

남양만 부근 지하수의 수문지구화학적 체계 연구

소승영 · 김선준¹⁾

1. 서 론

최근에 관심의 대상이 되고 있는 지하유류비축기지 건설 부지는 일반적으로 지하암반에 설치하는데, 이는 천연적인 기밀성이 뛰어나고, 역학적으로 안정하며, 항온의 특성을 가지고 있고, 보안성 및 경제성이 우수하다는 장점들에 기인한 것이다. 또한 수송조건이 관건이므로 주로 임해지역에 위치하고 있다(김천수, 1997). 그러나 임해지역에서는 해수침투의 가능성이 현안으로 지적되고 있으며, 파생되는 문제점으로는 지하수를 이용하는 음용수, 생활용수 및 공업용수의 수질저하에 따른 문제 그리고 지하수의 흐름에 민감한 지하공동시설(방사성폐기물처분시설, 원유/Gas 비축시설 등)에서 지하수유동체계의 변화와 부식문제로 요약할 수 있다. 본 연구에서는 임해지역에 위치한 LPG 지하비축기지내 지하수의 수문지구화학적 현상을 살펴보기 위해 산소 및 수소 안정동위원소, 이화학적 조성을 통하여 분석된 자료와 WATEQ4F를 이용한 자연수의 주성분 이온원소들의 포화지수 계산과 상안정도를 통하여 해수와 지하수의 혼합정도 및 이동변화양상에 대해서 파악하고, 해수 침투를 판별할 수 있는 지시자(indicator)를 밝히고자 시도하였다.

2. 지질 및 비축기지의 개략적 구조

연구대상지역에 분포하는 암석은 기원암의 성분과 구조, 변성정도에 따라 화강암질 편마암, 흑운모 편마암, 석영운모 편암, 흑연 편암 및 석회질 편암, 맥암류 등이며 이들의 상호관계는 불규칙적이다(Fig. 1).

연구지역은 LPG 저장을 목적으로 건설 중인 지하유류비축기지로써 외부압력을 안정적으로 유지하기 위해 수벽공(Watercurtain) 시스템을 운영하고 있으며, 이 시스템 운용의 가장 중요한 조건은 공동의 기밀성 유지에 있다. 수직수벽공은 터널운반통로를 따라 지표면(0m s.l.)의 하부 50m지점에 위치하면서 인접한 다른 LPG비축기지와의 차단과 원위치에서 해수 영역보다 더 높은 수두를 유지시킴으로써 해수 침투 억제 또는 염소이온농도를 희석하는 역할을 한다. 그 하부로부터 40m지점에 수평수벽공이 위치하고, 자연 지하수압에 부가하여 인위적으로 일정한 수압을 유지시켜 줌으로써 시설의 안전성을 완벽하게 확보하는 방법을 취하고 있다. 그 하부로부터 20m지점에 LPG를 저장하는 역할의 공동이 위치하고 있다. 수벽공 주입수(C1)는 현장에서 7.2km 떨어진 위치의 대수층에서 펌프로 끌어올려 송수관을 통해 공급한다(Fig. 2).

3. 시료채취 및 분석

접근 가능한 터널의 천반과 벽면의 균열대에서 용출되는 지점 등을 대상으로 터널운반통로에서 4지점(T1~T4), 수직수벽공에서 6지점(V1~V6), 수평수벽공에서 4지점(H1~H4), 공동에서 3지점(CA1~CA3)과 해수(SW), 주입수(C1)를 선정하여 시료를 채취하였다(Fig. 2). 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 온도는 pH Meter를 사용하여 현장에서 측정하였고, 전기전도도(conductivity)는 채수한 후 24시간 이내에 실험실에서 Conductivity Meter를 사용하

1) 한양대학교 자원공학과

여 측정하였다. 양이온 중 Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , Si는 ICP-AES로, 음이온(Br^- , Cl^- , F^- , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{2-} , SO_4^{2-})은 IC로 분석하였다. Alkalinity 측정은 end point pH를 각각 4.5와 8.3으로 하여 적정법으로 적정한 후 계산에 의해 HCO_3^- , CO_3^{2-} 을 얻었고, 자연수 시료의 일부를 Mass Spectrometer를 이용하여 안정동위원소 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 와 D/H의 비를 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1 동위원소 특성

연구지역 중 일부 지역을 선정하여 환경동위원소($\delta^{18}\text{O}$, δD)를 분석한 결과(Table 1), T3과 CA3를 제외한 모든 시료에서 world-wide meteoric water line($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)에 근접하여 도시됨으로써 이들 지하수가 강수기원으로 암석과의 동위원소 교환반응 등의 2차적 반응은 거의 일어나지 않을 것으로 보인다(Fig. 3). 현장의 북서쪽으로 남양호 하부에 위치하는 단층과 근접한 T3와 CA3 지점은 다른 지하수에 비해 뚜렷이 world-wide meteoric water line($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)에서 이탈되어 도시되고, 해수(SW)와 극히 유사한 값을 보인다(Fig. 3).

4-2 이화학적 특성

분석결과 중 pH는 6.9~8.04의 범위와 Eh는 -60.9~56mV의 일반자연수 범위로 뚜렷한 변화 양상을 보이지 않는다. 전기전도도는 208.5~32190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 일반적인 지하수 평균 전기전도도의 164 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 높고, 해수의 33800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 근접한 범위를 나타내고 있는 시료(T3, CA3)도 나타난다(Table 2). 지하수 시료들의 유형과 지구화학적 특성을 알아보기 위해서 Piper의 diagram상에 도시한 결과(Fig. 4), 5개의 시료(T3, T4, V3, V4, H3)가 다른 시료들에 비해 해수(SW)의 조성 방향으로 편향되는 뚜렷한 분포를 보였다.

동위원소와 이화학적 분석결과를 종합해 볼 때 6개의 시료(T3, T4, V3, V4, H3, CA3)가 다른 시료들에 비해 SW 조성의 영향을 많이 받은 것으로 판단하였다(Fig. 3, 4). 그 중 CA3은 동위원소 분석결과에선 SW의 조성으로 편향되어 있으나, Piper의 diagram에 의한 화학적 분류 및 이화학적 분석결과에서는 이러한 특성이 나타나지 않는다. 이런 불일치의 결과를 보이지만 CA3이 위치상 단층대에 가깝게 위치하고, 남양호 하부에 속해 있으며, 동위원소 분석결과가 뚜렷하게 나타난 점을 미루어 짐작해 볼 때 해수 침투를 받은 지역으로 해석할 수 있다. 따라서 해수 침투가 예상되는 구조적인 측면을 고려하여 염해그룹, G1(T3, T4, V3, V4, H3, CA3)과 비염해그룹, G2(T1, T2, V1, V2, V5, V6, H1)로 분류하였다. 남양호와 육지를 모두 포함하고 있는 본 연구지역 중 G1은 남양호 하부, G2는 육지부분으로 뚜렷히 나뉘는 분포 특성을 보였고(Fig. 2), G1은 Na^+-Cl^- 형태로, G2는 $\text{Ca}^{2+}-\text{Cl}^-$ 형태로 분류되고 있다.

4-3 해수 침투 지시자(indicator)원소 판별

해수 침투를 판별할 수 있는 지시자(indicator)원소를 밝히고자 전기전도도와 주성분 원소들 간의 관계를 도시한 결과(Fig. 5), Mg^{2+} 와 Na^+ 의 경우 G1과 G2가 잘 구분되며, G1이 G2보다 해수에 근접하게 위치하는 결과를 통해 해수의 영향에 의한 증가로 해석할 수 있다. 인위적 오염물질이라고 할 수 있는 Cl의 경우 주입수(C1) 자체가 미생물에 의한 클로링현상을 방지하기 위해 염소처리를 한 후 주입하기 때문에 주입수 자체의 영향으로 인한 증가도 고려해야 하지만, 거의 모든 시료들이 주입수보다 높게 위치하고 있어 주입수와 물-암석

간의 반응에 의해 지하수 중으로 공급되기보다는 외부적 요인인 해수 침투에 의한 증가 현상으로 반영할 수 있다. SO_4^{2-} 의 경우 일반적으로 황화 광물의 산화 작용과 석고(gypsum)나 경석고(anhydrite) 또는 다른 황화 광물의 해리에 의해 함량이 증가하지만 본 연구지역에 황화 광물이 존재하지 않음을 고려해 볼 때 SO_4^{2-} 역시 Cl^- 과 마찬가지로 해수 침투에 의한 증가 현상으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구지역 지하수의 해수 침투를 판별할 수 있는 지시자(indicator)원소로는 Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 를 밝혀냈다.

4-4 열역학적 고찰

해수침투에 의한 염수화를 파악할 수 있는 인자들이 포함된 광물들의 포화지수 중 백운석(Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)의 경우 해수 침투를 받은 G1 시료들이 해수의 영향에 의한 Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 증가에 의해 포화상태로 진행하여 G1과 G2의 구분을 가능케 했다(Fig. 5). 또한 알루미늄 규산염에 대한 상평형도 중 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 계에서 해수 및 지하수 시료들이 모두 Na-beidellite 안정영역에 위치하여 해수 침투시 열역학적으로 Na-beidellite 광물의 형성 가능성을 보여주나 Na 또는 Ca-beidellite는 관찰되지 않았다. H_4SiO_4 의 활동도는 일정하게 유지되면서 수용액 내로 용존 이온 성분이 풍부한 해수가 침투함에 따라 지하수 중의 용존 원소들의 함량이 증가하는 경향을 보여주며 kaolinite의 안정영역을 벗어나 도시되는 것은 균열의 충전물질에서 kaolinite가 관찰되지 않는 것을 뒷받침한다(Fig. 6).

5. 결 론

1. 채수한 지하수 시료의 동위원소(^{18}O , D)와 Piper의 diagram에 의한 화학적 분류 및 이화학적 분석결과 해수 침투 현상이 뚜렷이 드러났으며, 이를 통해 각 시료를 염해 그룹, G1(T3, T4, V3, V4, H3, CA3), 비염해 그룹, G2(T1, T2, V1, V2, V5, V6, H1)으로 나누었다. 그 중 염해 그룹(G1)은 Na^+-Cl^- 형태로, 비염해 그룹(G2)은 $\text{Ca}^{2+}-\text{Cl}^-$ 형태로 분류할 수 있다.
2. 본 연구지역에서는 ^{18}O , D, Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , 백운석의 포화지수가 지하수로의 해수 침투 판별 지시자(indicator)로서 밝혀졌다.

6. 참고문헌

1. 김남장, 이병주, 박기화, 윤옥, 윤윤영, 황상기, 1993, 발안도폭 지질보고서 1 : 50,000, 한국자원연구소, p. 16
2. 김옥배, 박희열, 1997, 해수침투에 의한 지하수 수질오염 판별을 위한 환경지구화학적 연구, 한국자원공학회지, Vol. 34, pp. 548-558
3. 김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 지하수환경, Vol. 4, No. 2, pp. 61-72
4. Drever, J. I., 1988, The geochemistry of natural waters, 2nd Ed., Prentice Hall, p. 438
5. Faure, G., 1986, Principles of isotope geology, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York, p. 589

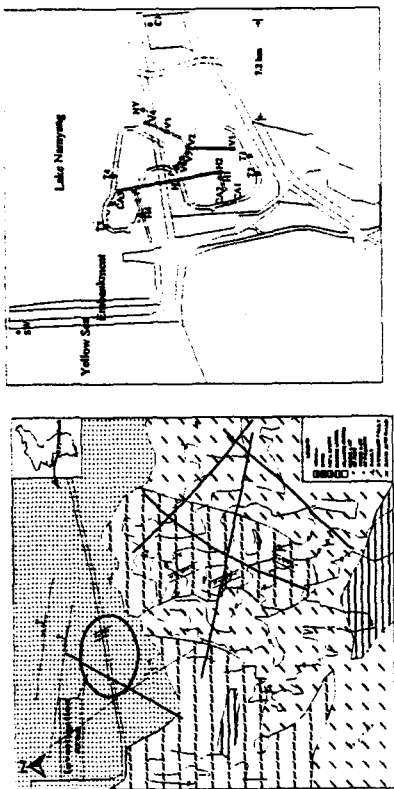


Fig. 1. The Geologic map around the study area. Bank and roads are plotted to clarify the location of the investigation area.

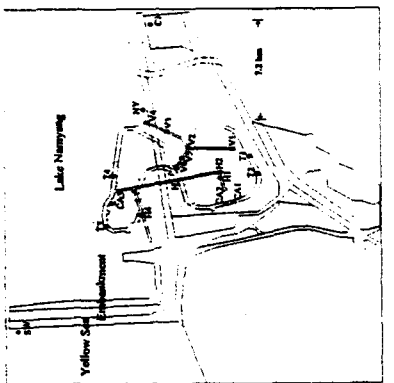


Fig. 2. The schematic diagram of storage facility with the sites of water samples (T1, V1, H1, CA3, CI, NY, SW).

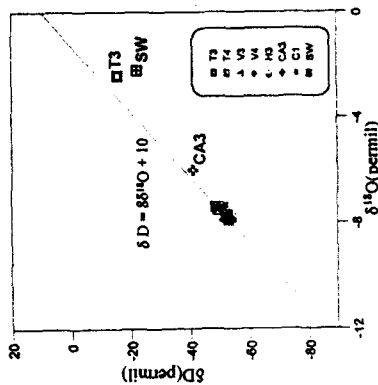


Fig. 3. Oxygen-18 and deuterium compositions of groundwaters and seawater

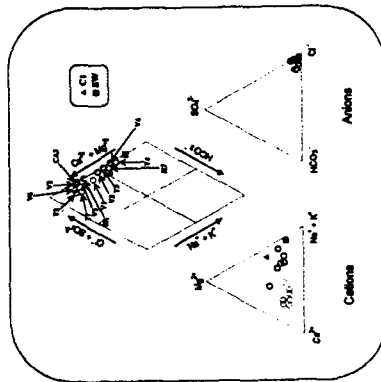


Fig. 4. Chemical compositions of water samples plotted on the Piper's diagram

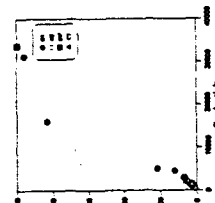


Fig. 5. Conductivities vs. chemical constituents and saturation indices of some minerals

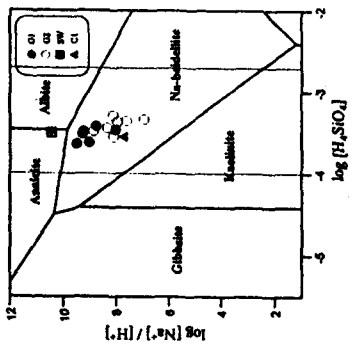


Fig. 6. Stability diagram in the Na system

Table 1. Results of oxygen and hydrogen isotopes analysis

	$\delta^{18}O(\text{‰})$	$\delta D(\text{‰})$
T1	-7.9	-53.3
T2	-7.7	-52.6
T3	-2.4	-16.0
T4	-7.4	-48.7
V1	-7.8	-52.2
V2	-7.7	-53.5
V3	-7.4	-51.1
V4	-7.6	-51.6
V5	-7.8	-52.9
V6	-7.9	-53.9
H1	-7.9	-53.8
H2	-7.4	-50.5
CA3	-6.0	-41.1
CI	-7.4	-50.1
SW	-2.2	-22.5

Table 2. The Physical properties and chemical compositions of water samples in study area

	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	SO ₂	Temp	pH	EH	Cond.
T1	n.d.	225.4	n.d.	0.915	30.06	n.d.	16.49	56.23	n.d.	49.91	19.92	1.51	11.44	23.36	12.5	7.00	8.8	450
T2	n.d.	386.3	n.d.	0.957	10.88	n.d.	74.71	80.44	n.d.	161.6	50.08	3.27	34.19	30.13	17.7	7.77	-38.4	1169
T3	11.30	10361.0	n.d.	81.60	n.d.	n.d.	2072.3	83.36	n.d.	1391.6	5241.0	78.62	968.8	22.49	11.5	7.09	3.6	31330
T4	2.09	1200.4	n.d.	3.66	7.20	n.d.	125.7	61.20	n.d.	28.82	283.1	17.04	65.09	20.07	21.2	7.10	-0.6	2698
V1	0.168	686.5	n.d.	2.06	n.d.	n.d.	78.49	86.83	n.d.	172.6	175.2	10.20	50.35	21.18	18.3	7.44	-20.2	1916
V2	0.847	800.0	n.d.	2.40	2.32	n.d.	55.37	24.35	n.d.	191.7	84.68	7.81	27.66	22.57	13.1	8.04	-49.5	1601
V3	3.31	2358.0	n.d.	6.90	0.611	n.d.	244.0	66.97	n.d.	324.2	708.3	13.32	217.8	22.13	17.3	7.26	-9.6	5100
V4	3.02	1828.4	n.d.	5.82	1.66	n.d.	226.9	45.26	n.d.	185.5	517.2	12.81	122.5	22.81	14.0	7.63	-26.5	4610
V5	n.d.	764.7	n.d.	2.46	2.57	n.d.	75.31	35.79	n.d.	268.0	99.57	5.60	56.23	25.75	16.5	6.95	7.4	2019
V6	n.d.	62.5	n.d.	1.29	0.355	n.d.	37.06	35.41	n.d.	170.3	56.64	3.43	28.83	25.26	16.7	7.56	-26.4	1190
H1	0.527	358.0	n.d.	1.74	1.12	n.d.	41.76	46.48	n.d.	140.7	44.90	4.15	20.01	22.67	13.6	7.80	-36.6	1130
H2	n.d.	833.6	n.d.	2.99	11.68	n.d.	114.8	19.17	n.d.	79.29	355.2	16.34	72.48	19.14	17.3	7.73	-44.1	2307
H4	n.d.	1308.7	n.d.	4.31	0.980	n.d.	157.5	13.32	n.d.	388.4	209.8	7.07	85.30	18.00	22.5	7.92	-56.6	3133
CA3	5.51	8518.8	n.d.	8.80	15.50	n.d.	709.2	57.35	n.d.	1471.4	1183.9	27.30	833.2	12.44	20.1	6.90	11.6	16060
CI	n.d.	67.1	n.d.	3.05	14.34	n.d.	82.73	10.11	n.d.	22.63	313.4	23.02	63.35	24.70	31.1	7.44	-28.7	1938
SW	19.85	19307.0	n.d.	91.80	29.05	n.d.	2461.3	110.5	n.d.	324.5	7984.8	424.6	998.9	30.10	13.3	7.87	-39.6	33900

Note: n.d. = not determined; unit: element - mg/l; Temp. - °C; Eh - mV; conductivity - $\mu\text{S/cm}$