

## 인천 해안 저장공동 유출수 및 주변 지하수의 수질특성

조윤주<sup>1</sup> · 이진용<sup>1\*</sup> · 최미정<sup>2</sup> · 조병욱<sup>3</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과, <sup>2</sup>(주)지오그린21, <sup>3</sup>(주)E1

## Characteristics of Seepage Water and Groundwater in Incheon Coastal LPG Storage Cavern

Yun-Ju Jo<sup>1</sup>, Jin-Yong Lee<sup>1\*</sup>, Mi-Jung Choi<sup>2</sup>, Byung-Wook Cho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geology, Kangwon National University

<sup>2</sup>GeoGreen21 Co, Ltd.

<sup>3</sup>Operation and Technical Service Team, E1 Corporation

본 연구에서는 인천 해안 LPG공동의 수리화학적 안정성을 평가하기 위해 공동 유출수 및 주변 지하수에 대한 수리지구화학적 및 미생물학적 특성을 평가하였다. 수질특성을 파악하기 위하여 2007년 2월, 5월, 8월, 10월에 걸쳐 시료채취 및 수질분석을 실시하였다. 프로판공동 지하수의 경우 pH는 8.1~12.4의 높은 값을 보였으며 이는 공동건설 및 관측정 설치에 사용된 시멘트 그라우팅 물질의 용해영향으로 사료된다. 전기전도도는 시료채취 시기별로 큰 차이를 보였으며, 음의 산화환원전위는 유출수 및 지하수가 환원환경에 있음을 지시하였다. 수질분석결과 유출수 및 지하수의 수질유형은 모두 Na-Cl type으로 나타났으며 이는 해수의 영향으로 판단된다. 호기성세균, 혐기성세균, 점액질세균, 황산환원세균 모두 500 CFU/mL 미만으로 낮은 값을 보였으며 급격한 미생물 성장은 관찰되지 않았다. 현재로서는 공동 운영에 지장을 주는 특이적 수리화학적 현상이 발견되지는 않았으나 지속적인 모니터링이 필요하다.

**주요어** : 지하저장공동, 수장막 시스템, 유출수, 지하수, 박테리아

The objective of this study was to examine the hydrogeochemical and microbiological characteristics for stable maintenance of coastal LPG storage cavern. Cavern seepage water and groundwater in the vicinity of the LPG storage cavern were sampled and analyzed (February, May, August and October 2007). Groundwater samples of propane cavern showed high pHs of 8.1~12.4 due to dissolution of cement grouting materials that had been applied during the well and cavern construction. The EC values showed distinctive seasonal variation. The negative ORP indicated reduced condition. The seepage and surrounding groundwater are classified as Na-Cl type, which represents seawater effects. All of aerobic bacteria, anaerobic bacteria, slime forming bacteria and sulfate reducing bacteria were less than 500 CFU/mL, which indicated that there was no abrupt increase of bacteria in the cavern. Therefore there exist no hydrochemical symptoms to indicate unstable conditions of the cavern operation. However, regular and continuous monitoring is essentially required.

**Key words** : underground storage cavern, water curtain system, seepage water, groundwater, bacteria

### 서 론

1960년대부터 유럽에서 건설하기 시작한 지하 저장 시설은 일반적으로 알려진 바와 같이 지하수 원리에 의해 지하 공동에 저장유를 저장하는 방식으로 공동주변 지

하수압에 의해 저장유를 안전하게 보관하며 누출되지 않도록 저장하는 것이다(전한석, 2000; 최원규, 2005). 지하에 건설되는 지하원유비축시설은 원유가 물보다 가볍고 서로 혼합되지 않는다는 특성을 이용하여 공동주변 지하수압이 공동의 저장압력보다 높게 유지하도록 하여 저

\*Corresponding author: hydrolee@kangwon.ac.kr

장물이 저유공동 주변의 암반이나 생태계로 유출되는 것을 방지한다(정찬호, 2004; 강재기 외, 2003). 이러한 지하저장공동은 대용량의 유류나 액화가스를 저장하는데 있어 주변 경관을 해치지 않으며, 화재나 전쟁 및 지진 등의 재해로부터 안전하게 보호하는데 가장 경제적이며 효과적인 시스템이다(김동규 외, 1999; Lee and Cho, 2008).

국내외에 적용된 시스템은 대부분 수압을 자연적 및 인위적으로 조절하여 누유 혹은 누출을 막아주는 수장막 시스템(water curtain system)이다(Goodall et al., 1988; Liang and Lindblom, 1994; Cha et al., 2006). 수장막 시스템을 운영하기 위해서는 원활한 지하수의 흐름과 안정적인 수두를 유지하여 원활한 주입수를 공급해야 한다. 그러나 양이온과 음이온간의 반응 침전, 수산화물 침전, 탄산염이나 가용성 광물과의 반응을 통한 2차 광물로의 침전 및 부유물질의 침전 등과 같은 물리·화학적 원인과, 지하수내에 생존하는 박테리아에 의한 미생물학적 원인은 수장막 시스템의 운영을 저해하는 요인으로 나타난다(한일영 외, 2001; 이진수 외, 2005). 또한 점액질세균의 번식은 점액질이 생성되어 막힘을 유발시키거나 기계류에 부착하여 부식을 촉진시키고 지하저장 공동 내의 침전물을 생성시키는 주된 원인이 될 수 있는 것으로 보고되었다(Ko et al., 2002; 이진수 외, 2005).

따라서 지하저장공동의 안정적인 운영에 있어 유출수, 주변 지하수에 대해 수리화학적 및 미생물학적 분석을 수행 하는 등 지속적인 모니터링이 요구된다. 본 연구에서는 인천 해안에 위치하고 있는 액화석유가스(LPG) 저장 공동 내부 및 주변 지하수 및 공동 유출수의 시료를 채취하여 수질조성 및 미생물 분석을 수행하고 이를 통해 저장 공동의 수화학적 특성을 평가하였다.

## 연구지역 및 연구방법

연구대상 저장공동은 인천 해안가에서 바다쪽으로 약 8 km 이격해 있는 LPG 저장공동(프로판 및 부탄)으로 평균 해수 수심은 10 m 정도이며 해저로부터 100~150 m 아래에 위치하고 있다. 저장공동 주변의 지질은 상부로부터 실트질의 점토층, 풍화암반층과 일부 단열을 보이는 화강암 혹은 화강편마암 암반으로 구성되어 있다(이진용 외, 2008). 프로판 공동과 부탄 공동의 저장량은 각각 343,400 m<sup>3</sup>, 135,700 m<sup>3</sup>이며 해수면으로부터 약 110~150 m 아래에 저장되어 있다(Lee and Cho, 2008). 공동의 안전성을 확보하기 위하여 이 공동기지에는 다수의 관측정을 설치 및 운영하고 있으며 지하수 관측정은 모두 약 30°

경사관정으로 지표에서 심도가 약 200~300 m 이다.

시료는 부탄공동(B5, B12)과 프로판공동(B15, B16, B8-1) 부근의 지하수 관측정 및 부탄 Stripper 이전의 유출수(C4 Stripper Inlet, C4 S/I), 프로판 Stripper 이전의 유출수(C3 Stripper Inlet, C3 S/I), Stripper 직후의 유출수(S/O), 방류되기 전 유출수(Seepage말단), 오수처리시설 말단, Construction Shaft (C/S) 등 총 11개소에서 채수하였으며(Fig. 1), 계절 변화에 따라 수질의 특성을 파악하기 위해 2007년 2월, 5월, 8월, 10월에 걸쳐 총 4회 수행하였다. 유출수의 경우 버킷(bucket)을 이용하여 직접 시료를 채취하였으며 지하수의 경우 채취하기 전에 EC 및 수온이 안정화될 때까지 충분히 퍼징(purging)한 후 대표성을 지닐 수 있는 지하수를 채취하였다. 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP), 용존산소량(DO) 및 온도는 대기 접촉에 민감한 항목으로 시료채취 즉시 현장에서 휴대용 측정기(Horiba D-54, D-55)를 이용하여 직접 측정하였다. 또한 용존상태의 Fe<sup>2+</sup>와 Mn<sup>2+</sup>는 시료를 운반하는 과정에서 쉽게 산화되어 정확한 분석이 어렵기 때문에 UV-Spectrophotometer (DR-2010)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

주요 양이온(Ca, Mg, Na, K), 음이온(Cl, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>), 알칼리도(alkalinity), 총용존고형물(TDS) 및 경도(hardness) 분석을 위한 시료는 각각 분석항목과 분석기기에 알맞은 채취방법을 사용했다. 양이온, 음이온, 알칼리도 분석을 위한 시료는 0.45 μm 멤브레인 필터(membrane filter)를 이용하여 여과한 후 채취하였으며 이중 양이온의 경우 무기물의 침전 및 미생물 성장을 방지하기 위하여 농축질산을 이용하여 pH 2 이하로 적정한 후 시료를 보관하였다. 총유기탄소(TOC), 총용존고형량(TDS), 부유물질(SS), 화학적산소요구량(COD<sub>Mn</sub>), 생물학적산소요구량(BOD), 총세균, 호기성세균, 혐기성세균, 점액질세균 및 황산환원세균 등을 위한 시료는 채취한 즉시 각각의 분석원소에 맞는 시료병에 담아 보관하였고, 이중 TOC의 경우 농축인산을 이용하여 pH 2 이하로 적정한 후 시료를 보관하였다. 산처리를 한 분석시료를 제외한 모든 시료는 최대한 공기와의 접촉을 피하기 위해 빈 공간(head space) 없이 시료가 넘칠 정도로 가득 담았으며, 모든 시료는 4°C 냉장 보관하여 분석실로 송부하였다.

## 결과 및 토론

### 현장수질

인천 지하저장공동의 유출수 및 지하수에 대한 현장

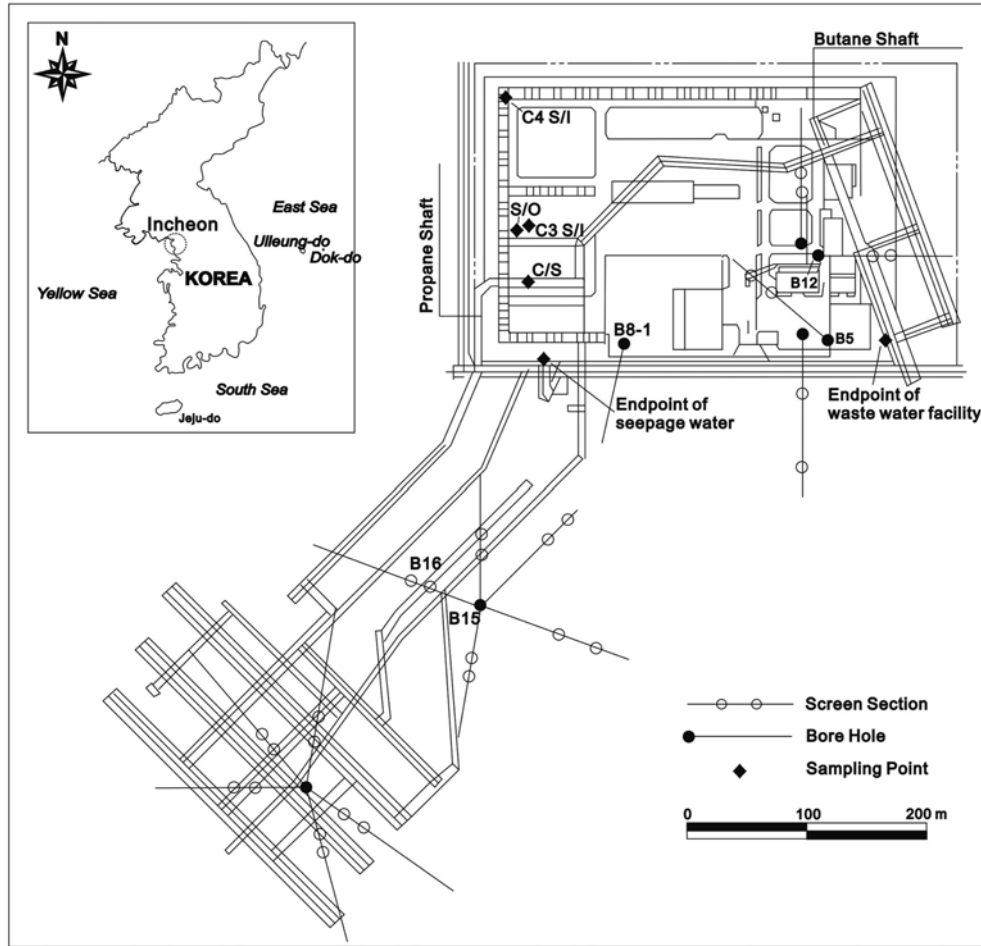


Fig. 1. Location of the Incheon LPG coastal storage caverns.

수질측정 결과는 Table 1에 정리하였으며 각각 수행한 현장수질 측정 결과를 프로판공동 유출수(C3-S), 부탄공동 유출수(C4-S), 프로판공동 부근 지하수(C3-S), 부탄공동 부근 지하수(C4-G), Construction shaft (C/S), Stripper Outlet (S/O)으로 구분하여 비교하였다(Fig. 2). 수소이온 농도(pH)는 유출수의 경우 6.5~7.9의 범위로 중성 내지 약알칼리성 범위의 값을 보이며, 프로판 공동 지하수는 8.1~12.4의 범위로 강알칼리성을 나타내고 있다. 이는 유출수를 제어하기 위하여 공동기지 및 관측정 설치에 사용된 시멘트 그라우팅물질의 용해영향이라고 판단되며 또한 지하수가 오랜 기간 체류하여 수소이온이 규산염 광물 및 탄산염 광물과 반응 하거나 양이온을 용탈시키면서 소비되었을 것으로 사료된다(이종운 외, 1995; Lee and Cho, 2008). pH의 계절적 변화를 살펴보면 프로판

공동의 지하수(B15 및 B16)의 경우 2월에서 10월로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었으나 다른 지점에서는 약간 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3(a)).

전기전도도(EC)는 유출수와 지하수가 비슷한 값을 보였으며 그 범위는 0.1~49.2 mS/cm로 변화의 폭이 큰 것으로 나타났다. 그러나 B15의 전기전도도는 0.09~0.6 mS/cm로 다른 지점에 비해 매우 낮은 값을 보여주었다(Fig. 3(b)). 이는 밀도차에 의해 관정의 상부는 전기전도도가 작고 관정의 하부로 갈수록 전기전도도가 증가한 것으로 판단된다. 대부분의 지점에서 EC는 계절적인 변화가 크게 나타났다. 5월에 감소하였다가 8월(우기)에 증가한 후 10월에 다시 감소하는 경향을 보였으며 B5는 지속적으로 증가하였다. 이러한 계절적 변화는 우기에 평균 해수면이 높아지면서 공동의 운영압이 낮아 상대적으로 많은 양의 해수

**Table 1.** Field measured parameters of seepage water and groundwater in and around the cavern.

Samples	Date	T (°C)	pH	EC (mS/cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	Mn <sup>2+</sup> (mg/L)	Cavern
C3 S/I	Feb. 22	12.1	7.0	43.90	6.07	5	6.70	13.45	Propane cavern
	May 14	8.9	7.3	25.00	3.96	-92	6.00	14.98	
	Aug. 21	18.0	7.2	46.70	3.88	7	4.75	15.93	
	Oct. 12	15.0	7.7	34.60	5.06	-226	2.50	9.90	
C4 S/I	Feb. 22	9.7	7.4	43.10	2.47	-34	3.00	13.68	Butane cavern
	May 14	11.7	7.3	26.60	1.02	-112	3.50	13.48	
	Aug. 21	18.2	7.6	44.10	1.64	-53	4.00	13.70	
	Oct. 12	13.0	7.9	37.70	2.21	-260	2.75	13.90	
S/O	Feb. 22	11.9	6.9	42.80	6.82	4	6.30	14.78	
	May 14	8.8	7.5	25.50	9.88	-74	6.00	15.15	
	Aug. 21	18.5	7.2	46.10	6.68	15	4.75	15.60	
	Oct. 12	14.3	7.6	36.00	6.87	-95	3.75	13.60	
C/S	Feb. 22	13.5	6.6	33.90	1.85	20	14.00	10.90	
	May 14	15.2	6.5	29.60	1.26	-90	27.00	11.45	
	Aug. 21	17.6	7.1	40.70	1.24	-88	35.00	12.30	
	Oct. 12	15.9	7.2	36.70	1.39	-355	39.00	14.30	
End point of seepage water	May 14	10.4	7.2	25.60	9.44	-81	6.00	15.33	
	Aug. 21	18.4	6.8	46.00	4.27	-7	4.25	15.65	
	Oct. 12	11.8	7.5	43.10	6.92	-310	5.25	15.48	
End point of wastewater facility	May 14	17.5	5.8	0.66	5.42	178	0.03	0.09	
	Aug. 21	31.7	5.1	0.80	1.85	211	0.05	0.08	
	Oct. 12	25.4	6.9	0.86	3.28	-67	0.08	0.12	
B5	Feb. 22	14.5	6.3	18.20	0.69	-93	532.0	10.25	Butane cavern
	May 14	15.5	7.0	5.72	0.55	-111	106.0	4.40	
	Aug. 21	24.0	6.3	18.17	0.79	-110	296.0	6.30	
	Oct. 11	19.4	7.9	40.80	0.99	-463	152.0	8.70	
B12	Feb. 22	15.1	6.2	42.20	1.43	-60	110.0	16.75	
	May 14	14.8	6.7	33.90	1.15	-111	132.0	19.30	
	Aug. 21	26.6	6.6	42.00	0.60	-159	156.0	20.70	
	Oct. 11	18.4	7.0	39.70	1.62	-345	147.0	20.10	
B15	Feb. 22	12.8	10.3	0.60	3.31	82	0.10	0.00	
	May 14	15.4	10.4	0.27	3.90	-101	7.60	0.00	
	Aug. 22	24.4	9.8	0.09	0.80	56	6.40	0.00	
	Oct. 11	19.4	6.4	0.36	3.82	-93	7.20	0.00	
B16	Feb. 22	14.2	8.8	34.00	2.94	35	0.32	0.58	Propane cavern
	May 14	15.6	9.1	29.20	3.64	-242	1.11	0.36	
	Aug. 22	29.1	9.3	35.10	1.02	-121	11.20	0.34	
	Oct. 11	19.4	8.1	30.40	2.16	154	10.00	1.94	
B8-1	Aug. 22	22.9	12.4	49.20	4.68	-145	3.19	0.30	
	Oct. 11	18.5	12.3	44.40	5.99	-363	2.62	0.47	

가 공동으로 유입되기 때문이라고 판단된다(Lee and Cho, 2008; Lee et al., 2009).

용존산소(DO)는 프로판공동 유출수 및 지하수가 부탄공동 유출수 및 지하수보다 높은 값을 지시하였다. 계절

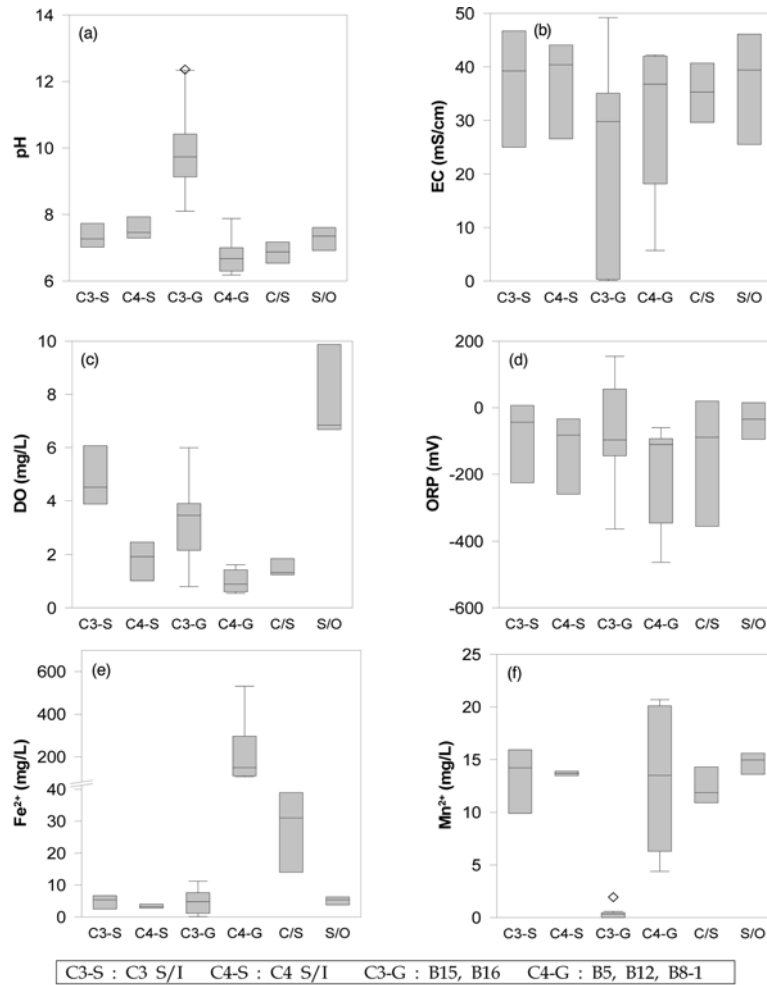


Fig. 2. Variations of pH, EC, DO, ORP, Fe<sup>2+</sup> and Mn<sup>2+</sup> of water samples.

에 따른 특별한 경향성은 보이지 않았으며 Stripper를 통과하여 나오는 S/O의 DO는 6.7~9.9 mg/L의 범위로 높은 값을 보였다(Fig. 3(c)). 산화환원전위(ORP)는 전체 평균이 -92.4 mV로 대부분 환원환경을 지시하고 있으며 계절적인 변화가 뚜렷하게 나타난다. B16의 경우 5월에 감소하였다가 8월과 10월에 증가하는 경향을 보였고, 다른 지점에서는 10월에 측정된 값이 가장 낮게 나타났다(Fig. 3(d)). 8월에 ORP가 가장 높게 측정된 원인은 우기에 강수량이 증가하면서 산소의 유입이 더 늘어나 높은 값을 지시하는 것으로 판단된다.

용존철(Fe<sup>2+</sup>)은 부탄공동 지하수에서 다른 지점에 비하여 매우 높은 값을 보였다(Fig. 3(e)). 특히 관측정 B5의 경우 2월에 532 mg/L로 가장 높은 값을 지시하며 Fe<sup>2+</sup>의

농도가 계절에 따라 크게 변화하는 경향을 보였다. 관측정 B12는 110~156 mg/L의 범위를 지시하였으며 유출수 및 다른 지점에서는 50 mg/L 미만으로 큰 폭의 농도변화는 나타나지 않았다. 용존망간(Mn<sup>2+</sup>)은 Fe<sup>2+</sup>에 비하여 낮은 농도를 보이고 있으며 Mn<sup>2+</sup> 또한 부탄공동 지하수에서 높은 값을 보였다(Fig. 3(f)). 관측정 B12에서 16.8~20.7 mg/L의 범위로 가장 높은 값을 보였으며 프로판공동 지하수(B15, B16)에서는 0.0~1.9 mg/L의 범위로 매우 낮은 농도를 나타내었다.

### 주요 이온

유출수 및 지하수의 주 양이온 및 음이온의 수질분석 결과는 Table 2에 정리하였다. 인천기지의 지하수 및 유출

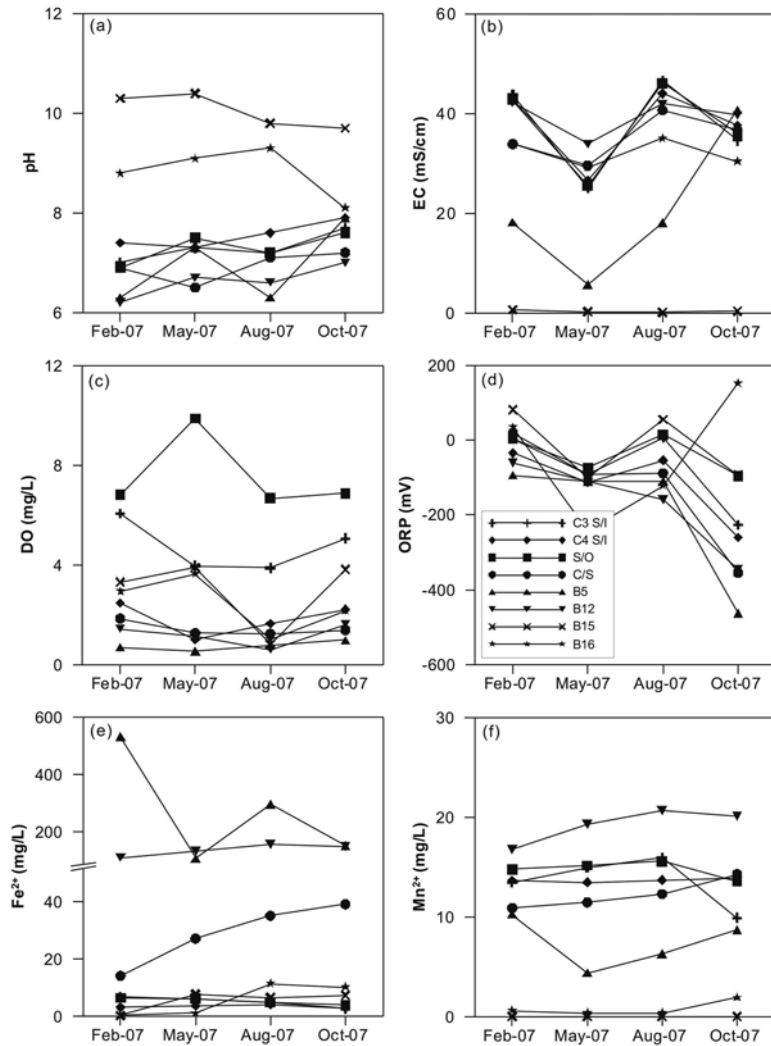


Fig. 3. Seasonal variations of pH, EC, DO, ORP,  $\text{Fe}^{+2}$  and  $\text{Mn}^{2+}$  of water samples.

Table 2. Statistical summary of water qualities of seepage water and groundwater during the entire study period (unit: mg/L).

Water	Statistics	Ca	Mg	Na	K	Cl	$\text{HCO}_3$	$\text{CO}_3$	$\text{SO}_4$
Seepage water (n = 15)	Min.	740.2	904.0	6,295.0	67.9	13,525.7	39.2	0.0	1,335.4
	Max.	1,905.4	1,295.4	9,373.8	207.4	18,867.1	198.1	0.2	2,456.7
	Mean	1,253.7	1,089.9	7,889.8	132.9	16,246.1	93.0	0.1	1,720.9
	Std. Dev	371.8	123.7	921.5	41.4	1,694.2	38.9	0.1	295.3
Groundwater (n = 18)	Min.	6.7	0.0	6.8	0.7	11.0	3.5	0.0	0.0
	Max.	3,172.8	1,251.8	8,851.8	343.1	19,501.4	180.6	551.2	1,935.8
	Mean	846.3	402.4	4,737.1	130.1	9,489.3	38.7	32.0	731.7
	Std. Dev	920.6	465.0	3,550.7	109.0	7,223.7	44.1	129.6	659.0
Total (n = 33)	Min.	6.7	0.0	6.8	0.7	11.0	3.5	0.0	0.0
	Max.	3,172.8	1,295.4	9,373.8	343.1	19,501.4	198.1	551.2	2,456.7
	Mean	1,031.5	714.9	6,170.2	131.4	12,560.6	63.4	17.5	1,181.3
	Std. Dev	743.7	492.4	3,100.1	84.0	6,375.7	49.5	95.8	720.4

수는 Na와 Cl이 각각 6.8~9,373.8 mg/L, 11.0~19,501.4 mg/L의 범위로 가장 높은 값을 보이며 이는 지하공동의 지하수 및 유출수가 해수에 의한 영향을 받고 있음을 지시한다. 양이온의 경우 Ca와 Mg의 농도가 각각 6.7~3,172.8 mg/L, 0.0~1,295.4 mg/L의 범위로 높게 나타났으며 이는 공동 주변의 인근 농경지에서 주로 사용하는 돌로마이트( $\text{CaMgCO}_3$ ) 성분을 포함한 비료가 해안유출수로 유입되었기 때문이라고 사료된다(Lee and Cho, 2008). 음이온의 경우  $\text{SO}_4$ 는 0.0~2,456.7 mg/L의 범위로 나타났다. 시료채취 지점별 주요 용존 이온의 농도변화를 살펴보면 계절적인 약간의 변동을 보일 뿐 급격한 변화는 나타나지 않았다(Fig. 4). 부탄공동 지하수 B5에서는 Na, Cl, Ca 등이 다른

지점에 비하여 계절적인 농도변화가 뚜렷하게 나타났다. 프로판공동 지하수 B15는 전체적인 용존 이온의 농도가 낮을 뿐만 아니라 계절적인 변화역시 거의 없다. 지하수 및 유출수의 주 양이온(Ca, Mg, Na, K) 및 음이온(Cl,  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ) 분석 결과를 파이퍼도(Piper diagram)에 도시하여 물 시료의 화학적 특성을 관찰할 수 있었다. 파이퍼도 분석 결과 4차례의 수질분석에서 유출수와 지하수 모두 Na-Cl type의 수질유형이 지배적으로 나타났으며(Fig. 5), 이는 해수에 의한 영향이라고 판단된다.

**미생물**

유출수에 대한 분기별 미생물 분석결과 총 세균의 분포는

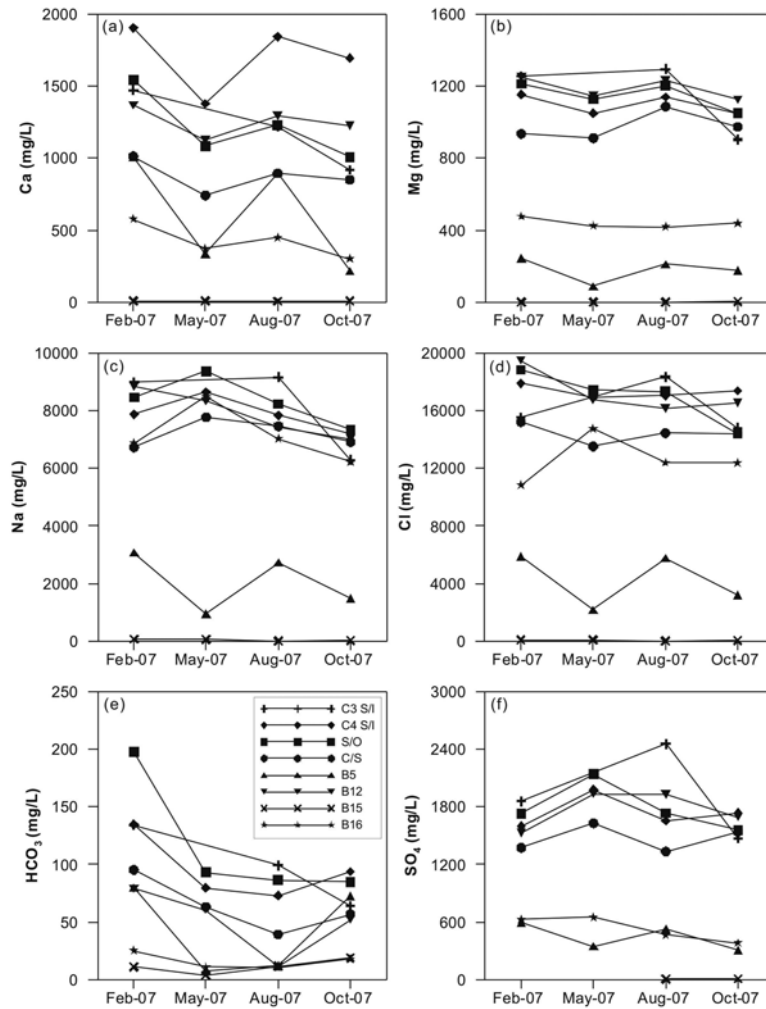


Fig. 4. Seasonal variations of Ca, Mg, Na, Cl,  $\text{HCO}_3$  and  $\text{SO}_4$  of water samples in the study area.

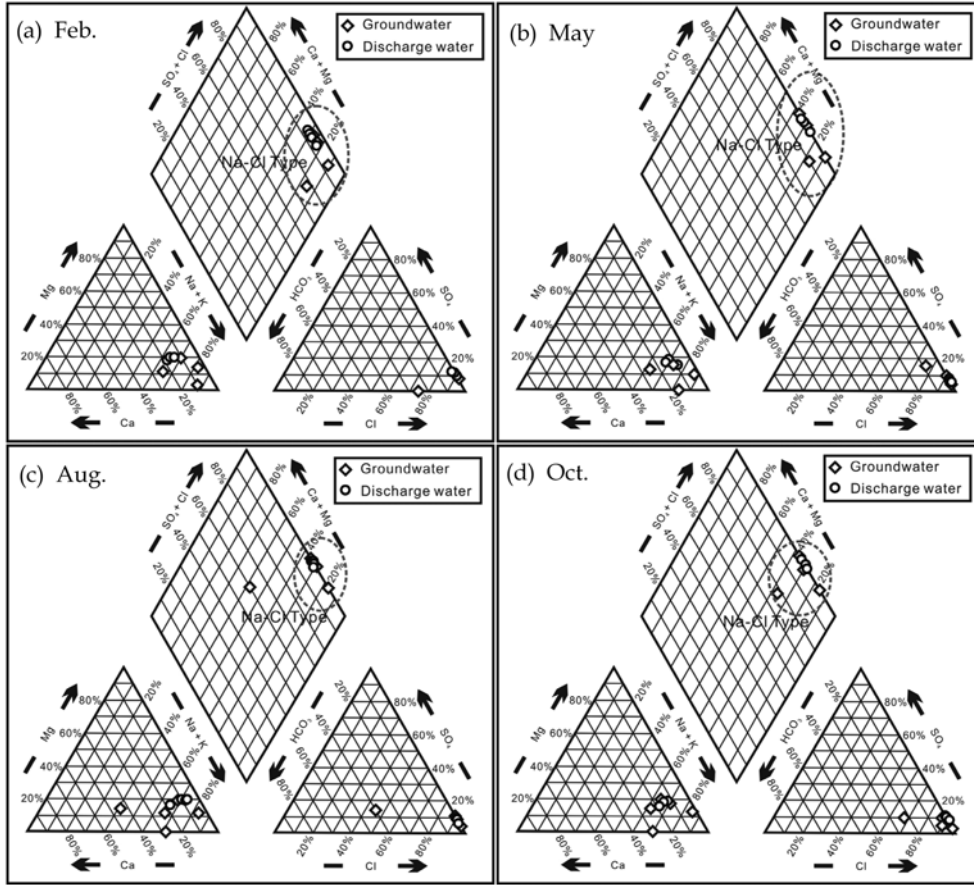


Fig. 5. Piper diagram of major chemical compositions of water samples.

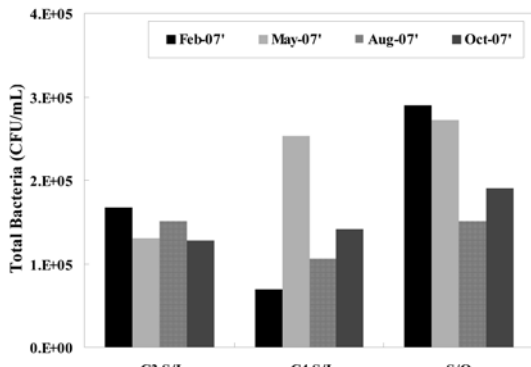


Fig. 6. Total bacteria content levels in seepage water.

Fig. 6과 같으며 총 세균의 수는  $6.89 \times 10^4$ - $2.90 \times 10^5$  CFU/mL의 범위로 나타났다. C3 S/I와 S/O의 경우 계절적으로 감소하는 경향을 보였고, C4 S/I는 5월에  $2.53 \times 10^5$  CFU/mL

까지 증가하였다가 8월과 10월에는  $2.00 \times 10^5$  CFU/mL 미만으로 감소하였다. 호기성세균은 물에 용존된 산소를 전자수용체로 사용하고 탄화수소를 영양원으로 이용하여 증식하는 박테리아로서 용존산소와 탄화수소가 공존하는 환경이 필수적이다(한일영 외, 2001; 이진수 외, 2005).

호기성세균은 지하수와 C/S의 시료에 대하여 분석을 수행하였다. 연구지역 지하수에서 나타나는 호기성세균의 수는 2월, 5월, 8월에 50 CFU/mL 미만으로 나타나다가 10월에 최대 165 CFU/mL까지 증가하였다(Fig. 7(a)). 한편 C/S의 경우 2월에 276 CFU/mL로 나타났던 호기성세균의 수가 10월에는 불검출로 나타났으며 지하수의 경우와 다르게 감소하는 경향을 보여주었다. 산소가 존재하지 않는 환경에서 용존산소 이외의 전자수용체와 유기물질을 이용하여 증식하는 혐기성세균의 수는 지하수와 C/S 모두 50 CFU/mL 미만으로 낮게 나타났다(Fig. 7(b)). 프로판 공동 지하수인 B15 및 B16에서는 약간 증가하는 경향이



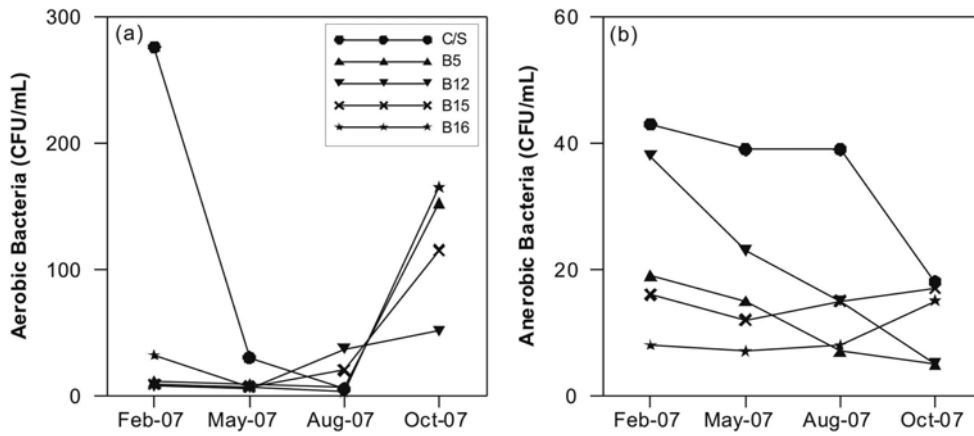


Fig. 7. Aerobic and anaerobic bacteria content in water samples.

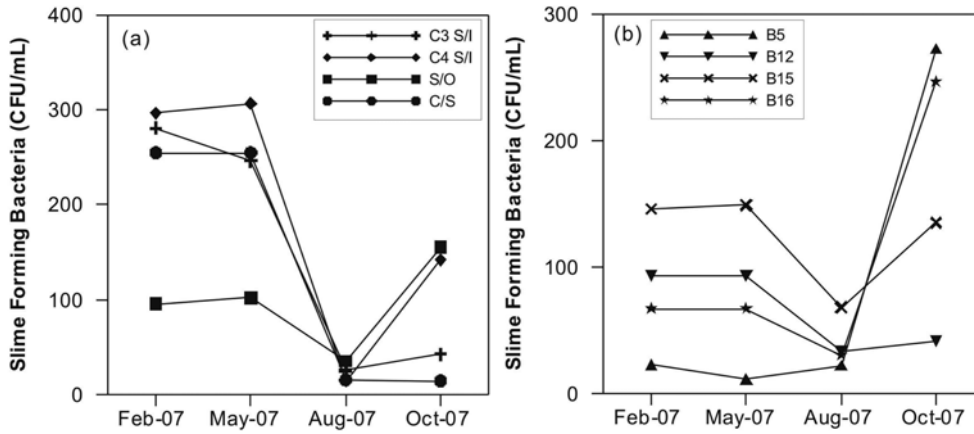


Fig. 8. Slime forming bacteria contents in (a) seepage water and (b) groundwater.

나타났으나 그 변화가 미미하며 부탄공동 지하수 B5 및 B12는 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. C/S의 경우 4차례 분석결과 모두 지하수에 비하여 높은 값으로 나타났고, 부탄공동 지하수와 마찬가지로 점차 감소하였다.

세포주위에 slime물질을 형성하여 clogging을 유발시키거나 기계류에 부착하여 부식을 촉진시키는 것으로 알려진 점액질세균은 지하저장공동 내에서 침전물 형성의 주된 원인이 될 수 있는 것으로 보고된 바 있다(한일영 외, 2001; 이진수 외, 2005). 연구지역에서 점액질세균의 수는 11~307 CFU/mL의 범위로 나타났다(Fig. 8). 2월과 5월 분석결과 유출수에서 지하수보다 높은 값을 보였으며 8월에는 모든 지점에서 100 CFU/mL 미만으로 낮은 값을 지시하였다. 10월에는 점액질세균의 수가 다시 증가하여 B5의 경우 273 CFU/mL로 가장 높은 값을 보였다. 신규 관

측정 B8-1의 점액질세균의 수는 8월에 21 CFU/mL로 검출되었으며 10월에는 검출되지 않았다. 8월에 점액질세균의 농도가 모두 낮아진 것은 장마로 인한 강수량의 증가로 인해 세균이 증식하기에 적절한 환경조성에 방해가 되었으며 또한 그 농도가 희석되었을 것으로 사료된다.

혐기성세균의 일종인 황산환원세균은 pH 4~9의 범위에서 생존하며 자연생태계의 혐기성 조건에서 유기물을 최종 분해하는 역할을 한다. 연구지역에서는 2월에 C/S에서 4 CFU/mL가 검출되었고, 8월에는 C3 S/I, S/O에서 2 CFU/mL, 3 CFU/mL가 검출되었지만 나머지 지점에서는 검출되지 않았다.

**BOD, COD 및 SS 분석**

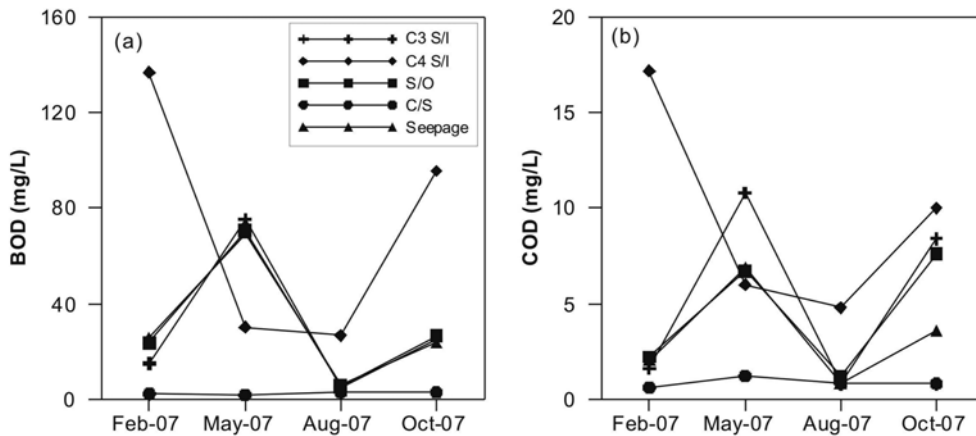
연구지역의 지하저장공동으로 유입되는 유출수에 대

하여 BOD, COD 및 SS를 분석하였다. BOD는 생물화학적 산소요구량으로 유기물이 미생물에 의하여 호기성 상태에서 분해하여 안정화시키는데 요구되는 산소량을 말하며 유기물의 오염도를 나타내는 인자로 사용된다. COD는 화학적 산소요구량으로 BOD와 함께 폐수의 유기물 함유도 측정을 위한 중요한 척도이다. 부유물질(SS)은 입자 크기가 2 mm 이하로 물에 용해되지 않는 물질을 일컫는 말로 오염된 물의 수질을 표시하는 지표이다. 하천 등 자연수역에 방류되면 물의 탁도를 높이고 외관을 더럽히며, 그 중 생물분해 가능한 유기물질이 용존산소를 감소시킨다. 이러한 SS의 측정법은 시료를 여과시켜서 고형물을 포집하고 건조시킨 후, 그 전후의 무게 차에 의해서 고형물의 농도를 구하고 mg/L 또는 ppm으로 나타낸다.

지하수 및 유출수의 BOD, COD, SS의 분석결과는 Table 3에 정리하였다. 분석결과 COD 및 SS는 유출수의 경우 4차례 모두 배출허용기준(COD 130 mg/L, SS 120 mg/L) 미만으로 나타났다. BOD의 경우에는 2월(C4 S/I)과 8월(B12)에 일부 관정에서 배출허용기준(BOD 120 mg/L)을 초과하였을 뿐 나머지 지점에서는 기준치 미만으로 나타났고, 5월과 10월에는 모든 지하수 및 유출수가 배출허용기준 미만으로 나타났다. BOD의 계절적 변화는 C3 S/I, S/O, Seepage말단의 경우 5월에 약간 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보였으며 C4 S/I의 경우 5월과 8월에 감소하였다가 10월에 다시 증가하는 경향을 보였다(Fig. 9(a)). COD의 경우 BOD와 비슷한 변화양상을 보이며 계절에 따른 농도 변화가 뚜렷하다(Fig. 9(b)).

**Table 3.** Result of water analysis for BOD, CODMn and SS. Values exceeding the standards are bold (unit : mg/L).

Discharge standards	BOD <sub>5</sub>				COD <sub>Mn</sub>				SS			
	120				130				120			
Sampling	Feb	May	Aug	Oct	Feb	May	Aug	Oct	Feb	May	Aug	Oct
C3 S/I	14.9	75.1	4.6	25.2	1.6	10.8	0.8	8.4	17.0	18.2	10.4	20.4
C4 S/I	137.0	30.0	26.7	95.5	17.2	6.0	4.8	10.0	3.0	13.4	11.8	11.8
S/O	23.6	70.7	5.5	26.5	2.2	6.7	1.2	7.6	17.5	12.4	9.6	39.0
C/S	2.2	1.7	2.7	2.8	0.6	1.2	0.8	0.8	23.5	52.8	55.8	57.0
B5	10.3	8.8	6.8	1.6	5.6	6.0	18	2.4	161.0	54.6	72.0	89.0
B12	23.0	14.5	205.9	0.9	5.4	11.2	13.6	6.4	155.0	146.8	718.7	189.2
B15	0.8	0.7	0.3	14.5	4.2	6.0	2.4	2.8	34.0	36.0	30.7	17.2
B16	3.5	3.0	13.1	0.7	2.2	6.8	17.2	6.0	25.0	40.0	86.5	88.2
B8-1	-	-	-	6.4	-	-	-	37.6	-	-	-	426.4
End point of Seepage water	25.7	69.5	6.0	23.5	2.0	6.9	0.8	3.6	20.0	11.2	14.6	36.6
End point of wastewater facility	1.4	0.3	1.3	0.3	58.0	23.2	14.4	6.0	0.6	0.8	1.2	0.8



**Fig. 9.** Seasonal variations of BOD and COD levels of water samples in the study area.

**Table 4.** Analysis of BOD and COD in seepage water.

Samples	pH	EC (mS/cm)	DO (mg/L)	ORP (mV)	T (°C)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	TOC (mg/L)
S/O	7.3	44.2	4.30	139	14.0	8.1	2.0	144	53.51
End point of seepage water	7.3	40.6	3.29	154	14.5	12.6	2.4	80	1.66

한편 COD의 경우 산화제에 따라 COD<sub>Mn</sub>법과 COD<sub>Cr</sub>법이 있으며 우리나라 수질기준은 COD<sub>Mn</sub>법으로 제시되어 있으나 산화력이 약하여 유기물을 모두 산화시키지 못하기 때문에 정확한 화학적 산소요구량을 측정하기 어렵다. 일본을 제외한 외국의 COD 수질기준은 산화력이 강한 COD<sub>Cr</sub>법을 사용하고 있다. 연구지역의 유출수에 대하여 2007년 4월 17일과 18일에 걸쳐 시료채취와 함께 현장수질측정 및 BOD<sub>5</sub>, COD, 총 유기물함량(TOC)을 분석하였으며 각각의 결과는 표 4에 정리하였다. BOD<sub>5</sub> 및 COD<sub>Mn</sub>은 모두 배출허용기준 미만으로 나타났으며 COD<sub>Cr</sub>법으로 분석한 결과 COD<sub>Mn</sub>법에 비하여 수십 배 높은 값을 보였다.

**결 론**

상기에서 우리는 인천 해안에 위치하고 있는 액화석유가스(LPG) 저장 공동 내부 및 주변 지하수 그리고 유출수의 수화학적 특성에 대하여 살펴보았다. 저장공동 주변 유출수의 pH는 중성 내지 약알칼리성 범위의 값을 보이며 프로판 공동 부근 지하수는 강알칼리성을 나타낸다. 이는 유출수를 제어하기 위하여 공동기지 및 관측정 설치에 사용된 시멘트 그라우팅물질의 용해영향 이라고 판단되며 또한 지하수가 오랜 기간 체류하여 수소이온이 규산염광물 및 탄산염 광물과 반응 하거나 양이온을 용탈시키면서 소비되었을 것으로 사료된다. EC는 변화의 폭이 크게 나타나며 밀도차에 의해 관정의 상부는 전기전도도가 작고 관정의 하부로 갈수록 전기전도도가 증가한 것으로 판단된다. 또한 우기의 영향으로 계절적인 변화가 뚜렷하게 나타난다. 지하수의 DO 및 ORP는 지하수가 환원환경에 가까움을 지시하며 ORP는 EC와 마찬가지로 시료채취 시기별로 증가와 감소를 반복하는 경향이 나타난다.

저장공동은 지역적인 특성상 해수의 영향으로 인하여 유출수 및 지하수의 수질유형은 모두 Na-Cl type이 지배적으로 나타났으며 계절적인 변화는 적었다. 지하수 및 유출수에서 급격한 미생물 증식은 관찰되지 않았으며 호기성세균, 혐기성세균, 점액질세균, 황산환원세균 모두

500 CFU/mL 미만으로 낮게 나타났다. 따라서 연구지역의 지하저장공동은 수리지구화학적 및 미생물학적으로 안정된 양상을 보이거나 일부 관정에서 과다한 용존철 등에 문제발생 가능성이 있으므로 주기적인 모니터링을 지속적으로 수행해야 한다.

**사 사**

본 연구는 E1에 의해 지원되었습니다. 현장조사에 도움을 준 지오그린21과 E1 관계직원께 감사드립니다. 또한 본 논문에 좋은 지적을 해 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

**참고문헌**

강재기, 양형식, 김경수, 김천수, 2003, 지하수위 변화에 따른 지하공동 주변의 지하수 유동특성 해석. 터널과 지하공간, 13(6), 465-475.  
 김동규, 오두환, 정찬근, 1999, 인천 LPG 수입기지 현장 지질공학, 9(3), 267-280.  
 이종운, 전효택, 전계택, 1995, Water Curtain 시스템을 운용하는 LPG 지하비축기지 주변에 대한 수리지구 화학적 연구. 대한지하수환경학회 1995년도 정기총회 및 춘계학술발표회(초록), 서울대학교, pp. 41-43.  
 이진수, 전효택, 이종운, 전계택, 제현국, 오세중, 이경주, 2005, 지하유류비축기지의 안정적 유지를 위한 수리지구화학적 및 미생물학적 특성 연구. 한국지구시스템공학회지, 42(4), 354-370.  
 이진용, 조병욱, 최미정, 임현수, 이강근, 2008, LPG 저장공동 주변의 지하수 유출평가. 춘계 지질과학기술공동학술대회(초록), 서울 코엑스, pp. 82.  
 전한석, 2000, 지하 유류저장 공동의 지질구조와 공동누수량 상호관계에 관한 사례. 지질공학, 10(1), 79-93.  
 정찬호, 2004, 지하원유비축기지 공동주변 지하수의 수질 화학적 변화와 기밀성과의 관계. 지질공학, 14, 259-272.  
 최원규, 2005, 지하수질이 LPG 저장 공동의 수리지질학적 특성에 미치는 영향. 한국지구시스템공학회지, 42(4), 371-378.  
 한일영, 정일문, 유홍중, 2001, 확산능을 이용한 지하 LPG 저장기지의 W/C 효율성 진단. 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회(초록), 전주대학교, pp. 31-34.  
 Cha, S.S., Lee, J.Y., Lee, D.H., Amantini, E., and Lee, K.K., 2006, Engineering characterization of hydrau-

- lic properties in a pilot rock cavern for underground LNG storage. *Engineering Geology*, 84(3-4), 229-243.
- Goodall, D.C., Aberg, B. and Brekke, T.L., 1988, Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21, 235-258.
- Ko, K.S., Chang, H.W., Kim, T. and Lee, K.K., 2002, Factors affecting the groundwater system around an underground LPG storage cavern. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 35, 279-290.
- Lee, J.Y. and Cho, B.W., 2008, Submarine groundwater discharge into the coast revealed by water chemistry of man-made undersea liquified petroleum gas cavern. *Journal of Hydrology*, 360, 195-206.
- Liang, J. and Lindblom, U., 1994, Analyses of gas storage capacity in unlined rock caverns. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 27, 115-134.

---

2009년 6월 30일 원고접수, 2010년 1월 27일 게재승인

#### 조윤주

강원대학교 지질학과  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 033-250-8551  
Fax: 033-242-8550  
E-mail: jyj0820@kangwon.ac.kr

#### 이진용

강원대학교 지질학과  
200-701 강원도 춘천시 효자2동 강원대학길1  
Tel: 033-250-8551  
Fax: 033-242-8550  
E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

#### 최미정

(주)지오그린21  
152-719 서울시 구로구 구로동 197-10번지 E&C벤  
치드림타워 2차 901호  
Tel: 02-6330-2500  
Fax: 02-6330-2517  
E-mail: geogw99@empal.com

#### 조병욱

주식회사 E1  
135-798 서울시 강남구 삼성동 159-1  
Tel: 02-3441-4377  
Fax: 02-3441-4269  
E-mail: bwc1714@e1.com