대한 온천수의 심도별 수온 및 수질 변화를 측정하였다. 120m 심도에 위치하는 지하수면의 상부 구간에서는 온도 변화만을 측정하였으며, 하부 구간에서는 온천수의 pH, EC, 용존산소(DO), TDS 및 온도의 수직적인 변화를 측정하였다. Figure 3는 검층 결과를 도시한 것으로 심도 145m 부근을 경계로 온천수 수질변화가 나타남을 볼 수 있다. 145m 상부 구간에는 pH=6.8, EC=550 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO=6.5mg/l의 수질특성을 보이는 저온(25~30 $^{\circ}\text{C}$)의 지하수가 위치하며, 160m 하부구간(160~200m)에는 pH=8.3, EC=380 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DO=1mg/l의 수질특성을 나타내는 고온(50 $^{\circ}\text{C}$)의 온천수가 부존되어 있다. 145~160m는 수질 특성의 변화가 크게 발생하는 구간으로 저온의 천부 지하수와 고온의 심부 온천수가 혼합되고 있음을 보여준다.

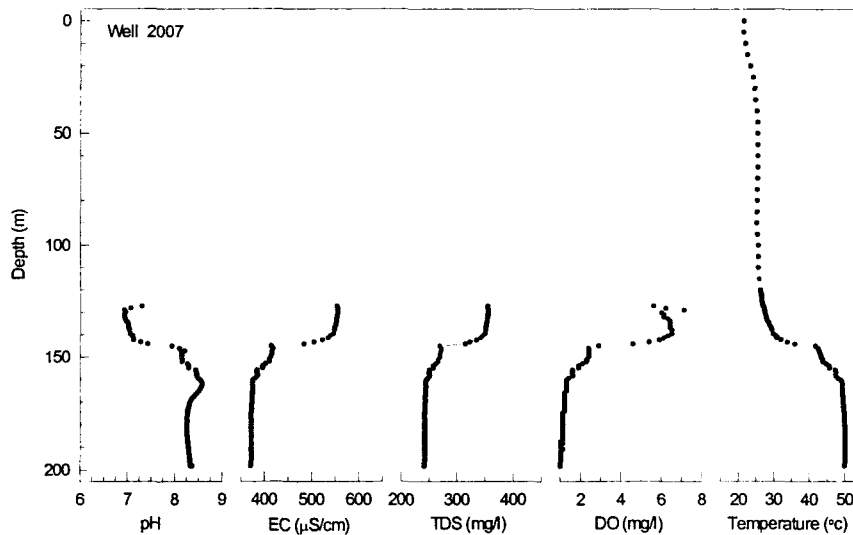


Figure 3. 2007호공에 대한 수질 검층 결과.

5. 결론

온양온천지구 온천수의 수질은 수온과 선형적인 비례 관계를 뚜렷하게 나타내며, 수온이 낮아질수록 천부 지하수의 수질 특성에 가까워지는 특성을 보인다. 이러한 특성은 파이퍼 다이어그램에서도 잘 나타나며 온천수와 지하수의 혼합이 발생하고 있는 증거가 된다. 단순 혼합 모델에 의한 계산 결과 온천지구에서 현재 이용하고 있는 온천수는 본래의 심부 온천수에 약 20% 정도의 저온의 지하수가 혼합되고 있는 것으로 분석되었다. 이는 100m 이상의 과도한 지하수위 강하의 원인으로 인하여 발생하였으며, 수질 검층 결과 120m 심도의 지하수위 하부에 20~30m 두께의 저온의 지하수가 부존되어 있음을 확인하였다. 지하수의 혼합비는 온천수의 사용량 및 강수에 의한 지하수 함양량의 변화에 의하여 계절적인 변동을 나타낼 것으로 예상된다.

6. 참고 문헌

- 김규한, 최현정, 1998, 남한의 온천지역의 열수와 지하수의 지구화학적 연구, 한국지구과학회지, 19(1), 22-34.
- 염병우, 김용제, 1999, 수안보지역의 온천수위 변동과 수리지구화학에 관한 연구, 지하수환경, 6(2), 59-65.
- 이동영, 임정웅, 1995, 동래온천의 수리지질학적 특성과 수위 변화, 자원환경지질, 28(2), 165-176.
- 한국자원연구소, 1999, 온양 온천 지구 온천수 자원조사 보고서, 99-3(No. 266).
- 한석중, 함세영, 성익환, 이병대, 조병욱, 조명희, 1999, 동래온천지역의 지열수와 지하수의 지구화학적 특성, 지질공학, 9(3), 207-225.