

## 전남 해안 LPG 저장공동 유출수와 주변 지하수의 수질특성

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

<sup>1</sup>강원대학교 지질학과, <sup>2</sup>지오그린21, <sup>3</sup>주식회사 E1

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

Jin-Yong Lee<sup>1\*</sup> · Mi-Jung Choi<sup>2</sup> · Hyun-Jung Kim<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>E1 Corporation

### ABSTRACT

Water curtain of an underground LPG storage cavern is a facility to prevent leakage of high pressure gases, for which groundwater should flow freely towards the cavern and groundwater level also must be stably maintained. In this study, in order to evaluate qualities of seepage water and surrounding groundwater of an underground LPG storage cavern in Yeosu, 4 rounds of samplings, field measurements and laboratory analyses (February, May, August, October of 2007) were conducted. According to field measurements, pH was weak acidic to neutral but it gradually increased with time. Electrical conductivity (EC) of groundwater near a salt stack showed very high values between 10.47 and 38.50 mS/cm. Dissolved oxygen (DO) showed a very wide range of 0.20~8.74 mg/L and a mean of oxidation-reduction potential (ORP) was 159 mV, which indicated an oxidized condition. Levels of Fe<sup>2+</sup> and Mn<sup>2+</sup> were mostly less than 3 mg/L. All of seepage waters showed a Na-Cl type while only groundwater near the salt stack showed a Na-Cl type with a high total dissolved solid. The other groundwaters exhibited typical Ca-HCO<sub>3</sub> types. Levels of aerobic bacteria were mostly very high (573~39,520 CFU/mL). Based on the analyses of these hydrochemistry and biological characteristics, it is concluded that there are no particular problems in groundwater and seepage water, which not causing a trouble in the cavern operation. However, both for control of bio-clogging and for sustainable operation of the water curtain system, a regular hydrochemical and microbiological monitoring is required for the seepage water and surrounding groundwater.

**Key Words** : Underground storage cavern, Water curtain system, Water quality, Hydrochemistry, Microorganism

### 요약문

LPG를 저장하는 지하공동의 수장막 시스템은 고압의 가스가 공동 밖으로 새어나가지 못하도록 원활한 지하수의 흐름과 안정적인 지하수두 유지가 필수적이다. 본 연구에서는 전남 여수 LPG공동의 유출수 및 주변 지하수의 수질특성을 파악하기 위하여 2007년 2월, 5월, 8월, 10월에 걸쳐 시료채취, 현장측정 및 실내 수질분석을 실시하였다. 현장측정 결과 pH는 약산성에서 중성으로 나타났고 10월로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. 전기전도도는 소금적치장과 인접한 관정의 경우 10.47~38.50 mS/cm로 매우 높게 나타났다. 용존산소는 0.20~8.74 mg/L로 매우 넓은 범위를 보였고, 산화환원전위는 평균 159 mV로 비교적 산화환경임을 나타냈다. 또 Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>의 농도는 대부분 3 mg/L 미만으로 나타났다. 수질유형은 유출수의 경우 4차례 모두 Na-Cl type으로 나타났으나 지하수의 경우 소금적치장 인접 관측정은 Na-Cl type으로 높은 TDS를 보였다. 다른 지하수 관측정은 전형적인 Ca-HCO<sub>3</sub> type으로 나타났다. 미생물 분석결과 호기성세균의 수가 573~39,520 CFU/mL로 비교적 높게 검출되었다. 본 연구에서 수리화학 및 미생물학적 특성을 분석한 결과 지하수와 유출수는 여수 저장공동의 운영에 있어서 큰 문제를 일으키지 않을 것으로 사료된다. 그러나 미생물 증식의 제어와 수리적 안정성을 유지하기 위해서는 지속적인 모니터링이 요구된다.

**주제어** : 지하저장공동, 수장막시스템, 수질, 수리화학, 미생물

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

원고접수일 : 2009. 6. 22 심사일 : 2009. 6. 24 게재승인일 : 2009. 7. 20

질의 및 토의 : 2009. 10. 31 까지

## 1. 서 론

액화석유가스(LPG)의 지하저장은 공동(Cavern)을 지하 일정 깊이까지 굴착해서 그 주변에 작용되는 지하수의 정수압을 공동 내 LPG의 증기압보다 높게 유지되게 함으로써 공동내로 지하수가 지속적으로 흐르게 하여 저장되어 있는 LPG가 밖으로 유출되는 것을 방지하는 원리를 이용한다(김태문, 1989; 정찬호, 2004; 이진용 외, 2008; Lee and Cho, 2008). 그리고 지하 저장공동에 있던 LPG가 밖으로 유출될 경우 에너지의 손실뿐만 아니라 폭발이나 화재 그리고 환경오염의 위험성이 있으므로 이를 방지하기 위해 수장막시스템(Water curtain system)을 흔히 이용한다(조성일 외, 2004).

이러한 수장막시스템은 대상지역의 광역적 수계와 지반의 수리적 특성, 지하수위, 강수량과 함양률, 공동의 설치심도와 형상, 저장품의 종류, 지하수의 화학적 및 생물학적 특성 등 여러 가지 복합적인 요인에 의해 안정성에 영향을 받을 수 있다(고경석 외, 1998; 남열우 외, 2002). 또한 점액질 세균의 경우 기계류나 관정 내에 번식하는 경우 심각한 폐쇄현상(Clogging)을 유발하거나 지하 저장공동 내의 침전물 형성으로 인하여 장치의 효율성을 현저하게 떨어뜨릴 수 있는 원인이 되기도 한다(한일영 외, 2001; 이진수 외, 2005).

국내외의 많은 지하 저장공동들은 여러 가지 이유로 안정성과 운영에 위협을 받고 있으며 지하수위의 비정상적인 하강, 이에 따른 공동 유출수량의 감소, 공동 주변 암반 단열의 막힘에 의한 투수성 저하, 유출수 배제펌프의 이물질 침전 등을 들 수 있다(강대섭 · 한일영, 1997; 이대혁 외, 1998; Berest and Brouard, 2003; 최원규, 2005; Lee and Cho, 2008). 이런 까닭에 대부분의 지하 저장공동은 공동 유출수 및 주변 지하수에 대한 수위 및 화학적 조성에 대한 정기적인 모니터링을 실시하고 있다(Ko et al., 2002; Eric et al., 2005).

본 연구에서는 전남 여수 해안의 LPG(주로 프로판과 부탄) 저장공동의 유출수 및 주변 지하수의 수질특성을 파악하고자 물시료 채취, 현장수질측정, 주요 양/음이온 및 미생물 분석을 수행하였다. 이를 통해 저장공동의 수학적 및 미생물학적 안정성을 평가하였다.

## 2. 연구지역 및 방법

여수 저장공동은 전라남도 여수시 낙포동에 위치하고 있다. 저장공동은 프로판공동(C3)과 부탄공동(C4)으로 구

성되어 있다. 공동 인근에 소금적치장이 있으며 북쪽으로는 해안과 인접한 부도가 있다(Fig. 1). 물 시료는 지하수 관측정인 TE3, TE4, BMW(부탄공동 부근), TE6, TE8, PMW(프로판공동 부근)과 부탄 Stripper 이전의 유출수(C4 Stripper Inlet: C4 S/I), 프로판 Stripper 이전의 유출수(C3 Stripper Inlet: C3 S/I), 프로판 Stripper 직후의 유출수(C3 Stripper Outlet: C3 S/O), 공동 진입터널 입구의 유출수(Access Tunnel: A/T), Make-up(공동유출수를 수처리한 후 재사용하기 직전의 물)에서 각각 채취하였다(Fig. 1). 한편 Stripper 전후에 유분은 상당부분 제거된다. 시료채취는 2007년 2월, 5월, 8월, 10월에 걸쳐 총 4차례 수행하였다. 시료채취 시 유출수는 Bucket을 이용하였고, 관측정 내의 지하수는 Water Pump를 이용하여 채취하였다. Access Tunnel(A/T)의 물 시료는 터널입구로부터 5 m 안쪽에서 일회용 베일리를 이용하여 채취하였다.

시료채취 전에 현장에서는 Horiba사의 간이수질측정기를 이용해 수소이온농도(pH), 수온, 전기전도도, 용존산소 및 산화환원전위를 측정하였다. 또한 현장에서 분광광도계(DR2010, Hach)를 이용하여 용존 2가철( $Fe^{2+}$ )과 용존 2가망간( $Mn^{2+}$ )을 분석하였다. 실내분석 시료는 0.45  $\mu m$  멤브레인 필터를 이용하여 여과처리(Filtering)를 하였다. 시료는 각각의 실험실 분석항목에 맞는 시료병에 담았고 분석기에 적합한 전처리를 수행하여 4°C로 냉장보관 후 분석실로 송부하였다. 실험실에서는 주요 양/음이온, 총유기탄소(TOC), 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량( $COD_{Mn}$ ) 및 미생물을 분석하였다.

한편 지하수 관측정 TE3, BMW, TE9, PMW는 수직정이고, TE4, TE6, TE8은 30~39°의 경사정이다(Table 1). 관측정의 심도는 지표 아래 최저 41 m에서 최고 210 m에 이르며 이는 해발고도로 -35.5 m에서 -157.9 m에 해당한

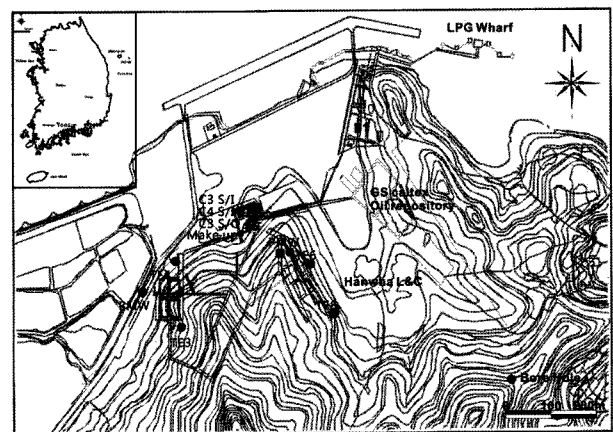


Fig. 1. Location of the study area with water sampling points.

**Table 1.** Specifications of monitoring wells in the storage caverns

Monitoring Well	Top of casing (m, msl)	Bottom of well (m, msl)	Dip (°)	Depth (m)	Location
TE3	52.1	-157.9	90	210	Butane cavern
TE4	4.1	-150.8	39	199.3	
BMW	5.45	-35.5	90	41	
TE6	27.7	-147.8	30	202.7	Propane cavern
TE8	35.1	-127.2	35	198.3	
PMW	17.61	-89.5	90	117.1	

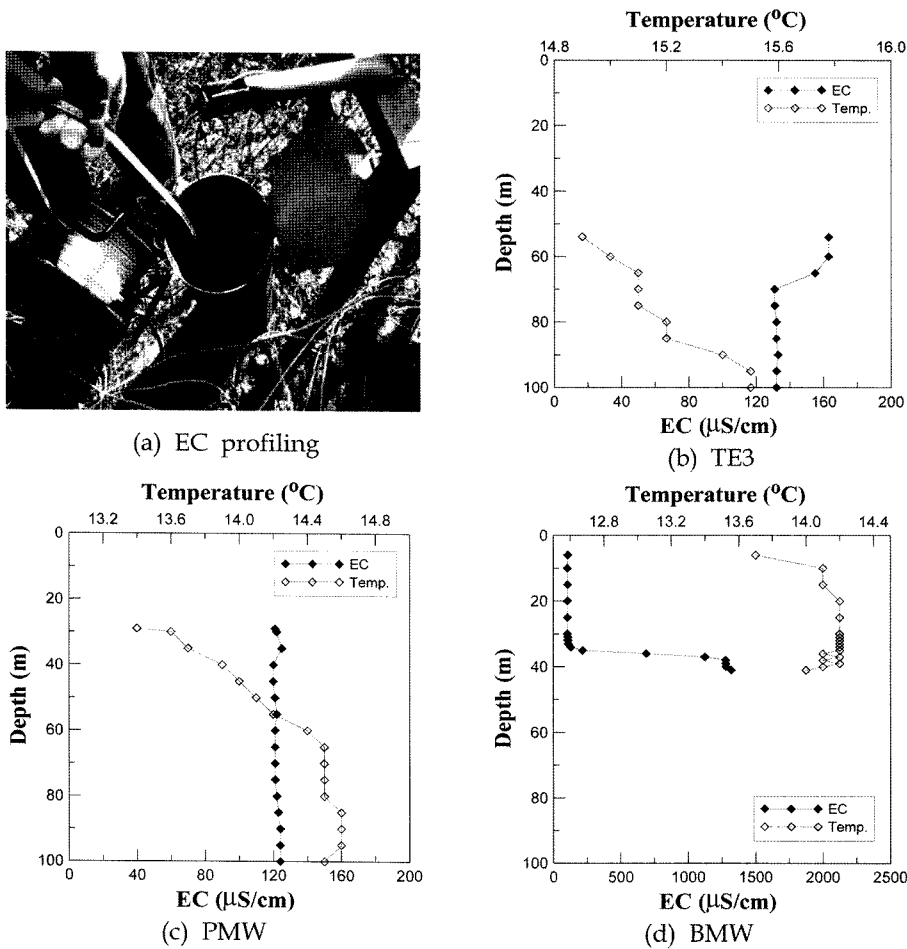
다. TE9는 지표에서 약 7 m 부근에서 관정이 막혀 Waterra Pump가 들어가지 않아 인접 관측정인 TE6에서 시료채취를 수행하였다. TE4의 경우 지표에서 약 12 m 부근에서 일부 막혔지만 시료채취는 가능하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 전기전도도(EC) 및 수온 수직검층

전기전도도 검층은 2007년 2월에 실시하였다(Fig. 2).

TE4는 중간이 막혀 그리고 TE6, TE8는 경사정으로 TLC meter가 들어가지 않아 EC검층을 수행하지 못하였다. EC검층 결과, TE3 및 PMW 관정 지하수의 EC는 대체로 120  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 일반적인 천부 혹은 심부지하수의 그것과 다르지 않았고 수직적인 변화 또한 크지 않았다. 그러나 해안과 인접한 BMW의 하부구간에서는 EC가 최대 약 1,319  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났으며 심도에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 깊은 심도에 존재하는 염수(saline water)의 영향으로 사료된다(Lee and Cho, 2008). 한편



**Fig. 2.** Vertical profiles of water temperature and EC: (a) EC profiling, (b) TE3, (c) PMW, (d) BMW monitoring wells.

심도별 수온의 변화는 TE3과 BMW에서 EC와 반대경향을 나타내었는데 지표에 가까울수록 미세하게 증가하는 경향을 보였다. PMW의 경우 하부에서 상부로 가면서 수온이 뚜렷하게 감소하는데 이는 상부의 지하수가 추운 대기의 영향을 직접적으로 받은 결과로 사료된다.

3.2. 현장수질

2007년 총 4차례에 걸쳐 수행한 현장수질 측정결과를

시료채취 지점에 따라 프로판공동 유출수(C3-S), 부탄공동 유출수(C4-S), 프로판공동 지하수(C3-G), 부탄공동 지하수(C4-G) 및 A/T, Make-up으로 구분하여 상자그림(Box plot)으로 도시하였다(Fig. 3). 수소이온농도(pH)는 전체적으로 5.9~8.3으로 약산성에서 약알칼리성으로 나타났다으며, 공동 유출수(C3-S, C4-S)는 인근 지하수(C3-G, C4-G)에 비해 대체로 높은 pH를 보였다(Fig. 3a). 또한 A/T와 Make-up도 지하수의 pH보다 높게 나타났다. 유출

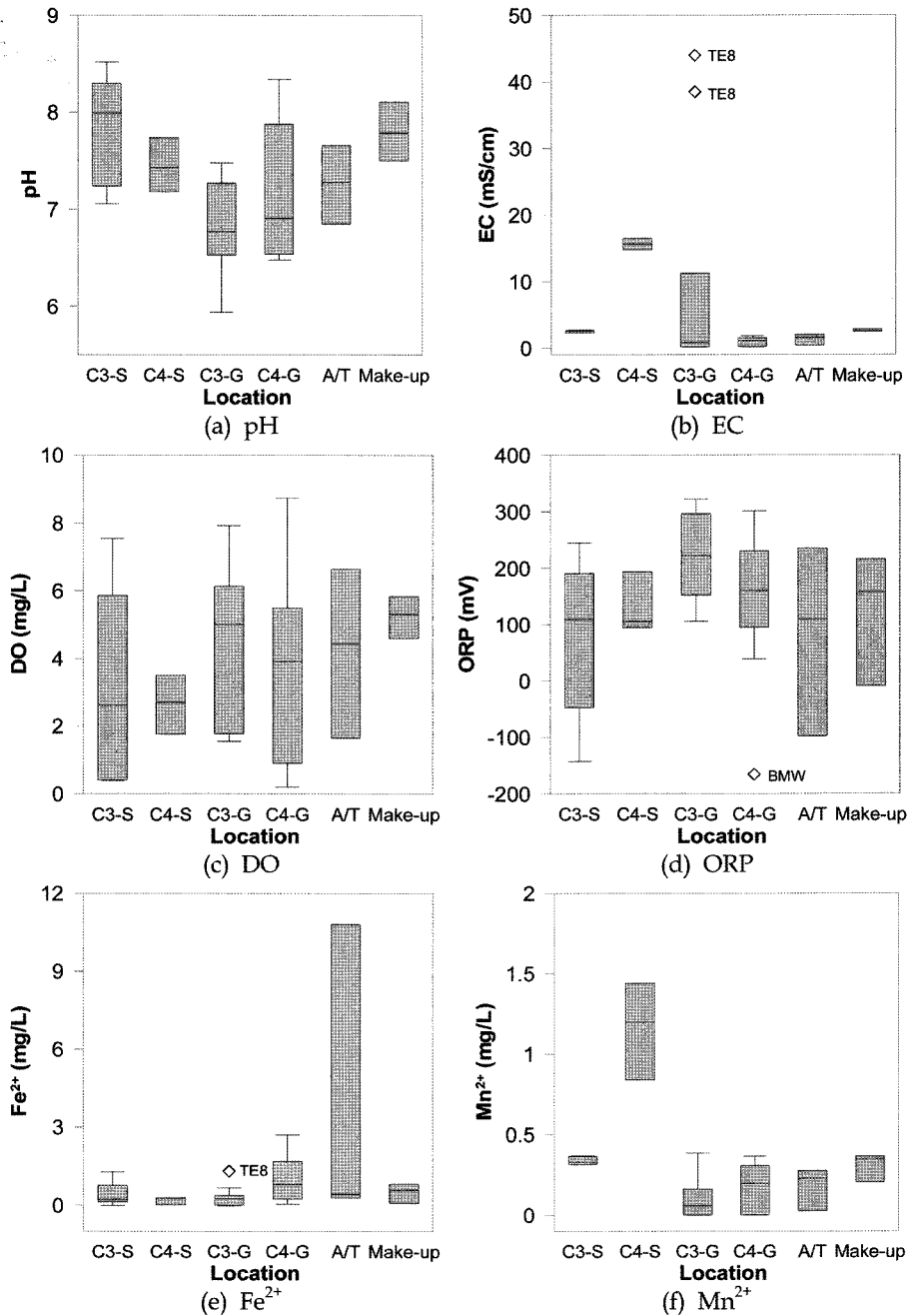


Fig. 3. Field measured parameters of water samples (4 rounds) taken in the Yeosu underground storage cavern.

수 pH의 경우 프로판공동(C3-S)에서 부탄공동(C4-S)보다 약간 높은 값을 보였다. 공동 유출수의 pH가 상대적으로 알칼리성을 보이는 것은 저장 LPG에 의해 공급된 유기탄소의 분해 결과로 사료된다(정찬호, 2004).

전기전도도(EC)는 0.15~44.00 mS/cm로 매우 넓은 범위를 보였는데 해안 염수의 영향과 TE8의 특이적으로 높은 EC값의 영향이다(Fig. 3b). TE8 관측점의 지하수는 바로 인근에 위치한 소금적치장의 영향도 받는 것으로 사료된다. 지점별로 보면 프로판공동 유출수는 평균 2.53 mS/cm

로 상대적으로 낮은 값을 보였고, 반면에 부탄공동 유출수의 경우 평균 15.66 mS/cm로 높은 값으로 나타났다. 그리고 지하수의 EC는 TE8을 제외하고는 대체로 2.00 mS/cm 미만으로 낮은 값을 보였다. 한편 공동 유출수 및 지하수의 용존산소(DO)는 0.20~8.74 mg/L로 시료 채취지점에 따라 매우 큰 차이를 나타내었다(Fig. 3c). 평균적으로 보면 공동유출수의 용존산소는 지하수에 비해 소모되어 나타난다. 이 또한 저장공동에 의한 추가적 유기탄소 공급과 이의 분해 영향으로 해석할 수 있다.

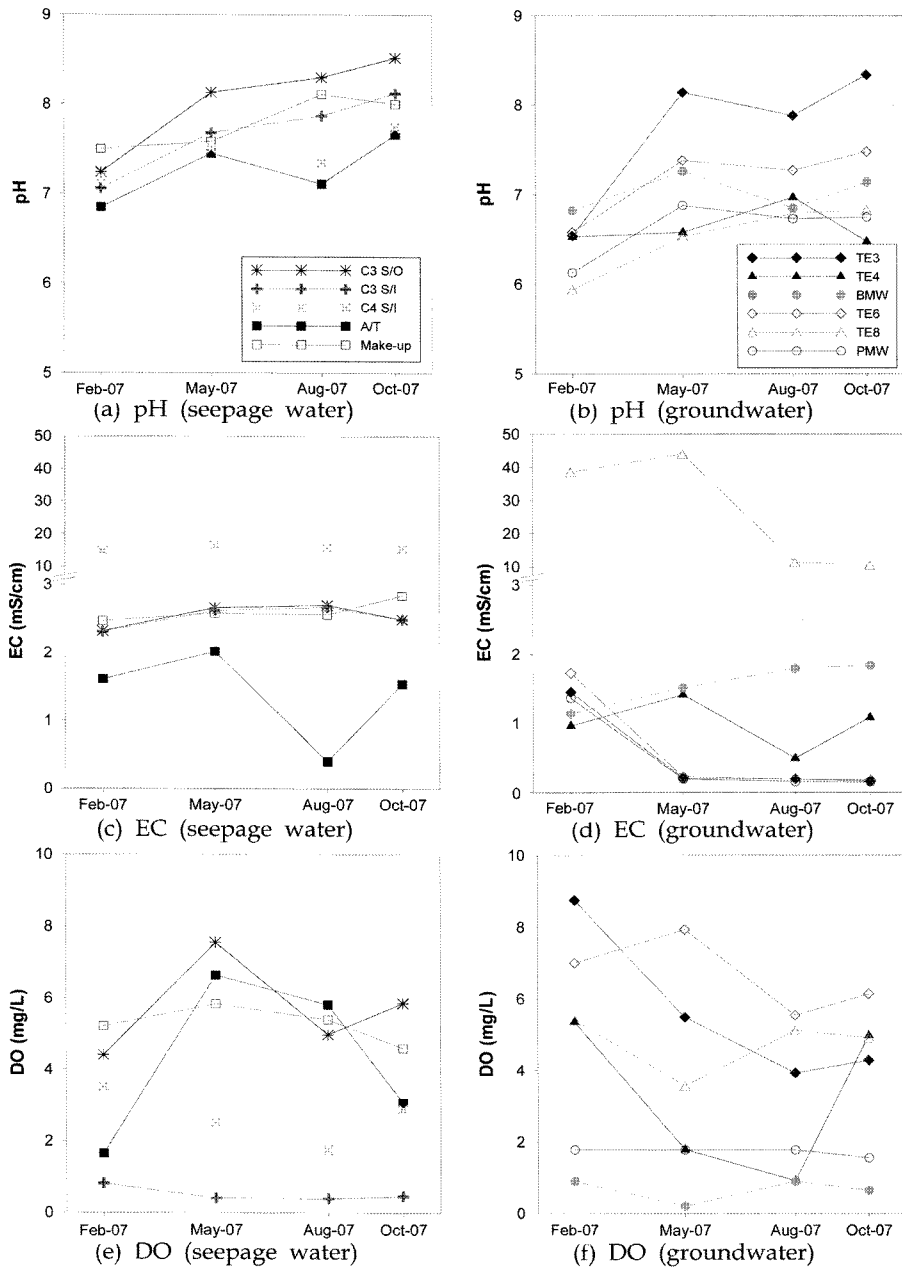


Fig. 4. Seasonal changes of the field measured water qualities.

산화환원전위(ORP)는 유출수는 대체로 낮고(-150~250 mV), 지하수는 상대적으로 높게 나타났다(50~300 mV; Fig. 3d). 유출수의 상대적으로 낮은 ORP는 상기한 유기탄소의 분해와 관련된다. 유출수와 지하수의 용존 2가 철·망간은 대부분의 지점에서 2 mg/L 이하로 낮게 나타났다(Figs. 3e, 3f). 그러나 Fe<sup>2+</sup> 농도범위가 진입터널(AT)에서 매우 크게 나타난 것은 5월에 측정된 값이 10.80 mg/L

로 매우 높게 나타난 결과이다. 그런데 이와 같은 이가철의 일의적 농도증가 이유는 현재로서는 설명하기 어렵다. 한편 Mn<sup>2+</sup>의 경우 C4 S/I에서 0.84~1.44 mg/L의 범위를 보인 것을 제외하고 모든 유출수 및 지하수에서 0.5 mg/L 미만으로 나타났다.

Fig. 4는 상기한 현장측정 항목의 계절적 변화(2, 5, 8, 10월)를 보여준다. pH는 10월에 유출수인 Make-up과 지

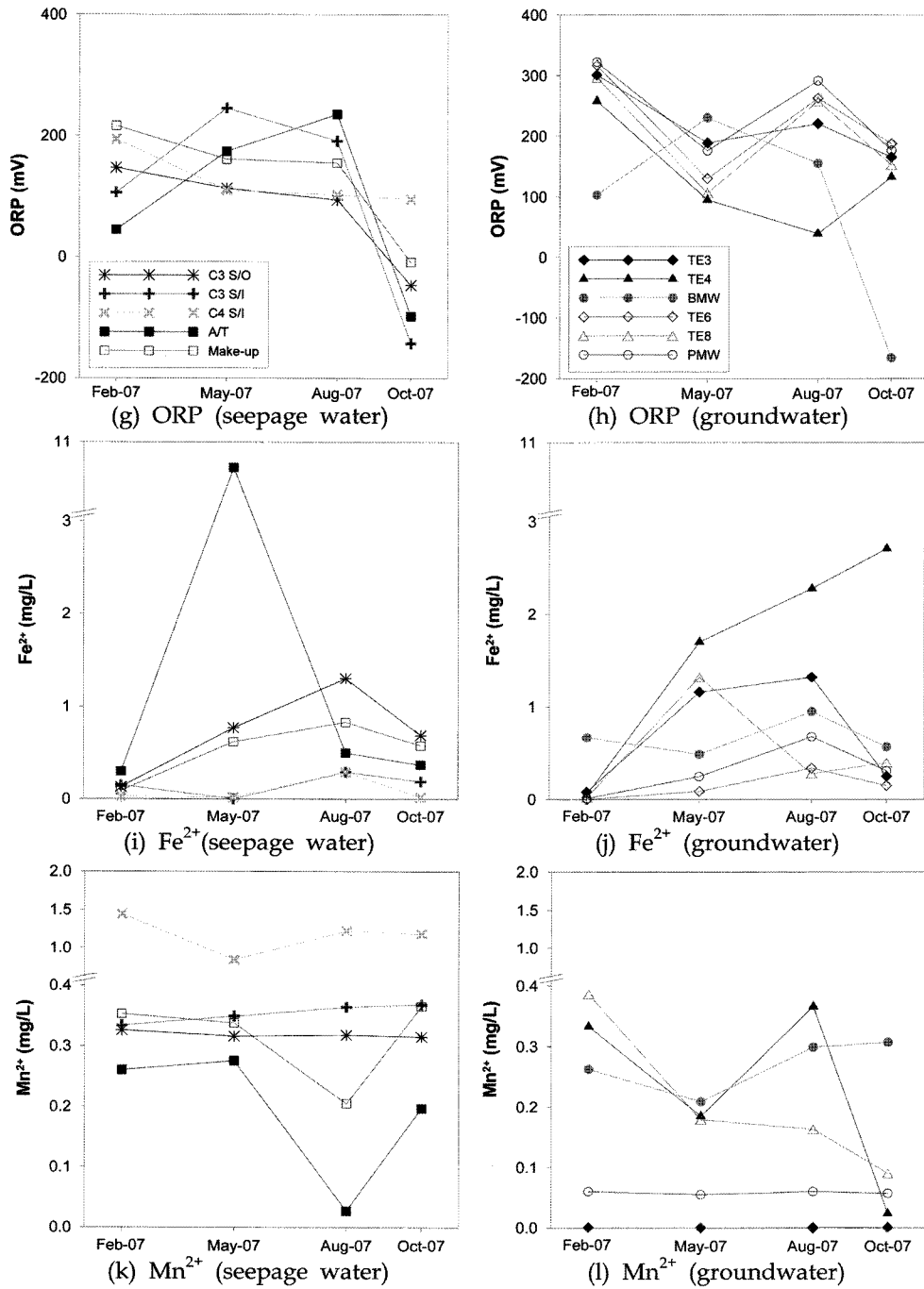


Fig. 4. Continues.

하수인 TE4에서 약간 감소하였지만 전체적으로는 2월에서 10월로 가면서 점차 높아지는 경향을 보였다(Figs. 4a, 4b). 이는 건기에서 우기로 전이하면서 다량의 강수에 의한 추가적인 산소공급으로 유기탄소의 분해가 더 활발히 일어난 결과로 사료된다(Lee et al., 2001). 그리고 공동 유출수에서의 총유기탄소(TOC), 생물학적 산소요구량(BOD) 및 화학적 산소요구량(COD)이 5~8월 높았다가 10월로 가면 크게 감소하는 것과 잘 일치한다(Table 2). 공동 유출수의 EC는 진입터널(A/T)에서 8월에 일시적으로 감소한 것을 제외하면 연중 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 지하수 관정의 경우 BMW를 제외하고는 우기로 접어들면서 강수에 의한 희석의 영향으로 EC가 감소하는 경향을 보였다(Figs. 4c, 4d).

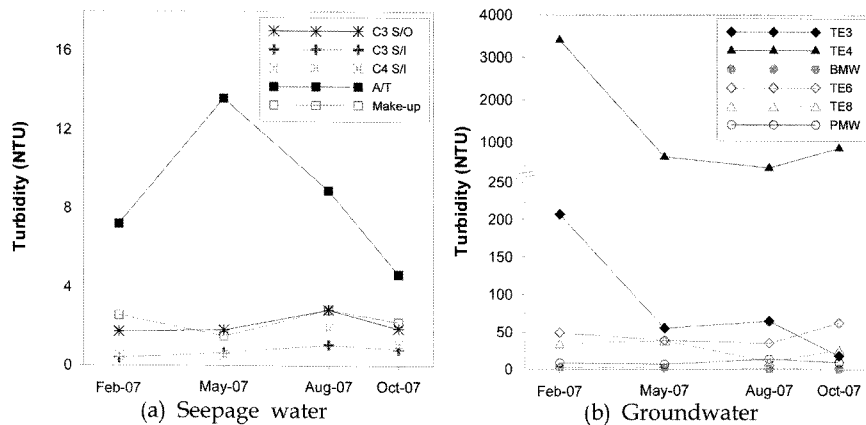
DO의 경우 유출수 및 지하수 모두 농도변화가 크며 복잡한 양상을 보였다(Figs. 4e, 4f). 그럼에도 불구하고 유출수와 지하수의 DO는 대체로 우기를 지나면서 감소하는 경향을 보였는데 이는 앞서 기술한 바와 같이 추가적인 유기탄소의 분해 결과로 해석할 수 있다. 이와 같은 DO

의 감소현상은 ORP의 시간에 따른 감소경향과 잘 일치하고 있다(Figs. 4g, 4h). 이가철의 경우 시간경과에 따라 대체로 증가하는 경향을 보였는데 이는 DO 소모에 따라 상대적으로 혐기환경이 조성된 결과로 볼 수 있다(Figs. 4i, 4j). 용존 망간의 경우 계절적으로 비슷하거나 대체로 약간 감소하는 경향을 보였다.

현장에서 탁도 측정결과 유출수의 탁도는 대체로 낮은 값으로 비교적 일정하게 나타났다(Fig. 5). 진입터널(A/T)의 경우 여름철 강수에 의한 지표수의 유입으로 인하여 탁도가 크게 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 지하수 관측정 TE4는 관측정이 지표에서 약 12 m 정도의 깊이에서 막혀서 시료채취 시에 탁한 흙탕물이 지속적으로 나오고 있다. 이로 인하여 지하수의 탁도는 2월에 3,410 NTU까지 높게 나타났고, 우기인 5월, 8월, 10월에는 1,000 NTU 미만으로 나타났다. 결국 진입터널(A/T), TE4 및 TE3 관측정에서 현저한 감소를 보이나 다른 지점(유출수 및 지하수)의 경우 비슷하거나 약간 증가하고 있어 특별한 경향성을 발견하기 어렵다.

**Table 2.** Concentrations of TOC, BOD and COD in seepage water (mg/L)

Seepage	Date (yy-mm-dd)	Total organic carbon (TOC)	BOD	COD <sub>Mn</sub>
C3 S/I	07-02-26	8.41	1.2	116.0
	07-05-16	85.38	337.3	269.0
	07-08-28	32.86	102.6	58.7
	07-10-15	2.20	39.5	13.1
C4 S/I	07-02-26	0.52	3.9	17.2
	07-05-16	5.41	5.4	23.6
	07-08-28	2.11	12.2	12.8
	07-10-15	0.26	1.7	12.5
C3 S/O	07-02-26	13.06	3.0	161.0
	07-05-16	108.29	334.8	296.0
	07-08-28	28.46	95.8	61.3
	07-10-15	2.15	36.7	10.6



**Fig. 5.** Seasonal change in turbidity of (a) seepage water and (b) groundwater in the Yeosu underground storage cavern.

### 3.3. 이온조성

유출수 및 지하수의 주요 양이온과 음이온 농도의 통계 값을 Table 3에 제시하였다. 유출수의 경우 가장 지배적인(평균값) 양이온은 나트륨( $\text{Na}^+$ )이고 음이온은 염소( $\text{Cl}^-$ )이며 지하수의 경우에도 동일하게 나타났다. 이는 본 저장공동이 해안에 위치하기 때문에 해수의 영향을 많이 받은 결과이다(고경석, 2000). 대체로 유출수보다는 지하수에서 이들 이온이 더 부화되어 나타났다. 한편 소금적지장의 영향을 받고 있는 것으로 사료되는 TE8 관측점의 지하수에서 Na, Cl, Ca, Mg,  $\text{SO}_4$  등의 함량이 가장 높은 것으로 나타났다. TE8의 경우 주요 양/음이온의 함량이 2월에 가장 높았고, 우기를 거치면서 희석의 영향으로 10월로 가면서 점차 감소하는 경향을 보였다. TE3, TE6, PMW는 주요 용존이온의 함량이 낮은 값으로 연중 비슷하게 나타났다(Fig. 6).

본 저장공동의 유출수의 수질유형은 대체로 Na-Cl type으로 나타나나, 지하수의 경우 수질유형이 다양하게 나타나고 있다(Fig. 7). TE3과 PMW, TE6은 전형적인  $\text{Ca-HCO}_3$ 의 일반적 지하수 특징을 보여주고 있으나, TE4는 두 유형의 중간적인 Ca-Cl type에 가깝게 나타났다. 해저 LPG 공동에 비하여 TDS 값은 비교적 낮게 나타났지만 유출수 및 일부 지하수에서 Na-Cl type이 나타나고 있기 때문에 해수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다(Lee and Song, 2007; Lee and Cho, 2008). TE8의 지하수는 TDS가 매우 높은 Na-Cl type으로 프로판공동 근처의 소금적지장에 의한 영향도 받은 것으로 사료된다. 유출수는 2월과 5월, 8월, 10월 모두 Na-Cl type으로 나타났으며 지하수의 수질유형도 계절에 따른 변화는 작은 것으로 나타났다.

### 3.4. 미생물

여수 저장공동 유출수의 총세균의 수는  $6.62 \times 10^4 \sim 3.08 \times 10^5$  CFU/mL로 나타났다(Fig. 8). C3 S/I과 C4 S/I은 2월에 총세균의 수가 가장 높게 나타났고, C3 S/O의 경우 5월에 가장 높은 값을 보였다. 우기를 거치면서 희석 영향에 의해 감소를 보이는 것으로 사료된다. 한편 유출수와 지하수 내 호기성세균의 수는 573~39,520 CFU/mL의 큰 범위를 보였다(Fig. 9). TE4와 Make-up은 2월과 5월, 8월에 다른 지점에 비하여 약 3~4배의 값을 보이다가 10월에 호기성세균의 수가 급격하게 감소하여 5,000 CFU/mL 미만으로 다른 지하수와 비슷한 값을 보였다. 반면에 A/T의 호기성세균은 10월에 급격하게 증가하여 28,733 CFU/mL로 높은 값을 나타냈다. 혐기성세균의 경우 호기성세균보다 작게 나타났으며, 특히 TE4의 지하수는 호기성세균과 마찬가지로 다른 지하수 및 A/T, Make-up보다 높은 값을 보였다. 한편 전체적으로 호기성세균수와 혐기성 세균수는 반대의 변화경향을 보이는데 우기를 지나면서 추가적인 유기탄소의 분해에 따라 혐기성 세균은 대체로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 9b).

공동 유출수와 지하수에 대하여 점액질세균의 수를 분석한 결과, C3 S/I과 C4 S/I은 0~143 CFU/mL로 낮게 나타났다(Fig. 10). 그리고 C3 S/O는 145~456 CFU/mL의 범위로 10월로 가면서 감소하는 경향을 보였다. 반면에 A/T와 Make-up에서는 점액질세균의 수가 10월에 각각 2,720 CFU/mL, 6,850 CFU/mL로 이전 달에 비해 급격한 증가를 보였다. 지하수의 점액질세균은 TE4와 TE8에서 높은 값을 보였고, TE3과 BMW는 낮은 값을 보였다. 본 여수 저장공동은 인천 해저 LPG 저장공동에 비하여 호기성세균, 혐기성세균, 점액질세균 모두 비교적 높은 값으로 나타났다(조윤주 외, 2009).

**Table 3.** Statistics of water analysis data for seepage water and groundwater (unit: mg/L)

Water	Statistics	Ca	Mg	Na	K	Cl	$\text{HCO}_3$	$\text{CO}_3$	$\text{SO}_4$
Seepage water (n=12)	Min	30.2	5.6	49.6	2.5	95.6	50.8	0.030	6.6
	Max	210.3	39.0	384.3	7.9	874.3	92.7	0.738	31.0
	Mean	144.5	28.3	259.9	5.1	665.4	72.5	0.233	21.2
	SD	46.6	9.0	87.7	1.6	208.7	13.6	0.220	6.9
Ground water (n=24)	Min	9.4	2.1	11.7	0.2	8.7	10.4	0.001	0.0
	Max	3,303.5	147.5	13,892.1	40.2	21,141.0	82.3	0.194	176.3
	Mean	238.8	22.3	1,114.2	4.8	1,921.8	35.8	0.029	43.9
	SD	718.6	33.8	3,205.8	8.3	5,257.5	18.2	0.043	55.2
Total (n=36)	Min	9.4	2.1	11.7	0.2	8.7	10.4	0.001	0.0
	Max	3,303.5	147.5	13,892.1	40.2	21,141.0	92.7	0.738	176.3
	Mean	237.3	24.3	829.4	4.9	1,503.0	48.0	0.097	36.3
	SD	586.9	28.0	2,631.1	6.8	4,305.7	24.1	0.161	46.2



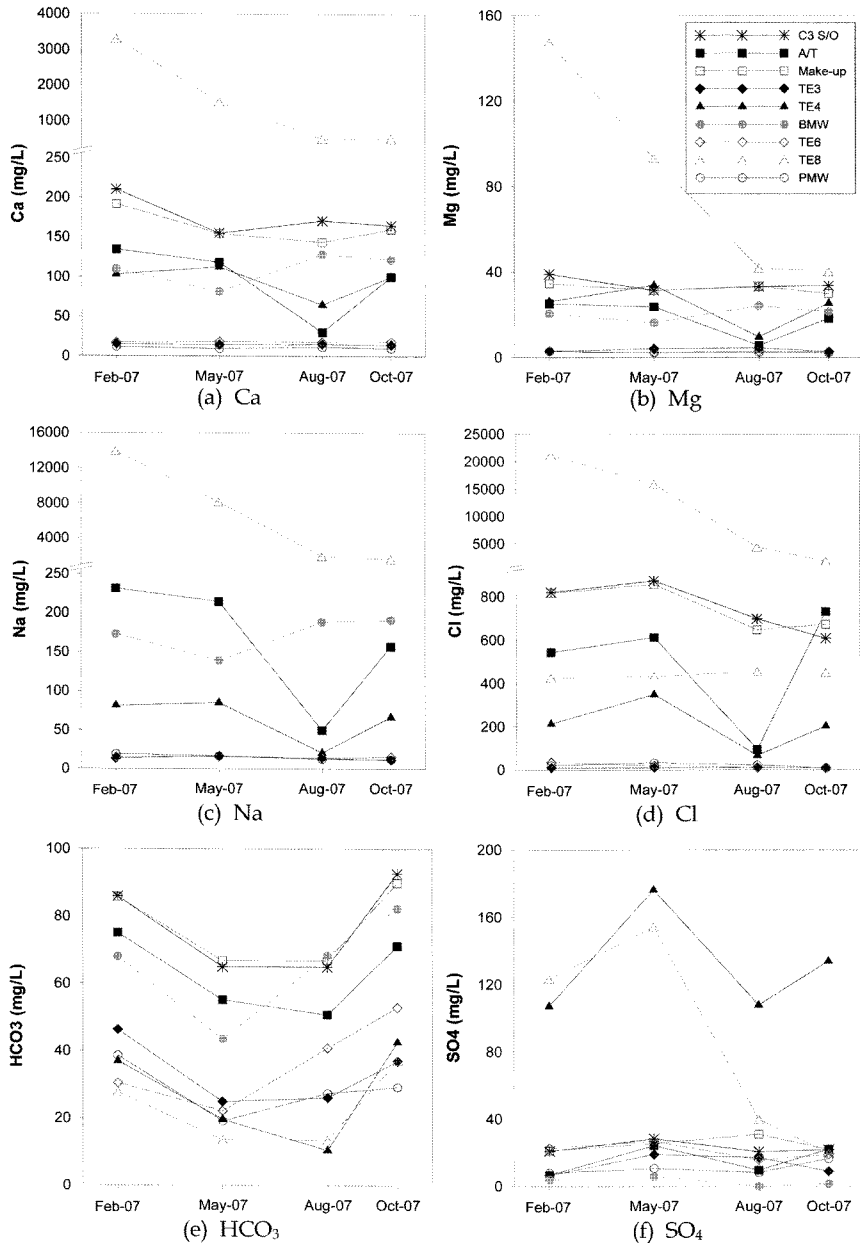


Fig. 6. Seasonal change in amount of dissolved ions in seepage water and groundwater.

#### 4. 결 론

전남 여수에 위치하는 LPG 저장 공동 유출수 및 주변 지하수의 수질특성을 파악하기 위하여 2007년 2월, 5월, 8월, 10월에 걸쳐 총 4차례 시료채취 및 수질분석을 실시하였다. 시료채취와 함께 유출수 및 지하수에 대하여 현장에서 pH, EC, DO, ORP, 수온 및 Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Turbidity를 측정하였으며, 주양이온 및 음이온, 박테리아 등을 분석하였다. 본 연구의 주요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 저장공동 유출수 및 지하수의 pH는 약산성에서 중

성으로 나타났고, 2월에서 10월로 갈수록 증가하는 경향이 나타났다. EC는 대부분 일반 지하수와 비슷한 값을 보였으나 소금적치장과 근접한 TE8의 경우 10.47~38.50 mS/cm로 매우 높은 값을 보였다. 유출수 및 지하수의 ORP는 -166~322 mV(평균 159 mV)로 비교적 산화환경임을 지시하고 있다. DO의 경우 최대 8.74 mg/L까지 매우 넓은 범위를 보였다. Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>의 측정결과 대부분 3 mg/L 미만으로 낮은 값을 보였다. TE4의 경우 Fe<sup>2+</sup>의 농도가 지속적으로 상승하여 10월에 2.71 mg/L로 나타났다.

2) 저장공동의 유출수는 수질유형이 Na-Cl type으로 나

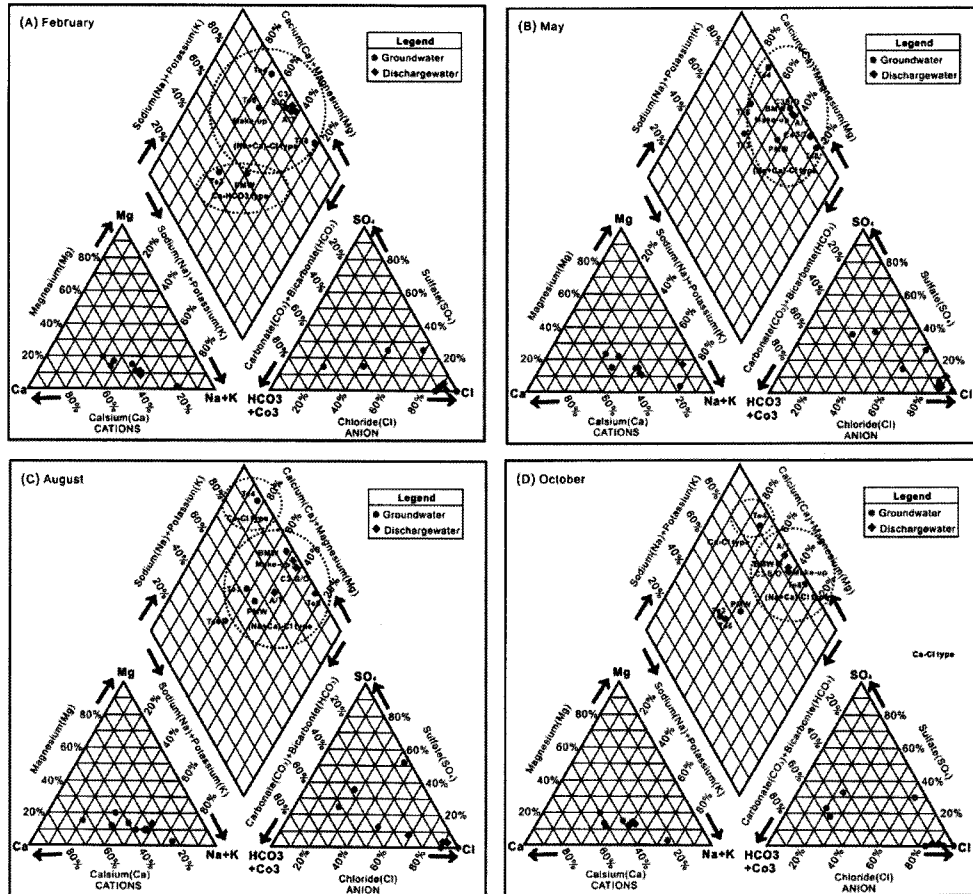


Fig. 7. Compositions of seepage water and groundwater in (a) February, (b) May, (c) August and (d) October of 2007.

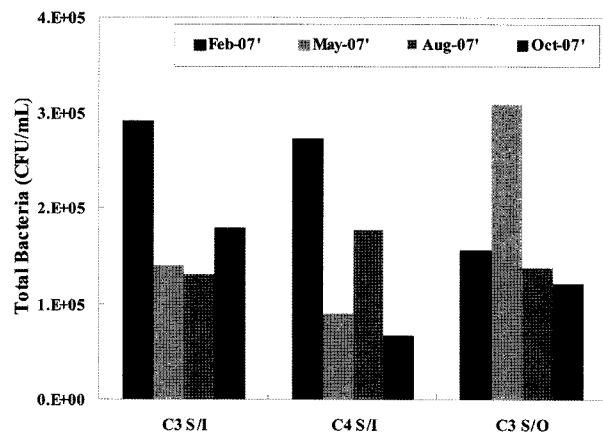


Fig. 8. Contents of total bacteria in seepage water.

타났지만, 지하수는 다양한 수질유형을 보였다. 지하수의 경우 소금적지장의 영향을 받는 것으로 판단되는 TE8과 BMW는 Na-Cl type으로, TE3, TE6, PMW는 (Ca+Na)-HCO<sub>3</sub> type으로 일반적인 지하수의 특성을 보였고, TE4는 Ca-Cl type으로 나타났다. 한편 총 4회의 수질분석에서

각 이온의 함량은 변화하였지만 수질유형의 큰 변화는 없었다. TE4와 TE8, A/T는 다른 지점에 비하여 주요 용존이온의 계절적 농도변화가 큰 것으로 나타났다.

3) 미생물 분석 결과 여수 저장공동의 유출수와 지하수는 호기성세균이 높게 검출되었다. 호기성세균의 수는 573~39,520 CFU/mL의 범위를 보였으며, TE4의 지하수는 호기성세균과 혐기성세균 모두 다른 지점에 비하여 높은 값을 보였다. 점액질세균의 수를 분석한 결과 C3 S/O는 145~456 CFU/mL의 범위로 계절적으로 감소하는 경향을 보인 반면, A/T와 Make-up에서는 점액질세균의 수가 10월에 급격한 증가를 보였다. 여수 저장공동의 미생물 분석결과 인천 해안저장공동에 비하여 호기성세균, 혐기성세균, 점액질세균 모두 비교적 높은 값으로 나타났다.

4) 본 연구에서 수리화학 및 미생물학적 특성을 분석한 결과 지하수와 유출수는 여수 저장공동의 운영에 있어서 큰 문제를 일으키는 요인이 없는 것으로 사료된다. 그러나 저장공동의 위치상 해수의 유입에 의한 철이나 스테인레스의 부식 혹은 미생물의 증식에 의한 암반의 클로킹

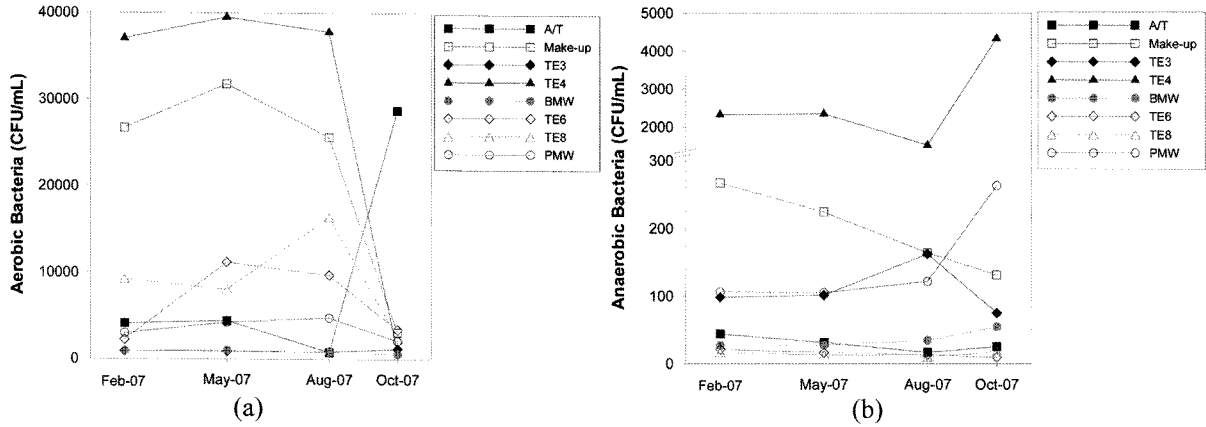


Fig. 9. Contents of (a) aerobic bacteria and (b) anaerobic bacterial.

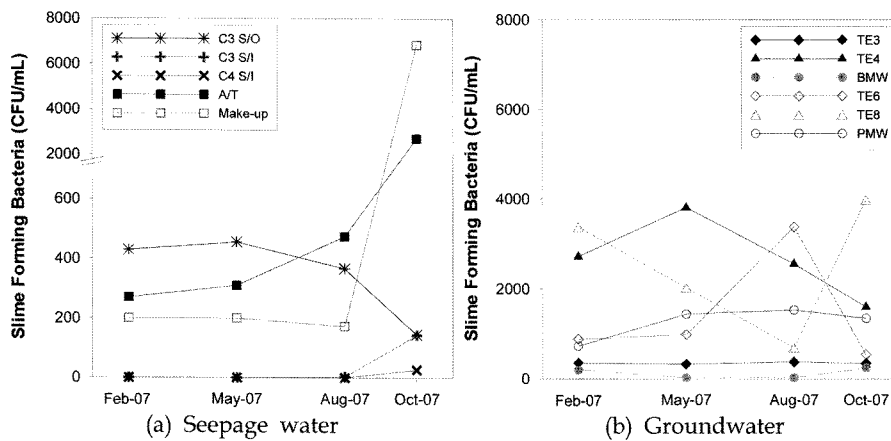


Fig. 10. Seasonal change of slime forming bacteria in (a) seepage water and (b) groundwater.

가능성을 배제할 수 없다. 그러므로 미생물 증식의 제어와 수리적 안정성을 유지하기 위해서는 지속적인 모니터링이 요구된다.

### 사 사

저자들은 현장조사에 도움을 준 지오그린21과 E1의 관련 직원들께 감사드립니다. 본 연구는 E1에 의해 지원되었으며 논문 준비에 도움을 준 지하수토양환경연구실의 김재웅에게 고마움을 전합니다. 또한 좋은 심사의견을 주신 익명의 심사위원들께 감사의 말씀을 드립니다.

### 참 고 문 헌

강태섭, 한일영, 1997, 지하 LPG 저장공동에서의 Clogging 추정을 위한 역해석 수치모형, 지하수환경, 4, 161-167.

고경석, 2000, LPG 저장 지역의 수리지구화학적 특성 및 지하수 흐름계에 대한 연구, 서울대학교 지구환경과학부 박사학위논문.

고경석, 김태희, 장호완, 이강근, 1998, LPG 지하저장시설의 지하수 시스템 분석: 수리지질·수리화학적 연구, 대한지하수환경학회, 한국토양환경학회 공동심포지움, 서울대학교, p. 131-133.

김태문, 1989, LPG 지하저장공동의 건설과 운영, 석유협회보, 11(105), 114-119.

남열우, 김성구, 나승훈, 2002, LPG 지하저장공동 Water Curtain System의 정량적 안정성 해석, 한국암반공학회춘계발표회 논문집, 3, p. 1-7.

이대혁, 한일영, 이정은, 정광필, 1998, 지하 LPG 저장공동 주변의 지하수위 강하 원인규명을 위한 파라미터추정, 대한지하수환경학회, 한국토양환경학회 공동심포지움, 서울대학교, p. 76-80.

이진수, 전효택, 이조운, 전계택, 제현국, 오세중, 이경주, 2005, 지하유류비축기지의 안정적 유지를 위한 수리지구화학적 및 미생물학적 특성 연구, 한국지구시스템공학회지, 42, 354-370.

이진용, 조병욱, 최미정, 임현수, 이강근, 2008, LPG 저장공동 주변의 지하수 유출평가, 대한자원환경지질학회, 대한지질공학회,

- 대한지질학회, 한국석유지질학회 공동학술대회, 코엑스, p. 82.
- 조성일, 김천수, 김경수, 송무영, 전한석, 2004, 지하공동굴착 시 수리지질조사 자료를 이용한 저장공동 심도의 지하수체계 특성 연구, *지질공학*, **14**, 93-104.
- 조윤주, 이진용, 최미정, 조병욱, 2009, 인천 해안공동 주변 지하수의 수질화학적 특성 연구, *지질공학(심사중)*.
- 정찬호, 2004, 지하원유비축기지 공동주변 지하수의 수질화학적 변화와 기밀성과의 관계, *지질공학*, **14**, 259-272.
- 최원규, 2005, 지하수질이 LPG 저장 공동의 수리지질학적 특성에 미치는 영향, *한국지구시스템공학회지*, **42**, 371-377.
- 한일영, 정일문, 유홍종, 2001, 확산능을 이용한 지하 LPG 저장 기지의 W/C 효율성 진단, *한국지하수토양환경학회 추계학술대회*, *전주대학교*, p. 31-34.
- Berest, P. and Brouard, B., 2003, Safety of salt caverns used for underground storage: blow out; mechanical instability; seepage; cavern abandonment, *Oil & Gas Sci. Technol.*, **58**, 361-384.
- Eric, A., Francois, C., and Anne, M., 2005, Groundwater management during the construction of underground hydrocarbon storage in rock caverns, *The 9th International Mine Water Congress*, p. 311-315.
- 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 J. Engin. Geol. & Hydrogeol.*, **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 liquefied petroleum gas cavern, *J. Hydrol.*, **360**, 195-206.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K.K., Lee, S.Y., and Lee, M.H., 2001, Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer, *J. Contam. Hydrol.*, **50**, 139-158.
- Lee, J.Y. and Song, S.H., 2007, Evaluation of groundwater quality in coastal areas: implications for sustainable agriculture, *Environ. Geol.*, **52**, 1231-1242.