

## 지하원유비축기지 공동주변 지하수의 수질화학적 변화와 기밀성과의 관계

정찬호\*

대전대학교 지구시스템공학과

## Relationship between Hydrochemical Variation of Groundwater and Gas Tightness in the Underground Oil Storage Caverns

Chan Ho Jeong\*

Dept. of Geological Engineering, The University of Daejeon

이 연구는 임해지역 지하원유비축기지 주변에서의 지하수 수리화학적 변화를 관측하여 원유저장 후 운영에 따른 저장공동의 기밀성 확보에 수질화학적 영향을 평가하고자 한다. 연구지역의 모암은 편마암이지만 바다와 호수를 끼고 있어 지하수의 화학조성은 모암의 영향보다 해수의 혼합, 수벽공 주입수, 그라우팅 재료의 용해와 같은 외적인 요소에 의해 상당한 영향을 받은 것으로 보인다. 4차례에 걸친 지하수의 수질분석 결과 측정시기와 관측정에 따라서 큰 수질변화를 보인다. 전반적인 지하수의 특성은 알칼리성의 높은 전기전도도 값을 보이고, 일부 관측정 지하수는 고알칼리성과 고염분의 특성을 보인다. 지하수의 화학적 유형은 Na-Cl형 > Ca-Cl 형 > Ca-HCO<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)형의 순으로 우세한 경향을 보인다. 열역학적 평형관계를 계산해 본 결과 대부분의 지하수가 탄산염광물에 대해서는 침전성 환경을 엘바이트에 대해서는 용해성 환경을 보인다. 그러나 단열의 충전효과가 큰 점토광물의 침전은 거의 확인되지 않아 암반 단열의 밀봉효과와 그로 인한 기밀성 확보에는 큰 효과가 없을 것으로 보인다. 총유기탄소량 (TOC)은 원유저장 후 약간의 증가하는 경향을 보인다. 관측정 지하수의 EpCO<sub>2</sub> 함량은 0~41.3의 범위를 보여 원유에 혼합으로 발생할 수 있는 높은 이산화탄소의 압력은 현재로서는 거의 무시할 수 있다.

**주요어:** 지하수, 해수혼합, 수리화학적 유형, 열역학적 평형, 밀봉효과, EpCO<sub>2</sub>, 총유기탄소

The purpose of this study is to investigate the effect of hydrochemical variation of groundwater on the gas tightness in an unlined oil storage cavern. The groundwater chemistry is greatly influenced by the seawater mixing, the water curtain and the dissolution of grouting cements. The chemical composition of groundwater greatly varies according to both the location of monitoring wells and the sampling period. Most of groundwater shows alkaline pH and high electrical conductivity. The chemical types of groundwater show the dominant order as follows : Na-Cl type > Ca-Cl type > Ca-HCO<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>) type. Thermodynamic equilibrium state between chemical composition of groundwater and major minerals indicates that carbonate minerals except clay minerals can be precipitated as a secondary mineral. It means that the secondary precipitates can not greatly exerts the clogging effect into fracture aperture in rock mass around oil storage cavern. The content of total organic carbon (TOC) shows a slightly increasing

\* Corresponding author : chjeong@dju.ac.kr

trend from initial stage to late stage. The  $EpCO_2$  was computed so as to assess the gas contribution on the  $CO_2$  in groundwater. The  $EpCO_2$  of 0~41.3 indicates that the contribution of oil gas on  $CO_2$  pressure in groundwater system can be neglected.

**Key words :** groundwater, seawater mixing, hydrochemical type, thermodynamic equilibrium, clogging effect,  $EpCO_2$ , TOC

## 서 론

국내에서는 다수의 원유비축기지가 지하에 건설되어 있다. 지하에 건설되는 원유비축시설은 원유나 액화석유가스의 공간적 이동을 억제시킴으로써 자연생태계로부터 안전하게 격리 보관할 수 있는 성능을 필요로 한다(김경수, 정지근, 2002). 이와 같은 측면에서 암반은 원유의 저장고로서 기밀성(gas tightness)을 보장할 수 있는 천연의 방벽이 될 수 있다.

원유의 지하 저장원리는 원유가 물보다 가볍고 서로 혼합되지 않는다는 특성을 이용하여 주변암석에서부터 저장공동으로 지하수의 흐름이 지속되게 유지함으로써 원유가 주변 암반권이나 생태계로의 유출을 방지하는 것이다. 따라서 저장공동주변의 수리동력학적 수밀성(water tightness) 확보가 곧 기밀성의 확보와 직결된다. 이와 같은 이유로 하여 인위적인 지하수압을 형성시킬 수 있는 수벽시스템(water curtain system)을 지하공동주변에 설계를 하게 된다. Söder(1994) 수벽시스템의 설치가 공동시설로부터 가스가 유출되는 양을 억제한다는 사실을 밝힌 바 있다.

그러나 수벽시스템에 의한 지하공동의 원유비축기지에 대한 기밀성을 보장하기 위해서는 공동주변 지하수에 대한 수질변화를 지속적으로 감시함으로써 가능할 것이다. 수질관측은 공동의 기밀성유지와 이와 연계한 주변 환경에 대한 영향, 그리고 지하수-원유-고체상(암석 혹은 그라우팅재료) 상호간의 반응이 원유의 품질에 미치는 영향 측면에서 다루어져야 한다. 본 연구는 임해지역에 건설된 지하원유비축기지를 대상으로 주변지하수의 수질화학적 변화를 관측하여 저장기지 운영초기에 공동 주변 지하수질 특성을 파악하고, 열역학적 평형상태를 계산하여 향후 저장기지가 장기간 운영됨에 따라 공동주변의 수밀성 및 투수성을 진단하는데 중요한 자료로 활용하는데 그 목적이 있다. 특히 용존 이온성분들의 변화는 주어진 pH-Eh 조건하에서 열역학적 평형상태의 변화를 유도하여 이차광물의 침전과 용해반응 등을 지배하게 된

다. 특히 이차광물의 침전은 저장공동 주변의 암석내 발달한 단열 등을 충전하여 원유의 유출을 억제함으로써 저장공동의 기밀성 확보에 중요한 요소가 될 수 있다.

연구지역은 바다와 호수가 인접하고 있는 지역으로 지질은 선캄브리아기 편마암으로 주로 구성되며 부분적으로 백악기 암맥이 관입되어 있다. 그리고 NW 방향의 4개의 추정단층이 지하공동내 혹은 주변에 발달되어 있다.

원유비축기지의 평면도는 Fig. 1에서 보여준다. 비축시설로 4개(A, B, C, D)의 저장공동이 있으며, 진입구 부근에 지표수벽공(surface water curtain)과 지하공동의 오른쪽에는 수직수벽공(vertical water curtain)이 설치되어 있다. 비축기지는 1999년 6월에 원유의 저장을 위하여 진입 터널부를 물로 채우기 시작하였고 그 이후에 원유가 저장되어 운영중이다.

## 연구방법

### 시료채취 및 현장측정

원유비축기지 주변 지하수 수질 모니터링을 위한 현장측정과 시료채취는 1999년 3월, 5월, 8월, 11월 총 4회에 걸쳐 이루어졌다. 관측공의 분포는 Fig. 1에서 제시되어 있다. 1차 시료는 관측공(Y-series)에서 16점, 터널진입부 지하수(A/T) 1점, 수벽공(SV5) 1점, 주입수(Tank) 1점, 호수(L15)에서 1점 등 총 20점의 시료를 채취하였다. 2차 이후의 시료는 관측공에서 21점, 지하터널지하수(A/T) 1점, 수벽공(SV5, SV9) 2점, 주입수(Tank) 1점, 수직갱(Shaft) 1점, 호수(L15) 1점을 각각 채취하였다. Y-계열의 관측정은 심도에 따라서 상부공(U)과 하부공(L) 2개로 구분된다. 그리고 각각의 공은 상부로부터 시멘트, 벤토나이트, 모래, 자갈의 순서로 채워져 상부로부터의 지하수 혹은 지표수의 유입을 차단시켰다. 각 관측공의 심도는 Table 1에 제시되어 있으며, 관측공의 심도는 36~205m의 범위를 보인다.

Table 1. Physicochemical data of water samples collected from monitoring wells around oil storage cavern.

Sample No. (Depth)	Sampling Month	pH	Eh (mV)	T (°C)	E.C. ( $\mu\text{S/cm}$ )	EpCO <sub>2</sub>	**D.O.	TOC	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Si	Fe <sup>2+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	EN(%)
Y4J (43)	March	8.60	61	13.6	3,911	2.6	0.9	7.35	721.0	36.5	44.0	31.3	4.9	0.03	0.35	<0.01	379.0	0.0	101.9	1019	3.15	0.05	0.00
	May	7.89	-261	15.6	2,430	6.2	0.5	6.11	396.0	26.7	51.1	30.7	3.7	0.48	0.49	0.63	173.0	0.0	24.3	725.6	1.82	0.05	-1.74
	August	7.43	129	17.6	2,320	17.5	1.2	6.54	386.0	23.3	80.3	22.1	9.0	1.99	0.83	0.33	165.0	0.0	104.0	729.0	<0.05	0.05	-4.53
Y8J (77)	November	7.21	-153	13.5	2,660	29.0	1.4	7.00	374.0	24.5	82.5	24.3	8.5	1.20	0.69	0.31	172.0	0.0	79.9	721.0	<0.05	0.05	-3.75
	March	8.50	71	12.4	4,326	0.7	1.2	3.19	672.0	23.3	20.7	45.9	4.7	0.03	0.27	<0.01	82.0	0.0	176.7	1206	1.20	0.05	-5.97
	May	9.01	-269	16.4	4,130	0.4	0.6	0.00	782.0	5.2	14.1	23.9	1.8	0.04	0.23	0.06	117.0	9.3	196.1	1209	3.50	19.00	-5.02
Y12 (51)	August	9.29	-248	17.6	7,870	0.2	0.9	0.95	182.0	7.6	55.5	130	1.4	<0.02	0.68	0.28	132.0	12.8	259.0	3211	5.25	0.05	-2.89
	November	10.08	48	14.9	2,860	0.0	3.4	4.47	710.0	9.2	4.5	9.33	0.2	<0.02	0.10	<0.01	149.0	4.2	70.2	1021	<0.05	0.05	-1.12
	March	7.90	153	14.6	959	4.2	1.8	6.25	72.4	11.1	84.7	17.9	7.2	<0.02	0.43	<0.01	121.7	0.0	61.6	210.0	0.53	1.70	-0.47
Y15J (88)	May	7.40	134	17.0	1,018	10.9	2.8	1.59	73.0	12.3	86.1	22	7.2	<0.02	0.70	0.40	97.3	0.0	49.3	242.4	<0.05	0.05	0.80
	August	7.60	-81	19.0	884	8.2	1.3	3.38	65.8	19.8	87.4	21.1	6.7	0.27	0.75	0.79	113.0	0.0	58.6	257.0	0.98	4.26	-4.57
	November	8.10	-80	15.3	1,048	3.4	2.0	10.40	65.6	12.7	95.8	19.9	7.0	0.57	0.61	0.76	152.0	0.0	41.3	212.0	<0.05	0.05	1.47
SV5 (-)	March	10.00	59	11.7	2,020	0.0	1.9	4.17	327.0	105.0	19.9	9.75	1.3	<0.02	0.75	<0.01	38.4	8.3	170.6	506.0	1.41	0.05	-0.03
	May	9.46	40	16.9	1,977	0.1	2.4	1.91	249.0	111.0	32.2	12.8	2.2	0.03	0.85	<0.01	30.5	15.0	153.0	475.0	<0.05	0.05	-3.64
	August	9.43	-48	19.5	1,692	0.0	1.20	-	250.0	95.6	34.1	13.4	1.3	0.04	0.75	<0.01	28	4	152	467.0	1.45	0.05	-2.97
SV9 (140)	November	9.92	33	14.7	1,817	0.0	2.20	-	258.0	92.4	42.5	14.4	2.0	<0.02	0.61	<0.01	26	10	85	521.0	<0.05	0.05	-0.93
	March	7.10	136	12.1	5,253	1.9	8.2	-	734.0	20.3	74.6	20.7	12.6	0.12	0.91	<0.01	11.6	0	175.3	1593	4.85	10.80	4.19
	May	7.82	100	17.1	2,920	1.9	2.9	0.00	161.0	10.4	248.0	98.5	11.5	<0.02	1.71	<0.01	46.1	0	80.5	969.5	2.5	9.30	-3.71
A/JT (30)	August	7.80	-137	19.1	1,033	0.9	1.4	2.82	43.6	8.8	49.2	14.5	11.9	0.13	0.36	0.03	22.9	0	28	192.0	<0.05	0.05	-4.92
	November	8.19	-324	11.7	1,228	1.3	2.8	2.65	33.8	5.6	127.0	18.2	10.6	0.10	0.37	0.04	79.6	0	25.9	265.0	<0.05	1.03	0.64
	May	7.42	161	16.2	2,470	5.8	5.1	0.00	203.0	6.0	162.0	65.1	11.2	<0.02	1.13	<0.01	55.8	0	73.4	728.1	4.55	5.70	-1.37
Y2 (36)	August	6.81	81	21.5	1,100	39.7	1.2	4.00	176.0	6.8	50.2	54.1	11.1	0.29	0.44	0.06	86.8	0	52.2	476.0	<0.05	9.08	-4.17
	November	6.88	11	11.7	1,639	41.3	2.9	1.57	63.4	5.6	30.8	20.6	12.1	0.09	0.20	0.02	118	0	20.4	101.0	<0.05	21.20	5.03
	March	8.00	243	10.6	1,731	2.0	8.8	0.46	65.4	1.6	208.0	42.3	11	<0.02	0.75	<0.01	79	0	88.2	420.0	<0.05	13.10	4.62
Y2 (36)	May	9.13	49	13.2	1,273	0.1	7.2	3.01	168.0	20.4	28.4	22	3.31	<0.02	0.35	<0.01	49.3	1	46.8	329.6	<0.05	5.15	-0.59
	August	8.65	127	20.2	1,189	0.8	1.6	0.32	179.0	26.5	25.4	21.6	3.52	0.06	0.27	0.03	112	2.48	29.4	309.0	<0.05	2.49	1.00
	November	9.42	40	13.9	1,067	0.1	3.3	4.40	154.0	30.1	29.5	14.4	4.55	0.37	0.27	0.14	62.7	7.75	57.9	291.0	<0.05	3.81	-3.02
Conductance, **D.O.: Dissolved Oxygen.	March	11.50	-89	12.4	3,091	0.0	1.2	8.54	198.0	238.0	513.0	0.02	0.43	0.11	2.41	<0.01	216	664	220	333.0	0.98	0.05	0.89
	May	11.83	-168	17	3,330	0.0	2	3.38	172.0	101.0	490.0	0.17	2.54	0.03	1.75	<0.01	23.8	642	45.6	435.7	0.98	0.05	-0.66
	August	12.12	-209	17.9	3,280	0.0	1.1	7.85	173.0	107.0	268.0	0.01	1.04	0.06	1.78	<0.01	2.83	187	77.5	569.0	<0.05	0.05	-1.63
November	12.54	-141	17.6	2,900	0.0	1.4	8.09	188.0	85.0	241.0	0.03	0.91	0.05	1.96	<0.01	2.5	204	33	520.0	<0.05	0.05	0.51	

Table 1. (Continued)

Sample No. (Depth)	Sampling Month	pH	En (mV)	T (°C)	E.C. (µS/cm)	EpCO <sub>2</sub>	**D.O.	TOC	Na	K	Ca	Mg	Si	Fe	Str	Mn	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	Br	NO <sub>3</sub>	EN(%)
Y4L (192)	March	7.70	-34	12.6	2,574	9.9	2.2	8.59	380.0	21.2	86.0	21.5	9.22	0.59	0.61	<0.01	183	0	113.8	659.0	1.89	0.05	-1.73
	May	7.51	-149	17.6	2,520	9.3	2	3.29	353.0	20.7	80.6	22	9.17	2.43	0.83	0.30	106.5	0	83.4	602.5	<0.05	0.05	2.98
	August	9.19	-230	17	5,030	0.4	0.4	3.24	1192	53.1	47.2	24.9	6.98	2.93	0.36	0.13	185	14.2	301	1786.0	4.54	0.05	-2.15
	November	8.54	-258	13.4	5,100	2.1	1.1	3.89	679.0	39.4	43.6	27.8	4.14	0.20	0.43	0.25	256	2.3	102	1154.0	<0.05	0.05	-5.32
	March	7.80	127	16.8	17,186	0.2	0	0.46	3210	111.0	383.0	199	1.07	0.18	2.89	<0.01	7.3	0	407.6	6172.0	18.9	0.05	-1.30
Y5 (57)	May	8.39	-143	15.5	11,020	0.1	1.8	0.00	2200	72.2	281.0	91.3	0.11	1.32	1.83	0.90	11.6	0	197.3	4013.0	20.1	0.05	0.27
	August	8.87	70	16.9	11,120	0.1	1.7	1.73	2207	89.1	247.0	102	0.13	0.04	1.75	0.53	17.1	0.63	175	4123.0	22.8	0.05	-0.50
	November	9.46	-154	13.3	13,530	0.0	2.4	3.34	2617	104.0	259.0	140	0.08	<0.02	1.98	0.17	22.6	3.03	127	5456.0	25.73	0.05	-5.38
	March	9.40	92	12.5	4,220	0.4	4.3	4.67	8410	288	20.7	23.9	2.4	<0.02	0.27	<0.01	271	61.0	198.8	1089.0	29.50	0.05	-1.24
	May	8.50	-83	15.8	3,890	0.7	0.7	0.00	5010	5.6	189.0	45.3	5.4	0.11	3.51	0.18	77.5	0.0	118.4	999.9	2.50	0.05	4.82
Y8L (205)	August	8.53	-47	17.4	3,440	0.8	1.0	1.20	5710	7.8	128.0	37.9	3.3	<0.02	2.27	0.10	90.5	1.5	172.0	1102.0	<0.05	0.05	-2.27
	November	8.83	113	12.5	3,580	0.4	2.3	3.04	5990	8.7	38.9	21.7	1.0	<0.02	1.11	<0.01	104	3.3	87.0	1034.0	3.2	0.05	-4.40
	May	8.60	44	15.0	1,275	0.6	5.2	3.60	1600	13.2	39.6	21.9	6.3	<0.02	0.33	<0.01	80.5	0.0	44.5	325.3	<0.05	5.05	-1.86
	August	8.64	22	16.6	1,144	0.6	3.7	2.76	1710	16.7	36.7	21.2	5.2	<0.02	0.29	0.02	86.5	1.9	60.9	321.0	<0.05	8.47	-2.11
	November	9.14	35	17.3	1,233	0.2	2.3	4.81	1780	17.8	39.4	21.5	6.0	<0.02	0.31	<0.01	92.6	6.0	40.9	359.0	<0.05	6.57	-3.48
L15	March	7.90	212	7.4	1,159	1.3	9.5	5.64	1630	11.6	23.7	21.1	1.1	<0.02	0.26	<0.01	44.2	0.0	45.1	289.0	5.40	5.40	2.02
	May	8.40	67	17.3	1,241	0.5	5.7	4.06	1640	13.6	25.7	24.3	0.5	<0.02	0.35	0.11	47.3	0.0	59.1	343.6	<0.05	3.70	-4.38
	August	7.64	190	27.1	336	0.8	3.2	3.64	438	6.1	11.8	7.33	2.6	0.04	0.12	0.12	13.1	0.0	13.0	85.4	<0.05	2.36	5.24
	November	8.12	118	12.3	530	0.9	6.8	4.87	706	8.5	17.8	11	3.1	<0.02	0.17	0.17	47.3	0.0	17.8	132.0	<0.05	5.02	1.35
	March	6.80	201	9.1	5,447	4.2	7.5	0.90	7690	20.6	81.6	214	13.5	<0.02	1.00	<0.01	13.1	0.0	187.7	1649	11.00	11.00	4.57
Tank	May	7.94	4	18.5	5,420	1.6	5.8	0.00	7170	21.1	67.2	176	11.5	0.97	1.02	0.08	50.6	0.0	186.0	1764	3.95	5.10	-4.76
	August	7.12	127	24.6	2,050	12.3	2.6	0.98	3150	11.2	22.3	61.7	12.0	0.49	0.35	<0.01	54.0	0.0	72.1	615.0	<0.05	11.90	0.65
	November	7.52	92	12.7	517	4.8	5.7	2.04	786	4.3	9.2	11.1	14.5	<0.02	0.15	<0.01	60.4	0.0	9.9	126.0	<0.05	16.50	-1.14
	March	11.20	24	13.0	1,791	0.0	1.4	79.30	2150	77.8	70.2	2.4	0.4	0.23	1.04	<0.01	13.7	35.8	85.6	404.0	1.13	0.70	1.55
	May	11.49	-11	20.1	2,290	0.0	1.0	-	2120	78.6	92.5	6.08	1.5	0.03	1.18	<0.01	4.7	39.0	82.5	541.3	1.13	0.05	-5.73
Y15L (162)	August	11.48	-51	18.5	1,983	0.0	1.9	-	2360	105.0	102.0	3.39	1.4	<0.02	1.17	<0.01	2.4	35.4	193.0	492.0	1.93	0.05	-2.06
	November	11.00	-7	15.6	2,200	0.0	5.4	-	2340	117.0	98.6	1.55	1.4	<0.02	1.23	<0.01	9.0	43.0	60.2	474.0	<0.05	0.05	5.92
	March	8.60	-515	13.5	3,375	0.2	1.0	1.83	5720	39.4	158.0	14.5	0.3	<0.02	0.80	<0.01	23.9	0.5	169.5	964.0	2.84	0.05	5.83
	May	8.48	-107	15.2	4,260	0.4	2.1	0.00	5770	13.3	140.0	80.2	3.7	0.29	1.08	0.10	38.4	3.0	174.8	1412.0	<0.05	0.05	-6.19
	August	9.12	17.2	2,970	0.1	1.0	2.04	4590	40.7	141.0	14.3	0.3	0.1	0.81	1.11	23.9	1.6	202.0	912.0	3.08	0.05	-1.91	
Y18U (116)	November	9.58	-43	15.0	3,270	0.0	2.2	2.82	4580	31.3	151.0	24.7	0.2	<0.02	0.88	0.10	9.3	1.7	90.4	1159.0	<0.05	0.05	-6.87
	March	11.40	12	14.3	1,938	0.0	1.6	11.70	2000	56.3	102.0	5.58	3.4	0.05	0.66	<0.01	2.1	6.6	132.0	409.0	<0.05	0.05	3.85
	May	9.52	-30	16.9	1,575	0.1	1.0	2.57	1890	82.0	72.3	6.51	3.0	0.03	0.72	<0.01	19.2	72.0	103.6	347.9	<0.05	0.05	-0.71
	August	9.57	52	18.8	1,422	0.0	1.0	5.22	2140	64.5	64.8	6.94	2.1	<0.02	0.69	<0.01	28.3	5.3	164.0	419.0	<0.05	0.05	-3.57
	November	9.69	49	15.5	1,547	0.0	1.5	6.62	1790	70.3	55.2	5.5	1.0	<0.02	0.68	<0.01	37.5	8.6	131.0	361.0	1.02	0.05	-3.78

Conductance, \*\*D. O.: Dissolved Oxygen.

Table 1. (Continued)

Sample No. (Depth)	Sampling Month	pH	Eh (mV)	T (°C)	E.C ( $\mu\text{S/cm}$ )	EpCO <sub>2</sub>	#D.O.	TOC	Na	K	Ca	Mg	Si	Fe	Sn	Mn	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	Br	NO <sub>3</sub>	EN(%)
Y18L (150)	March	10.70	-23	12.9	843	0.0	1.4	14.20	92.3	16.2	57.9	0.75	6.14	0.07	0.29	<0.01	40.4	22.8	83.5	145.0	<0.05	0.05	0.92
	May	10.00	-10	16.3	649	0.0	0.9	6.18	75.3	15.7	36.1	0.84	3.78	<0.02	0.39	<0.01	25	23	49.9	112.6	<0.05	0.05	1.50
	August	10.06	46	19.7	484	0.0	1.6	4.04	67.8	20.1	26.9	0.49	3.01	<0.02	0.29	<0.01	24.8	14.3	54.6	112.0	<0.05	0.05	-3.27
Y19U (117)	November	10.17	41	14.9	510	0.0	1.9	3.04	62.5	19.3	22.8	0.43	1.91	0.10	0.29	<0.01	39.4	13.5	9.5	102.0	<0.05	0.05	2.57
	May	9.37	10	14.5	1,691	0.0	1.3	4.06	166.0	48.2	89.4	12.9	1.68	0.10	0.95	0.02	31.1	3.5	70.3	487.4	<0.05	0.05	-6.17
	August	8.91	69	19.5	1,464	0.1	1.2	3.25	181.0	56.4	98.3	10.1	1.44	0.02	1.23	0.02	25	1.02	86.8	499.0	<0.05	0.05	-3.97
Y19L (150)	November	9.13	37	13.5	1,582	0.0	1.7	3.82	149.0	57.4	92.3	7.15	0.62	1.60	1.49	<0.01	18.9	1.2	66.4	398.0	<0.05	0.05	0.83
	May	8.95	-30	14.7	1,775	0.2	1.9	6.18	180.0	28.7	76.2	35.9	2.26	0.03	1.18	0.49	42.7	9	55.9	521.1	<0.05	0.05	-4.71
	August	8.91	63	18.8	1,504	0.2	3.5	6.01	186.0	32.3	79.0	34.8	1.97	0.39	1.31	0.39	52.7	2.13	64.5	491.0	<0.05	0.05	0.18
Y20U (113)	November	9.03	65	12.1	1,608	0.2	2.7	3.77	163.0	30.3	66.9	31.5	0.98	0.10	1.25	0.22	62.8	3.13	45.3	388.0	<0.05	0.05	2.99
	May	9.01	-67	16.4	784	0.1	0.6	1.39	98.7	20.2	28.4	5.96	4.6	0.06	0.69	0.03	33.4	1.4	44.2	207.7	0.54	0.55	-4.60
	August	8.62	40	19.2	726	0.5	1.8	4.04	106.0	24.4	32.7	6.09	4.1	0.06	0.73	0.06	66.5	1.4	34.0	179.0	0.50	0.05	3.43
Y20L (150)	November	8.43	110	13.8	796	0.7	2.1	3.39	98.0	20.6	33.6	6.84	3.5	0.30	0.78	0.05	68.4	0.9	34.7	198.0	<0.05	0.05	-2.83
	May	8.80	-76	17.3	273	0.5	1.8	4.40	27.7	14.8	22.0	6.31	9.8	0.08	0.92	0.05	102.5	6.0	6.5	51.0	<0.05	0.05	-3.50
	August	8.81	41	18.8	247	0.6	1.5	2.93	26.0	16.3	16.0	5.47	8.1	0.04	0.84	0.04	126.0	4.0	0.9	16.9	<0.05	0.05	2.19
Y21 (145)	November	8.98	89	13.2	255	0.4	2.4	2.55	24.7	12.5	16.9	4.85	5.6	0.10	0.80	0.03	112.0	6.7	0.7	21.6	<0.05	0.05	-0.55
	March	8.90	122	12.2	343	0.2	1.6	6.10	43.7	6.9	15.7	8.29	2.3	0.41	0.12	42.2	10.2	14.3	59.4	0.70	0.05	8.23	
	May	9.14	94	18.4	2,430	0.1	1.9	0.77	271.0	25.0	31.3	23.7	0.7	0.03	1.27	0.21	50.3	1.0	11.9	583.7	<0.05	0.05	-4.78
Y22 (138)	August	8.90	185	27.8	415	0.3	2.9	4.28	47.0	11.2	15.2	9.35	1.9	0.09	0.24	0.09	71.7	2.9	14.4	69.2	<0.05	0.58	4.49
	November	8.87	59	15.7	446	0.4	2.4	9.86	50.0	19.2	19.9	9.69	2.1	0.08	0.19	0.08	93.2	3.2	16.1	95.5	<0.05	1.33	-2.45
	March	10.10	82	11.5	448	0.0	1.5	7.06	46.2	20.6	26.5	6.97	1.9	0.03	0.21	57.2	13.0	16.0	76.2	<0.05	0.05	7.03	
Y23U (107)	May	10.82	-229	16.4	594	0.0	0.9	2.08	55.5	47.9	11.4	2.72	0.7	0.19	0.27	<0.01	36.7	26.5	18.1	99.9	<0.05	0.05	-2.66
	August	10.24	35	25.2	489	0.0	2.2	5.33	59.2	41.3	8.4	3.78	0.6	<0.02	0.23	<0.01	38.7	33.9	15.7	89.9	<0.05	0.05	-2.93
	November	9.64	107	15.8	2,020	0.1	2.2	9.08	256.0	31.0	94.9	59.6	1.8	<0.02	2.14	0.05	80.7	16.3	81.6	642.0	<0.05	0.05	-0.14
Y23L (145)	March	9.50	111	12	1,111	0.1	2.5	7.50	132.0	38.3	56.7	6.1	1.79	0.04	0.68	61.7	3.9	61.9	243.0	0.75	0.05	4.04	
	May	11.29	-120	17.9	2,210	0.0	0.6	4.76	320.0	50.9	85.3	2.87	1.11	<0.02	1.53	<0.01	1.5	71.7	103	551.4	<0.05	0.05	-0.91
	August	12.71	-117	26.8	10,550	0.0	2.1	16.90	488.0	103.0	118.0	0.03	0.1	<0.02	5.32	<0.01	5.92	150.2	216	1,070.0	2.63	0.05	-1.70
Y23L (145)	November	11.33	-105	15.1	2,080	0.0	1.5	9.60	278.0	63.4	130.0	0.39	1.13	<0.02	2.04	<0.01	12.3	62	94.6	850.0	<0.05	0.05	-5.35
	March	12.80	-108	12.6	6,189	0.0	2.4	8.31	503.0	93.0	125.0	0.04	0.23	0.03	6.39	29	146.0	251.7	1,137.0	3.56	0.05	0.19	
	May	12.51	-194	18.4	12,170	0.0	2.3	5.88	889.0	71.2	138.0	0.07	0.32	0.03	11.50	<0.01	51.3	117.0	328	3005.0	8.7	0.05	-9.05
Shaft	August	11.31	-74	26.5	2,400	0.0	2.1	11.10	274.0	62.7	111.0	0.51	1.19	<0.02	1.82	<0.01	16.8	171	84.6	445.0	<0.05	0.05	-2.90
	November	13.33	-126	15.3	11,530	0.0	2.6	13.55	501.0	96.5	135.6	0.02	0.12	<0.02	6.51	<0.01	2.73	187.9	185	1,158.0	<0.05	0.05	-3.72
	May	8.91	0	14.3	1,380	0.2	3.9	1.70	166.0	26.9	25.6	19.2	5.03	0.06	0.27	<0.01	69.8	0.42	55.2	334.5	<0.05	5.85	-0.83
Shaft	August	9.69	-159	19.2	1,317	0.1	3.7	5.33	224.0	42.6	18.0	12	7.06	<0.02	0.19	<0.01	68.3	16.84	83.3	312.0	<0.05	0.05	2.03
	November	10.16	-155	13	1,484	0.0	1.8	7.40	247.0	53.4	14.4	6.91	7.61	0.06	0.19	<0.01	66.7	45.2	55.1	391.0	<0.05	0.05	-4.88

Conductance, \*\*D.O.: Dissolved Oxygen.

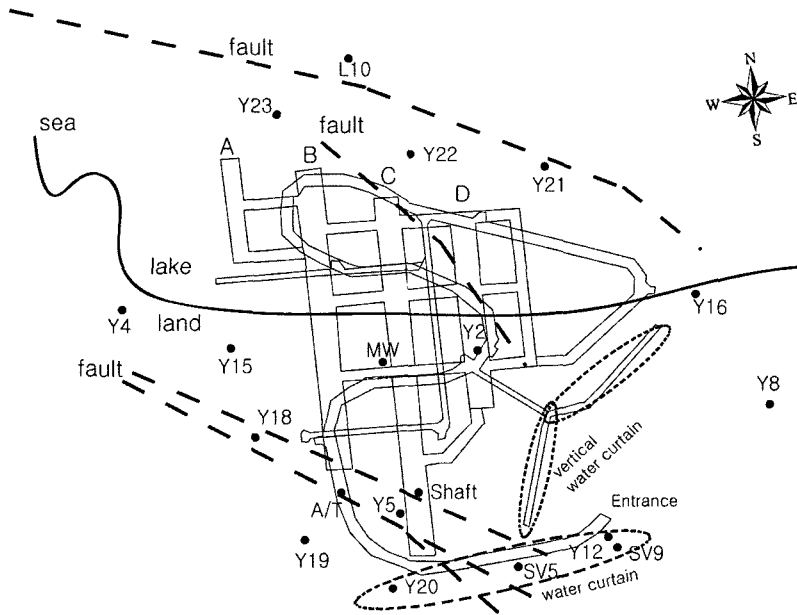


Fig. 1. Layout of oil storage cavern and location of monitoring well

물 시료는 양이온 분석용 60 mL, 음이온 분석용 60 mL 유기탄소분석용 60 mL를 각각 채취하였다. 양이온용 시료는 농질산을 가하여 pH 2 이하가 되도록 하여 중금속과 같은 미량원소 성분의 침전 또는 용기에 흡착되는 것을 방지하고자 하였다. 물 시료 채취시 0.45  $\mu\text{m}$ 의 여과지를 이용하여 이물질 등을 제거하였다. 채취된 시료는 이동식 냉장고에 보관하여 분석전까지 냉장보관 되었다.

지하수에 대한 현장수질 측정은 지하수가 대기에 노출된 후 시간에 따라서 변할 수 있는 수질항목에 대해서 휴대용 측정기로 직접 측정하였다. pH와 산화환원전위(Eh)는 휴대용 측정기(Orion 290A)로, 전기전도도는 휴대용 전기전도도 측정기(Orion model 142)로 각각 측정하였다. 용존산소 함량과 수온은 휴대용 용존산소 측정기(Orion model 150)로 측정하였다. 그리고 알카리도는 메틸오렌지과 페놀프탈레인 지시약을 이용하여 0.5 N 또는 0.05 N 농도의 염산을 이용하여 산중화적정법으로 현장에서 측정하였다.

### 화학성분 및 유기탄소 분석

지하수와 호수 등의 물 시료에 대한 화학성분은 원자흡광분광분석기(Unicam model 989 Flame AAS and Flameless AAS)를 이용하여 K, Fe 원소를 분석하

였고, 유도결합쌍 프라즈마 원자방출분광분석기(Shimadzu 모델 ICPS-1000 III, ICP-AES)로  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , Si, Fe, Mn 등의 주요 원소를 분석하였다. 양이온 성분은 기초과학연구원에서 분석되었다. 물 시료에서  $\text{HCO}_3^-$ ( $\text{CO}_3^{2-}$ )를 제외한 용존 음이온 성분인  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$  등은 이온크로마토그래피(Dionex 120i)로 분석하였다.

시료내 존재하는 총유기탄소(total organic carbon, TOC)는 시료채취 즉시 GF/C 여지와 0.45  $\mu\text{m}$  cellulose membrane으로 여과한 후, UV 반응기가 장착된 TOC 분석기(Rosemount DC-180)를 이용하여 측정하였다.

### 결 과

원유비축기지는 공동을 중심으로 중심부와 동서남북측으로 구분하여 관측정지하수, 주입수, 호수 등의 수질화학적 변화특성을 설명하였다.

### 저장공동 중심부의 지하수

Y2는 저장공동 D라인의 수평수벽공 상부에 해당되는 36m 심도의 관측정으로 4차례에 걸친 수질측정결과를 보면 pH는 11.5~12.54의 고알카리성이며, 산화

환원전위도 -89~-209mV의 환원성 환경을 보인다. 전기전도도는 2,900~3,330  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 비교적 일정하다. 가장 풍부한 양이온으로 Ca은 3월과 5월에 500 mg/L내외를 보이나, 8월과 11월에서는 250 mg/L 내외로 크게 감소하였다. Na의 함량은 충수 전후로 하여 172~198 mg/L 범위로 큰 차이를 보이지 않는다. 이 공에서는 K의 함량이 충수전에 238 mg/L로 매우 높았으나 5월 이후에는 크게 감소하여 107~85 mg/L 범위를 보인다. Mg은 0.2 mg/L 이하로 매우 낮은 함량을 보인다. 음이온 성분중  $\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3$ 가 충수전 3월 시료에서는 664 mg/L, 216 mg/L 으로 높은 값을 보였으나, 후기로 갈수록 크게 감소하였다. 그러나 Cl성분은 3월 시료 333 mg/L 에서 5월, 8월 11월에는 435~569 mg/L까지 증가한 값을 보여준다.  $\text{SO}_4$  함량도 3월에서 11월까지 지속적으로 감소하여 3월에 220 mg/L에서 11월에 33 mg/L 까지 크게 감소한 값을 보인다.

Y2에서 풍부한 Ca,  $\text{CO}_3$  등의 성분이 풍부한 것은 그라우팅 재료인 시멘트 물질이 용해되어 공급된 것으로 보이며, 아울러 pH도 알칼리성 환경으로 유도된 것으로 추정된다. 총유기탄소량은 큰 변화를 보이지 않는다. 물의 화학적 유형은 초기에 Ca(Na+K)- $\text{CO}_3$ (Cl)형에서 기지운영 후에는 Ca(Na)-Cl( $\text{CO}_3$ )로의 화학적 유형의 변화를 보인다.

Y5 관측공은 수평수벽공의 상부로 57m의 심도를 갖는다. 지하수의 화학적 유형은 전형적인 Na-Cl형의 화학조성을 보이며, Br을 이용한 추적자 시험 때문에 Br이 18.9~20.1mg/L로 높은 수치를 기록하였고, 전기전도도가 충수전에는 17,186  $\mu\text{S}/\text{cm}$  으로 상당히 높은 값을 보였으나 충수 후에는 11,020-13,530  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위로 다소 감소한 값을 보인다. pH는 3월 시료에서 7.8에서 시작하여 점차 증가하여 9.46까지 증가하였다.

A/T(진입터널) 지하수는 3월에는 진입터널내 암반상부에서 떨어지는 물을 채취, 분석한 결과, Ca(Mg)-Cl 형으로서 pH는 7.95, Eh는 243 mV, 전기전도도 1,731  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보였다. 5월 이후에는 터널진입이 불가능하여 지표상에서 채취되었고, 3월에 비해 pH가 증가하여 8.65~9.42 범위까지 증가하였다. Eh와 전기전도도는 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 물의 화학적 유형도 3월 시료와는 다른 Na-Cl 형을 보였다. 총유기탄소량도 지속적으로 증가하여 0.46 mg/L에서 4.40 mg/L 까지 높아졌다. Na, K 성분은 충수 후 크게 증가하였으나, Ca, Mg 성분은 크게 감소한 경향을 보인다. 음이온으로 Cl,  $\text{SO}_4$  성분도 충수 후 감소함을 보인다.

수직갱도(Shaft)는 원유의 출입구가 되므로 지하수의 수질변화가 민감하게 진행될 수 있는 곳이다. pH는 8.91~10.16의 범위로 알칼리성이며, Eh는 0~ -159 mV, 전기전도도가 1,317~1,484  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 보인다. 충수 후기에 점차적으로 환원성의 알칼리 지하수로 변화하고, 전기전도도도 약간 증가한다. 총유기탄소량도 초기에 1.70 mg/L에서 후기에 7.40 mg/L 로 증가하였다. 물의 화학적 유형은 Na-Cl형에 속한다.

Tank는 수벽공주입수로 NaOCl로 세정되어 공급되는 물로서 세정용질 투입이후의 수질이 기준이 될 것이다. pH는 7.12~7.94의 범위를 보이고, 전기전도도는 517~5,447  $\mu\text{S}/\text{cm}$  의 범위를 보였다. 특히 11월에 가장 낮은 값을 보였다. 물의 화학적 유형은 Na(Mg)-Cl형에서 Na-Cl형으로 세정용질에 의해 영향을 받은 특성을 보인다.

MW 공은 수평수벽공의 관측공으로 심도는 90m이다. pH는 8.6~9.14 범위를 보이고, 전기전도도가 1,275~1,144  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 비교적 일정한 값을 보인다. 화학적 유형은 Na-Cl 형에 속한다. 총유기탄소량은 3.60~4.81 mg/L의 범위를 보인다.

### 저장공동 동측구역

Y8은 서편의 수직수벽공 부근까지 경사 시추된 공으로, 수직수벽공의 수질을 모니터링할 수 있는 관측공이다. Y8U공(심도 77m)에서 측정된 pH는 3월에서 11월 사이에 8.54에서 10.08으로 지속적인 증가를 보인다. 전기전도도는 3월 5월에는 4,130~4,326  $\mu\text{S}/\text{cm}$  으로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 8월에는 7,870  $\mu\text{S}/\text{cm}$  으로 증가하였다가 11월에는 2,860  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 크게 감소하였다. 총유기탄소의 함량도 3월에는 3.9 mg/L에서 5월, 8월에는 1이하로 감소하다가 11월에 다시 4.47로 증가함을 보인다. 전기전도도는 Na, Ca, Mg, Cl,  $\text{SO}_4$ , Br등의 농도와 비례한다.

Y8L(심도 205m)은 pH가 8.83~9.42 범위의 비교적 일정한 값을 보이고, 전기전도도는 4,220~3,440  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 보인다. 총유기탄소의 함량도 계절에 따라서 약간의 차이를 보인다. 지하수의 화학적 유형은 Na-Cl형으로 큰 수리화학적 변화를 보이지는 않는다.

Y16U(심도 81m) 관측공 지하수의 pH는 8.6~9.58 범위로 후기로 갈수록 약간 증가한다. Eh는 3월에 -515 mV의 환원성환경에서 5월에 -107 mV, 8월에는 12 mV로 산화환경으로 전이됨을 보였다. 총유기탄소량의 경우 0~2.82 mg/l 범위를 보인다. 전기전도도는

2970~4260 mg/L 범위로 후기에 감소하는 경향을 보인다. 화학적 유형은 Na-Cl 형으로 Ca, Mg도 비교적 풍부하여 희석된 해수의 특성을 보였고, 충수 전, 후 약간의 조성의 차이가 나타난다.

### 저장공동 서쪽구역

Y4U공(심도 43m) 지하수의 pH는 3월에 8.6에서 후기로 향할수록 점차 감소하여 7.21 까지 낮아졌다. 전기전도도도 점진적으로 감소하다가 11월에 약간 증가하는 경향을 보인다. 총유기탄소는 6.11-7.35 mg/L의 범위를 보여 다른 공에 비해 약간 높은 값을 보인다. 물의 화학적 유형은 Na-Cl 형으로서 8월 시료에 Na, Ca의 함량이 크게 증가하는 특성을 보인다.

Y4L공(심도 192m)의 지하수는 pH가 7.7에서 후기에 8.54로 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. Eh도 -34 mV에서 -258 mV로 보다 강한 환원성환경으로 전이됨을 보였다. 전기전도도는 3월과 5월 시료에서 큰 차이를 보이지 않았지만 8월 시료에서 크게 증가한다. 총유기탄소량은 3월 시료에서 8.54 mg/L를 보이다가 5월 이후에는 3.39~3.89 mg/L범위로 크게 감소함을 보인다. 전기전도도의 변화는 Na, Cl, SO<sub>4</sub>와는 비례하고 Ca 성분은 오히려 반비례하는 경향을 보인다. 물의 화학적 유형은 Na-Cl 형에 속한다.

Y15U공(심도 88m)은 pH가 10내외, 전기전도도가 2,000 μS/cm내외로 공동으로 충수 전, 후에 있어서 화학조성의 차이는 Na 성분은 감소하며, Ca 성분은 증가함을 보인다. 그 외 성분은 큰 차이를 보이지 않는다. Y15L(162m)은 pH가 11이상으로 시기별로 큰 차이를 보이지 않는다. 전기전도도는 어느 정도의 증감을 보인다. Ca, K 성분은 대체적으로 증가하는 경향을 보이고 Na, Mg 성분은 큰 차이를 보이지 않는다. Cl 성분도 전체적으로 증가하는 경향을 보인다.

Y18U(116m)공과 Y18L공(심도 150m)은 모두 수벽공 하부에 위치하는 공으로서 상하부공의 pH가 9.52~10.70으로 큰 차이를 보이지 않는다. 전기전도도는 상하부공 모두에서 약간 낮아지는 경향을 보인다. 상부공이 하부공보다 높은 전기전도도 값을 보인다. 상, 하부공 모두 Na(Ca)-Cl(SO<sub>4</sub>) 유형으로 총유기탄소의 농도는 3월에 다소 높은 값을 보이다가 그 후로는 감소하는 경향을 보인다.

Y19U공(117m)과 Y19L공(150m)은 모두 수벽공의 하부에 위치하는 공으로서 5월 2차 조사부터 시료를 채취하였다. 상하부공의 수질화학적 특성이 거의 유

사하다. pH가 9.0 내외, 전기전도도가 1,700 μS/cm내외인 Na-Cl 유형의 특성을 보였다.

### 저장공동 남쪽구역

Y12관측공(심도 51m) 지하수의 pH는 7.4~8.1 범위로 약알카리성이며, Eh는 산화환경에서 환원성 환경으로의 전이를 보인다. 전기전도도는 1,000 μS/cm 내외를 보인다. 총유기탄소는 11월 시료에서 10.4 mg/L로 높은 값을 보인다. Ca, HCO<sub>3</sub>의 농도가 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 그라우팅 재료의 용해에 의한 영향으로 보인다. 전반적인 수질의 특성은 해수의 영향은 크지 않았고 지상 수벽공 주입수의 영향 및 그라우팅재료의 영향을 받는 것으로 보인다.

Y20U공(심도 113m)과 Y20L공(150m)의 pH는 8.4~9.01 사이로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나, 상하부공의 전기전도도는 차이를 보인다. Y20U의 전기전도도는 726~796 μS/cm 범위이나 Y20L의 전기전도도는 27~247 μS/cm으로 훨씬 낮았다. 성분상 Y20U에서는 Na, Cl 함량이 높았던 반면, Y20L은 중탄산 이온의 함량이 높았다. 상, 하부공이 뚜렷이 다른 화학조성을 보이는 것은 지상 수벽공의 주입수 영향 때문인 것으로 보인다.

지상 수벽공인 SV5, SV9는 화학조성상 큰 차이를 보이지 않았다. 다만 SV5는 3월과 5월 시료에서 차이를 나타냈는데, 3월의 전기전도도가 5,253 μS/cm으로 매우 높았고, Na, Cl이 높은 수치를 기록한 반면, 5월에는 전기전도도가 2,920 μS/cm으로 떨어지면서 Na, Cl의 함량도 상당히 감소하였다. 또한, 물의 화학적 유형에 있어서도 3월에는 Na-Cl 유형이었으나, 5월 이후에는 Ca-Cl 유형으로 전이되었다. 이는 4월의 저장공동에 충수 때문인 것으로 해석된다. 5월 시료에서는 수벽공의 총유기탄소 값은 검출한계 이하였지만 그 후 증가하는 값을 보인다.

### 저장공동 북쪽구역 및 호수

호수위에서 암반으로 굴착한 Y21공(심도 145m)은 pH가 9.0 내외를 보였고, 전기전도도는 3월에는 343 μS/cm을 보였으나 5월에서는 크게 증가하여 2,430 μS/cm을 보인다. 그 후에는 415~446 μS/cm으로 다시 감소하였다. 총유기탄소량은 3월에 6.1 mg/L에서 충수 후인 5월에는 0.77 mg/L로 크게 떨어졌으며, 그 후 4.28 mg/L와 9.86 mg/L로 서서히 증가함을 보였다. 물의



유형은 Na-Cl형에 속하고, 충수직후에 Na, Cl의 함량이 매우 높은 값을 보였다. 같은 수상공 Y22, Y23과 비교하여 볼 때, 각 이온함량의 차이가 크게 나타난다.

Y22공(심도 138m)의 화학적 유형은 (Na+K)-Cl 형으로 pH 값은 측정시기에 따라 큰 차이 없이 10내외를 보인다. 그러나 전기전도도는 3월에 448  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 충수 후에 594  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 다소 증가하였다. 8월에는 다소 감소하여 489  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보이다가 11월에는 2,020  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 크게 증가함을 보인다. 총유기탄소량은 충수 후 감소하다가 다시 증가하여 11월에는 9.08 mg/L를 보인다.

Y23U공(심도 107m) 지하수의 pH는 3월에 9.5에서 5월 이후에는 11이상까지 증가함을 보인다. Y23L(심도 145m)은 pH가 11.31~13.33 범위를 보여 고알칼리성의 특성을 보였다. Y23U, Y23L의 전기전도도는 그 변화 폭이 매우 크다. Y23U는 1,111~10,550  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위로 8월 시료에서 급격하게 증가한 특성을 보인다. 이는 Na, K 성분의 증가뿐만 아니라 Ca,  $\text{CO}_3$  성분의 급격한 증가에 기인한다. Y23L의 경우 3월에 6,189  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보이다가 5월에 크게 증가하여 12,170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 8월에 크게 감소한 2,400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 다시 11월에 크게 증가하여 11,530  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 보인다. 전기전도도의 증가는 주로 Na, Cl 성분의 증가에 기인한다. 뿐만 아니라, 지하수의 화학적 유형도 Y23U는 Na(Ca)-Cl 형인 반면, Y23L은 Ca(Na)- $\text{HCO}_3(\text{Cl})$ 형으로 차이가 두드러졌다.

Y23 관측공의 상, 하부간 화학조성이 크게 다른 것은 1차적으로 지질구조와 관련이 있을 것으로 추정된다. 저장지지의 북쪽 경계에 위치한 N75~85W/60NE 방향의 단층이 Y23과 연결되어 있을 가능성이 높기 때문이다. 즉, 해수가 단층을 따라서 유입되어 Na, Cl의 함량이 높아 졌고, 유입된 해수는 그라우팅 재료인 시멘트를 용해시켜 다량의 Ca,  $\text{HCO}_3(\text{CO}_3)$ 의 함량이 높아진 것으로 보인다.

호수(L15)의 수질자료는 저장공동의 충수나 수벽공의 주입수로 사용되기 때문에 수질관리에서 가장 기초적인 자료가 되며, 기지 운영과 관련하여 환경적 영향을 파악할 수 있는 자료가 된다. pH는 7.64~9.18 범위를 보이고, 전기전도도는 3월 및 5월에는 다소 높은 1,095-1,241  $\mu\text{S}/\text{cm}$  범위를 보였다가 우기가 지난 8월에는 257-336  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 크게 감소한 값을 보였다가, 11월에는 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  이상으로 다시 증가하는 경향을 보였다. 총유기탄소의 함량도 3.64-5.64 mg/L를 보여 큰 차이를 보이지 않는다. 물의 화학적 유형은 Na-Cl형을 보인다.

## 토 의

### 수리화학적 유형

관측정 지하수의 수리화학적 유형을 시기별 변화양상을 알아보기 위해 화학성분을 당량비로 환산하여 파이퍼도(Piper, 1944)에 도시하였다(Fig. 2). 파이퍼도에 도시된 3월 지하수의 화학적 유형을 보면 수벽공 상부에 있는 관측정 지하수(GU)는 Ca-Cl( $\text{SO}_4$ ) 영역에서 Na-Cl의 영역까지 넓게 분포한다. 그리고 수직갱(shaft)은 Ca- $\text{HCO}_3(\text{CO}_3)$ 의 영역에 하부공지하수(GL)는 Na-Cl 영역에서 Ca- $\text{HCO}_3(\text{CO}_3)$ 의 영역까지 분포한다. 그리고 호수와 주입수(L/T)는 Na-Cl 영역에 분포한다. 5월 이후 지하수의 전반적인 화학적 유형에는 큰 변화가 없으나 8월과 11월 Na- $\text{HCO}_3(\text{CO}_3)$ 의 지하수가 나타난다. 이는 해수의 영향뿐만 아니라 강한 시멘트의 용해에 의해 용해된 다량의  $\text{HCO}_3$ (혹은  $\text{CO}_3$ )의 영향이 큰 것으로 판단된다. 그리고 수직갱(Shaft) 지하수는 3월에서 11월 사이에서 Ca- $\text{HCO}_3$ 의 영역과 Na-Cl 영역사이에서 반복됨을 보여준다.

### 유기탄소함량 및 $\text{EpCO}_2$

지하수계로의 원유의 유출과 혼합은 총유기탄소량의 증가와 그리고 이산화탄소의 부분압의 증가를 유도할 수 있다. 관측정에서의 총유기탄소량은 전반적으로 3월에서 11월로 향할수록 약간의 증가하는 경향을 보인다. 이것은 원유의 지하공동 저장전과 저장후의 변화를 반영하는 것으로 원유가 지하수와의 혼합이 어느 정도 발생할 수 있음을 지시한다.

만약 지하수내로 다량의 유기물이 유입된다면 유기물의 분해로 인해 이산화탄소의 농도 증가를 유발할 수 있다. 높은 이산화탄소의 분압은 저장지지의 기밀성 유지에 불리한 요인이 될 수 있다. 이와 같은 측면에서 지하수내 이산화탄소의 함량의 관측은 지하수계로의 원유의 혼합정도에 대한 지시자로 또한 저장공동의 기밀성평가에 중요한 요소가 될 수 있다.

지하수의  $\text{CO}_2$  함량이 지하수의 유기오염 지시자로 유용하게 활용된 바 있다(Jeong, 2001). 연구지역의 지하수의  $\text{CO}_2$ 의 함량을 계산하기 위하여 Neal et al.(1998a, 1998b)에 의해 제시된 다음 식에 의하여 계산하였다.

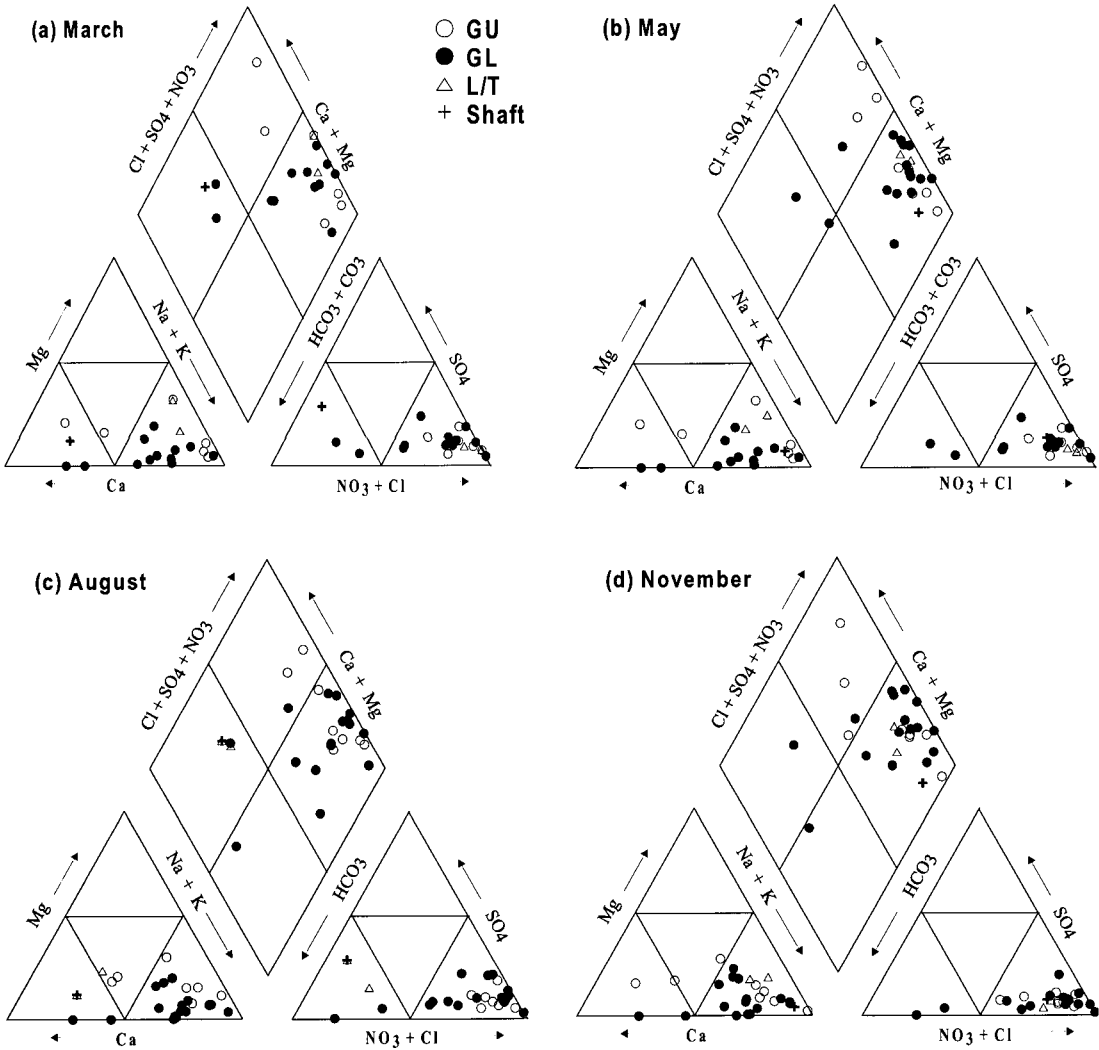


Fig. 2. Trilinear plots of chemical composition of water samples in the study area.

$$EpCO_2 = (0.95 * Alk_{Gran} \text{ in } \mu\text{Eq/L} + 10^{6-pH}) * 10^{(6-pH)} / (6.46 - 0.0636 * t^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

상기 식에서 0.95는 농도를 활동도 개념으로 변환하기 위하여 고려한 평균값이며,  $t^{\circ}\text{C}$ 는 시료의 온도를 각각 의미한다. 상기식에서  $Alk_{Gran}$ 는 Neal et al.(1998a)에 의해 제시된 다음 식을 이용하여 Gran 알카리도를 계산하여야 한다.

$$Alk_{Gran} \text{ in } \mu\text{Eq/L units} = Alk_{4.3} \text{ in } \mu\text{Eq/L units} - 50 \mu\text{Eq/L} \quad (2)$$

식 (6)에서 알카리도는 pH 4.3를 종말점으로 하고, 50  $\mu\text{Eq/L}$ 은 pH 4.3에서의 수소이온 농도를 나타낸다.  $EpCO_2$  값은 지하수의 pH와  $CO_2$  함량에 의해 주로 결정된다.

관측정 지하수의  $EpCO_2$  값을 계산해 보면 0.0~41.3의 범위를 보인다(Table 1). 대기중의  $CO_2$  분압은  $10^{-3.5}$  atm 이며, 토양층내 일반적인  $CO_2$  분압은  $10^{-1.5} \sim 10^{-2.5}$  atm 범위이다(Appelo and Postma, 1996; Clark and Fritz, 1997). 이 범위의  $CO_2$ 의 분압을  $EpCO_2$ 로 환산하면 대기에서는 약 6.9 이내, 토양층에서는 6.9~87.2 범위로 환산된다. 따라서 관측정 지하수

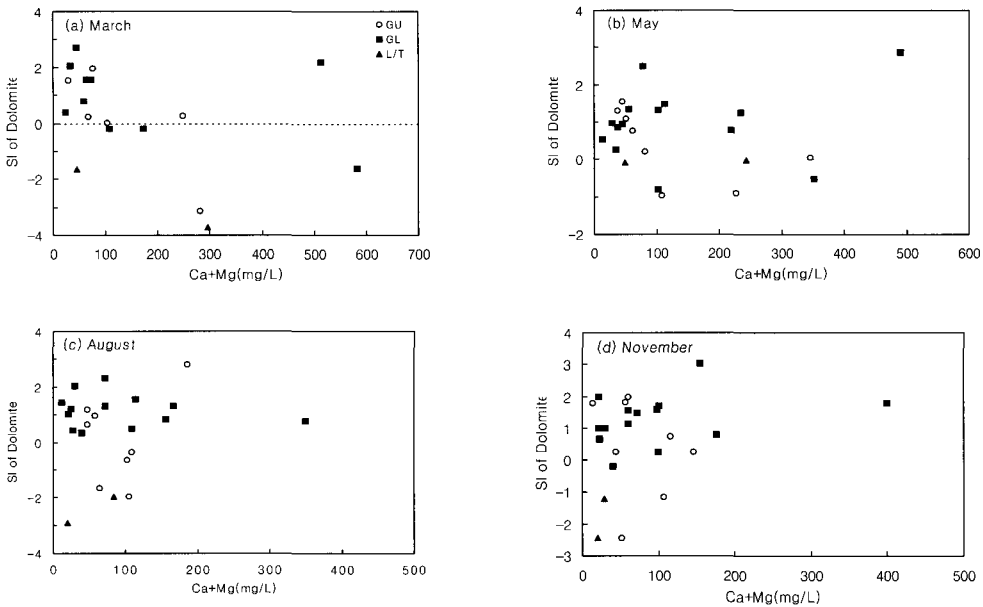


Fig. 3. Saturation index showing thermodynamic equilibrium state between calcite and Ca+Mg content of water samples.

의  $\text{CO}_2$  함량은 지하수가 토양층을 통과하여 발생하는 자연함량의 농도범위에 속한다. 특히 0의 값을 보이는 지하수는 고알칼리성으로 이는 이산화탄소가 시멘트와 같은 그라우팅 재료의 용해반응 과정에서 모두 소모되었을 것으로 추정된다. 종합적으로 볼 때 원유의 지하수계로 유입으로 인한 유기물의 분해와 이로 인해 발생할 수 있는 한 높은 이산화탄소의 분압의 영향은 현재로서는 크지 않는 것으로 평가된다.

### 열역학적 평형상태

관측정 지하수, 호수의 시료에 대한 화학조성과 주요 광물에 대한 열역학적 평형관계를 WATEQ4F 프로그램(Ball and Nordstrom, 2002)을 이용하여 계산하여 보았다.  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{HCO}_3^-$  성분의 주요 공급광물인 동시에 이차침전광물이 될 수 있는 탄산염광물에 대해서 지하수와의 열역학적 평형관계를 계산하여 보았다.

방해석과의 관계를 보면 하부공 지하수의 경우에는 모든 시기에 걸쳐 대부분이 침전성 환경을 보인다. 그리고 상부공 지하수는 초기에 평형 또는 침전성 환경에서 8월 이후에는 일부 지하수가 용해성환경으로의

전이됨을 보인다. 그러나 수벽공의 주입수로 사용되는 호수의 물 시료와 탱크에 저장된 물 시료는 대부분의 경우 용해성 환경에 있다(Fig.3). 따라서 주입된 물 시료가 지하암반을 거치면서 상당한 화학적 환경이 변화되었음을 지시한다.

백운석의 경우에는 방해석과 마찬가지로 호수와 탱크의 물 시료는 대부분의 경우 용해성환경에 있으며, 상부 및 하부공 지하수의 대부분은 침전성 환경을 보인다. 일부 지하수의 경우 용해성환경을 보인다(Fig. 4).

편마암의 주요광물인 엘바이트와 지하수와의 평형관계를 보면 대부분의 지하수에서 용해성환경을 보이며 일부지하수는 평형내지는 과포화의 상태를 보인다(Fig. 5). 비록 다량의 나트륨 성분이 존재하지만 엘바이트에 대해서는 지속적인 용해반응 상태에 있음을 지시한다.

그러나 지하수 성분이 단일의 충전효과가 큰 점토 광물에 대한 침전성 환경이 확인되지 않으므로 단일 충전에 의한 저장공동의 기밀성 확보에 큰 효과가 없을 것으로 보인다.

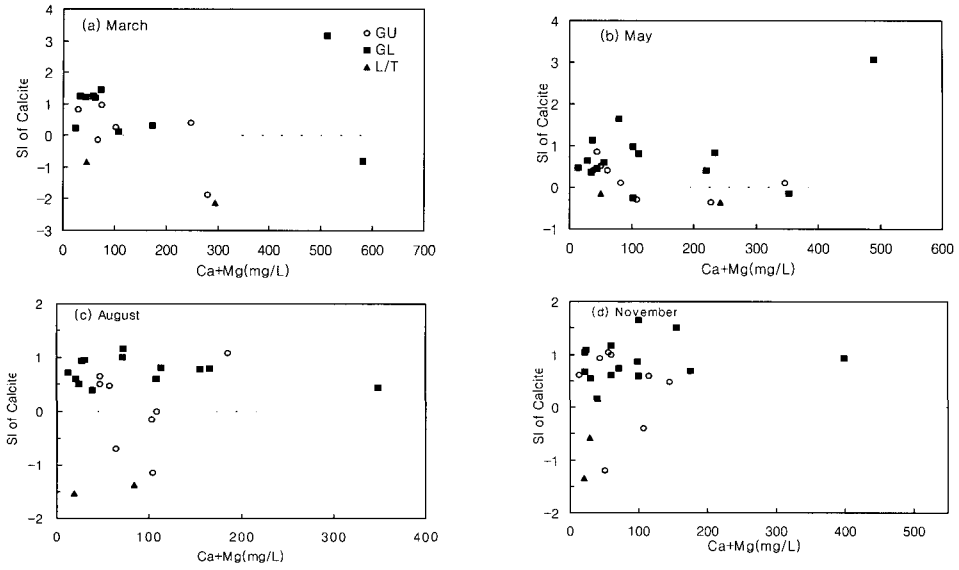


Fig. 4. Saturation index showing thermodynamic equilibrium state between dolomite and Ca+Mg content of water samples.

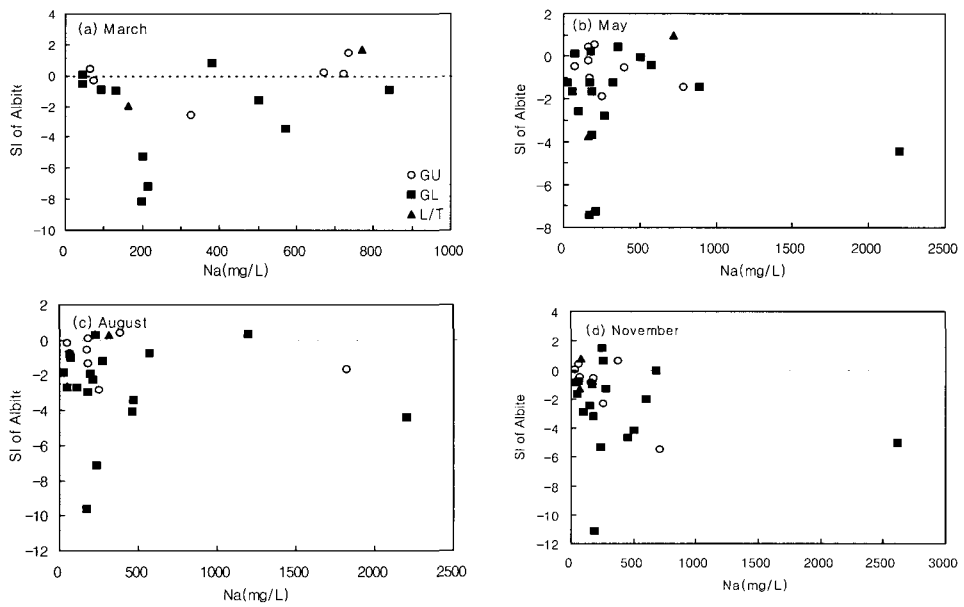


Fig. 5. Saturation index showing thermodynamic equilibrium state between albit and sodium content of water samples.

## 결 론

임해지역 원유비축기지 주변 지하수의 수리화학적 특성의 변화의 그에 따른 저장공동의 기밀성 유지에 미치는 영향을 결론적으로 요약하면 다음과 같다. 저장기지의 주변 지하수는 해수의 영향, 수벽공의 주입수의 영향, 시멘트 등 그라우팅재료의 용해 등에 의해 수질의 변화가 매우 심한편이다. 지하수의 pH는 6.8~13.3의 범위를 보이며 특히 Y2, Y23, Y15L 관측정 지하수는 고알카리성의 지하수 특성을 보인다. 이는 해수에 의한 그라우팅 재료인 시멘트 용해에 의한 것으로 보인다. 전기전도도는 최고 17,186  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Y5)에서 최저 246  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Y20L)의 범위로 관측정에 따라서 매우 큰 편차를 보인다. 지하수의 화학적 유형은 Na-Cl형 > Ca-Cl 형 > Ca-HCO<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)형의 순서를 보였다.

열역학적 평형관계를 계산해본 결과 관측정의 지하수가 탄산염광물이 이차광물로서의 침전성 환경을 보인다. 그러나 대부분의 지하수가 고알카리성 내지 알카리성환경이므로 점토광물의 생성환경이 어려운 조건이다. 따라서 이차광물의 침전으로 인해 기대되는 저장공동주변 암반의 단열의 충전효과와 그로 인한 저장공동의 기밀성 확보에 대한 효과는 크지 않을 것으로 보인다. 총유기탄소량 (TOC)은 기지운영과 관련된 미생물의 활동과 직접적인 연관성이 있는 정도로 높은 값을 보이지 않지만 기지운영 후 약간의 증가로 보아 지속적으로 감시하여야 할 항목이다. 관측정 지하수의 EpCO<sub>2</sub> 함량은 0-41.3의 범위를 유기물로 인해 발생될 수 있는 높은 이산화탄소의 압력은 현재로서는 거의 무시할 수 있다. 특히 EpCO<sub>2</sub>가 0의 값을 보이는 지하수는 고알카리성으로 이산화탄소가 시멘트와 같은 그라우팅 재료의 용해과정에서 모두 소모되었을 것으로 추정된다.

저장공동 주변 지하수의 수질화학적 변화가 관측정 위치별 측정시기별로 큰 편차를 보여 저장공동 기밀성에 대한 수질화학적 영향을 장기적으로 평가하기 쉽지 않을 것으로 보이므로 지속적인 감시운영이 필요하다. 이 연구결과는 국내 다른 원유저장기지 운영과 관련하여 기밀성확보를 위한 지하수의 수질화학적 역할에 대한 지침으로 활용될 수 있을 것이다.

## 사 사

현장 시료채취와 실내 자료처리에 도움을 준 대전대학교 수리지구환경 실험실 학부생 및 대학원생 모두에게 감사한다. 현장조사에 도움을 준 (주)지오텍컨설턴트와 (주)SK에 감사한다.

## 참 고 문 헌

- 김경수, 정지곤 2002, 수치모델링을 이용한 지하 원유비축시설의 수리지질학적 안정성 연구, 21권 35-51.
- Appelo, C. P. J. and Postma, D. (1993) *Geochemistry, groundwater and pollution*, A. A. Balkema Publisher, p. 90-94.
- Ball, J. W. and Nordstrom, D. K. (1992) *User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, tracer and redox elements in natural waters*, U. S., Geol. Surv., Open File Rep. 91-183, 189p.
- Clark and Fritz, 1997, *Environmental isotopes in hydrology*, Lewis publishers, 328p.
- Jeong, C.H., 2001, Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea, *Journal of Hydrology*, v. 253, 194-210.
- Neal, C., House, W.A. and Down, K., 1998a, An assessment of excess carbon dioxide partial pressures in natural waters based on pH and alkalinity measurements. *The Science of the Total Environment*, 210/211, 173-185.
- Neal, C., House, W. A., Jarvie, H. P. and Eatherall, A., 1998b, The significant of dissolved carbon dioxide in major lowland rivers entering the North Sea. *The Science of the Total Environment*, 210/211, 187-203.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of American Geophysical Union*, v. 25, 914-923.
- Söder, C. O., 1994, *Water curtains in gas storage(an experimental study)*, Ph. D. thesis, Chalmers Univ. of Tech., Sweden, 201p.

투 고 일	2004년 8월 12일	정찬호
심 사 일	2004년 8월 13일	대전대학교 지구시스템공학과
심사완료일	2004년 9월 7일	300-716 대전광역시 동구 용운동 96-3
		Tel: 042-280-2573
		Fax: 042-280-2570
		E-m: chjeong@dju.ac.kr

---