

지하유류비축기지 수리안정성 평가를 위한 광물학적 클로깅 가능성 연구

A Study on the Geochemical Clogging for the Assessment of the Hydrological Safety of the Underground Oil Storage Carvern

김 건 영 (Geon Young Kim)^{1,*} · 배 대 석 (Dae Seok Bae)¹ ·
최 병 영 (Byeong Young Choi)¹ · 오 세 중 (Se-Joong Oh)² · 고 용 권 (Yong Kwon Koh)¹

¹한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구부
(Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-606, Korea)
²한국석유공사 석유비축처
(Korea Natinal Oil Corporation, Gyeonggi-do 431-711, Korea)

요약 : 지하유류비축기지의 수리안정성 평가를 위하여 비축기지 내 관측공을 포함한 공동 주변 지하수의 지화학분석을 수행하였으며, 그 결과를 근거로 광물학적 클로깅의 가능성을 평가하고, 아울러 미생물학적인 클로깅가능성을 함께 고려하여 보았다. 물시료들은 대부분 Ca-HCO₃에서 Ca-HCO₃-SO₄ 유형에 속하며 물시료의 유형에 따른 차이를 보이지 않는다. 주요 클로깅 유발광물인 방해석은 모든 관측공 및 공동운영수 시료에서 불포화상태로서 탄산염 광물에 대해 침전하지 않는 지화학 환경이다. Fe, Mn은 대부분 낮은 함량을 보이지만 포화지수계산결과에 의하면 대부분 철-산화/수산화 광물에 대해 포화-과포화 상태를 보여주며 높은 용존산소 농도를 보여주기 때문에 장기적으로는 이들에 의한 클로깅의 가능성을 지시한다. 일부 지상 관측공 물시료의 경우에는 철-산화/수산화 광물과 더불어 미세한 열극을 충전할 수 있는 점토광물에 대하여 높은 포화 지수를 보여주어 이들 광물의 침전에 의한 클로깅 가능성을 지시하고 있다. 통계분석 결과, 광물들의 침전/용해 정도는 주로 pH, Eh, DO에 의해 좌우된다. 미생물 분석결과는 대부분의 물시료에서 호기성 미생물과 점액성 세균이 우세하며 황환원 세균 등의 혐기성균은 대부분 아주 적거나 검출이 되지 않았다. 클로깅을 유발시키는 미생물로 알려져 있는 점액성 세균은 모든 시료에서 10⁵ CFUs/mL 이하의 값을 나타내고 있지만, 일부 관측공들에서 점액성세균이 우점하고 있기 때문에 장기적 관점에서는 이들이 클로깅의 원인으로 작용할 수 있으며 철 수산화/산화 광물의 침전가능성과 함께 고려하면 클로깅 가능성이 더욱 상승되는 효과를 가져올 수 있기 때문에 지하유류비축기지의 안정적인 운영을 위하여 클로깅 평가와 관련된 체계적이고 장기적인 프로그램이 필요하다.

주요어 : 클로깅, 지하유류비축기지, 포화지수, 미생물

ABSTRACT : Geochemical analysis of the various kinds of water including observation borehole groundwater was carried out for the assessment of the hydrological safety of the underground oil storage cavern and the potentiality of mineralogical and microbiological clogging was estimated. Most of water samples belonged to Ca-HCO₃ and Ca-HCO₃-SO₄ types. There was no distinct chemical difference in the various kinds of water. All kinds of water are undersaturated with the calcite which is the major clogging mineral. Most water samples have low Fe and Mn concentrations. However, they

*교신저자: kimgy@kaeri.re.kr

are saturated or oversaturated with the iron-oxide/hydroxide minerals and have high dissolved oxygen contents which suggests the possibility of clogging by the iron-oxide/hydroxide minerals as a long-term aspect. Several water samples from the ground observation borehole also show the high saturation indices for the clay minerals, which can fill up the fractures, indicating the possibility of clogging by the clay minerals. Statistical analysis shows the degree of mineral precipitation or dissolution is mainly controlled by pH, Eh and DO of water samples. According to the microbial analysis, the aerobic microbes and slime forming bacteria are dominant in most water samples and anaerobic microbes including sulfate reducing bacteria are very low or not detected. Although the slime forming bacteria which are known as a main microbial cause of the clogging is lower than 10^5 CFUs/mL in all water samples, because the slime forming bacteria are dominant microbe in several observation boreholes, the clogging can be caused by it as a long-term aspect. In addition, the possibility of clogging can be increased if the microbial effect is combined with the mineralogical effect such as iron oxide/hydroxide minerals for the possibility of clogging. Therefore, the systematic and long-term program for the assessment of clogging is required for the safe operation of underground oil storage cavern.

Key words : clogging, underground oil storage cavern, saturation index, microbe

서 언

일반적으로 지하유류비축시설의 유류저장 원리는 저장공동 주변 모든 지점에서 필요 유효수압 이상으로 지하수두를 형성시켜 공동 내 저장된 유류가 외부 자연환경으로 유출되지 않도록 하는 것이 기본 개념이다. 이와 같은 유류저장공동의 인위적인 기밀성 유지를 위하여 일반적으로 저장공동 주변에 수벽공(water curtain holes)을 설치하고, 암반 단열대를 주 유동경로로 하는 지하수 흐름방향을 공동 내부로 지속적으로 유지시키는 방법을 사용하고 있다(강태섭과 한일영, 1997). 따라서 지하유류비축시설의 안정성 확보를 위해서 저장공동의 안정적인 유지상태를 지속적으로 점검하여야 하며, 이 유지상태를 점검할 수 있는 중요한 도구가 바로 수벽공과 공동주변에 설치되어 있는 관측공이다. 따라서 수벽공과 관측공 지하수를 포함한 시설 내 운영수들의 정기적인 점검 및 관측 자료의 분석은 지하유류비축시설의 수리안정성을 평가할 수 있는 가장 중요한 수단이다. 특히 수벽공 시스템에서는 원활한 지하수의 흐름과 안정적인 수두를 유지하는 것이 필수적인데, 이를 저해하는 중요한 요인 중의 하나가 클로깅(clogging) 현상이다. 클로깅현상은 지하유류비축시설 운영동안 시설 내 수벽공 및 관측공에서 발생되어 각각 수벽공의 성능저하와 수벽시스템의 성능평가기능 저하를 가져오기 때문에, 저장공동 주변의 지하수문시스템의 안정성 진단에 있어서 클로깅의 가능성 평가는 시설

전체의 안전성평가에 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 국내외적으로 지하수 유동로에 따른 클로깅현상 규명과 이들의 생성 방지 혹은 이미 발생된 클로깅의 제거에 대한 연구는 LPG 저장공동에서의 수리지질학적 및 지화학적 연구와 미생물학적인 연구를 포함하여 다양한 접근방향으로 연구가 수행된 바 있으나(강태섭과 한일영, 1997; 정찬호, 2004; 최원규, 2005; Mustoe, 1981; Burdige and Kepkay, 1983; Hem and Lind, 1983; Urrutia and Beveridge, 1994; Kim *et al.*, 2000), 지하유류비축시설 운영동안 발생하는 문제 중 지하수유동로에서 생성되는 클로깅현상은 아직도 이해가 부족한 상황이며, 특히 이와 관련한 지화학적 및 광물학적 국내연구는 거의 없는 실정이다(정찬호, 2004; 최원규, 2005).

지하유류비축시설 내 수벽공의 효율적 운영과 안전성 확보를 위한 클로깅현상 평가를 위해서는 시설 내 다양한 유형의 운영수의 화학적, 물리적, 생물학적인 특성을 분석해야 하며 그 분석결과들은 클로깅을 방지하고, 혹은 이미 발생된 클로깅의 위치 및 규모를 결정하여 그 제거방법을 제시하기 위한 기본적이고도 필수적인 자료이다. 이와 관련하여 국내 ○○사는 자사가 운영하고 있는 지하 유류비축기지들에 대하여 안전성평가 운영프로그램을 운영하고 있으며, 이번 연구는 이 프로그램에 포함되어 지속적으로 수행되고 있는 장기 프로그램 중, ○○비축기지의 적절한 운영개선안 마련을 위한 수리안정성 진단평가연구의 일부로서, 공동의 장기적 성능유지를 위한 유지

Table 1. Samping location and description

| Sampling Location | Sample Name | |
|---|---|-----|
| Ground observation borehole of K-1 | KG2, KG4 (KG5, 2차) | GOB |
| Ground observation borehole of K-3 | KG7, KG8, KG9, KG10, KG11U, KG11L, KG12U, KG12L, KG13U, KG13L, KG14 | |
| Observation borehole in tunnel of K-1 | KH13, KH14, KH15, KH17, KH18, KH19, KH20 | OBT |
| Injection water for water curtain | IW | IW |
| Goundwater in K-3 tunnel | 3TGW | TW |
| Grondwaer in construction tunnel of K-2 and K-3 | 2CTW, 3CTW | |
| Upper part of grondwaer in construction tunnel of K-2 | 2CTWU | |
| Water collected from the seepage of caverns of K-1, K-2 and K-3 | 1SPW, 2SPW, 3SPW | SPW |
| Treated water from settling pond | TSW | TDW |
| Dicharge water | DW | |
| Recycling water | RCW | |
| Stream water from nearby vally | SW1, SW2, SW3, SW4 | SW |
| River water | HRW | |

관리 기본방향 수립을 위한 기초 지화학자료 확보 및 클로킹 가능성 평가를 위하여 수행되었다. 이를 위하여 비축기지 내 관측공을 포함한 공동 주변의 전반적인 지하수의 지화학분석을 수행하였으며, 그 결과를 근거로 광물학적 클로킹의 가능성을 점검하고, 지하수 화학과 광물학적 클로킹 평가와 관련된 통계분석을 수행하였고, 아울러 미생물학적인 클로킹 가능성을 함께 고려하여 보았다.

시료 및 분석

2007년 5월 2일부터 4일까지 비축기지 내 37개소에 대하여 1차 시료채취를 수행하였고, 이후 우기가 지나고 8월 13일부터 14일, 16일에 걸쳐 2차 시료채취를 수행하였다. 물시료의 채취장소는 1공동 지상 관측공(KG-2, KG-4, KG-5/2차), 3공동 지상 관측공(KG-7, KG-8, KG-9, KG-10, KG-11U, KG-11L, KG-12U, KG-12L, KG-13U, KG-13L, KG-14), 3공동 내 관측공(KH-13, KH-14, KH-15, KH-17, KH-18, KH-19, KH-20), 수벽공 주입수(상수도, IW), 3공동 수벽터널수(3TGW), 2,3공동 공사용 터널수(2CTW, 3CTW),

2공동 공사용 터널수 상부층(2CTWU), 1,2,3공동 삼출수(1SPW, 2SPW, 3SPW), 침전조(처리수조, TSW), 방류수조(DW), 재활용수 저장조(RCW), 기지 내 계곡지표수 4지점(SW1, SW2, SW3, SW4), 한강수(HRW), 강수(RW) 등 총 37개소이다(표 1).

모든 물시료의 채취는 무균채수병을 이용하였으며 각 채수 지점마다 총 4 L의 시료를 채수하였다. 채취한 물시료의 화학분석용 시료는 현장에서 0.45 µm 셀룰로스 질산염 막필터(cellulose nitrate membrane filter)로 여과하였다. 양이온분석용 시료는 고순도 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 알칼리도(Alkalinity) 등은 시료채취 후 현장에서 측정을 실시하였다. 물시료의 현장측정은 Orion사의 Multi-parameter (Model no. 1230)를 이용하였으며, pH probe (9107WP), combination redox electrode (9678BN), conductivity cell (013010), DO probe electrode (083010)의 전극을 사용하였다.

물시료에 대한 무기 양이온 성분 중 K, Fe 원소는 원자흡광분광분석기(Unicam model 989 Flame AAS and Flameless AAS)를 이용하여 분석하였

다. Na, Ca, Mg, Sr, Si 등의 주요원소와 Li, Mn, Al, Ba, Pb, Cu, Cr, Co, Zn, As, Cs 등의 미량원소는 각각 유도결합쌍 플라즈마 원자방출분광분석기(Shimadzu 모델 ICPS-1000 III, ICP-AES)와 유도결합쌍 플라즈마 질량분석기(Fison model PQ III, ICP-mass)로 분석하였다. 이상의 성분분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행하였다. HCO₃를 제외한 SO₄, Cl, NO₃, F, Br, PO₄ 등의 용존 음이온 성분분석은 한국원자력연구원의 이온크로마토그래피(Dionex 500)로 분석하였다. HCO₃ 함량은 현장에서 측정된 알칼리도와 pH를 이용하여 이를 환산하여 제시하였다.

미생물 분석은 호기성 미생물, 혐기성 미생물, 황환원세균, 점액성 미생물, 총세균에 대해서 우송대학교의 산학협력단에서 수행하였다. 호기성 미생물은 1회용 배지로 제작되어 시판되고 있는 페트리필름(Petrifilm, Aerobic Count Plate, 3M)을 사용하였고, 적당히 희석된 시료 1 mL를 필름지에 접종한 후 35°C에서 24~48시간 배양하여 필름에 나타난 균락의 개수를 측정하고, 희석 배율을 곱하여 미생물 수를 산정하였다. 점액성 미생물의 분석을 위해서는 평판계수법을 이용하였고, SP 배지에 증류수로 적당히 희석된 시료 0.1 mL를 접종한 후 25°C에서 5일간 배양하여 나타난 colony 수를 측정하였다. 혐기성 미생물의 측정방법도 평판계수법을 이용하는데, 혐기성환경의 세균배양기(anaerobic agar, Difco) 배지에 시료 1 mL를 pore plate 방법으로 접종한 후 25°C에서 5일간 혐기성용기(anaerobic jar) 내에서 배양시킨 후 나타난 colony 수를 측정하였다. 황환원세균수 측정방법도 평판계수법을 이용하였는데, 혐기성환경의 세균배양기에 sodium sulfate (5 g/L)와 ferrous sulfate (0.05 g/L)를 첨가하여 만든 배지에 시료 1 mL를 pour plate 방법으로 접종한 후 25°C에서 10일간 혐기성용기(anaerobic jar) 내에서 배양하여 나타난 흑색의 colony를 계수하여 측정하였다.

모든 물시료들에 대한 1, 2차 현장측정 및 화학분석 결과를 바탕으로 물리·화학적 환경에서 각종 용해된 광물(화합물)과 물과의 평형상태 및 포화상태를 알기 위하여 열역학적 모델링 프로그램인 PHREEQC (Parkhurst, 1995)를 이용하여 지구화학적 모델링을 수행하였다. 또한 다양한 운영수들의 지화학적 특성이 서로 구별되는지의 여부와, 어떤 수질 항목과 클로킹 평가와 관련된

광물들의 포화지수가 수질 특성을 결정하는지를 평가하고자 분산분석과 요인 분석을 수행하였다.

결과 및 토의

물시료의 물리·화학적 분석 결과

연구지역 내에서 두차례에 걸쳐서 채취한 다양한 유형의 물시료에 대한 현장측정결과 및 물리·화학적 분석결과를 표 2에 정리하였다.

연구지역 물시료들의 현장측정결과를 살펴보면 pH의 경우 1차 조사에서는 일부 지상관측공(KG-13L, 9.83), 공동 내 관측공(KH-16, 8.63), 3공동 공사용 터널수(3CTW, 8.17)를 제외하고는 모두 약산성 내지 중성 범위의 값을 보인다. 하지만 2차 조사에서 3CTW가 8.47로 1차와 유사한 pH 값을 보여주는 반면 KG-13L은 6.97로 매우 큰 변화를 보여주고 있다. KG-13L 관측공은 장기 모니터링 과정중에 수위강하현상이 관찰된 관측공으로서 1차 조사의 경우 채수된 시료들 중 가장 높은 pH 값을 보인다(표 2, 그림 1). 일반적으로 이처럼 높은 pH 값은 주변 시설물에서 기인한 시멘트 물질과의 반응에 의해서 가능하며, 자연적으로는 매우 오랜 기간의 물-암석 반응을 겪은 심부지하수에서 나타나는 현상이다. 시멘트나 숏크리트와의 반응에 의한 결과라면 시멘트의 주성분인 Ca나 SO₄ 등의 이온함량이 함께 높아져야 하고 높은 pH가 유지되어야 하지만 그러한 경향이 관찰되지 않는다. 또한 오랜 기간의 물-암석 반응에 의한 심부지하수의 영향이라면 물-암석 반응에 의하여 용존이온의 함량이 높아져서 EC 값이 높아져야 하나 KG-13L 분석값은 pH와 EC 간의 비례적인 상관관계를 보이지 않고 있어서(그림 1) 일시적인 주변 환경변화에 의한 이상치로 볼 수 있다. 그러나 기존 자료에 의하면 EC-온도 검층 자료에서 KG-13L 하부에 높은 EC값을 보이는 구간이 존재하는 것으로 보아 지수 그라우팅에 의한 영향이 나타나는 가능성을 배제할 수 없기 때문에 보다 장기적인 관측이 필요하다.

산화-환원전위(Eh) 값을 살펴보면, 1차의 경우 지상관측공의 시료들이 다른 공내 관측공이나 기타 기지 내 공동 운영수들에 비해 명확히 낮은 값을 보이고 있다. 하지만 2차의 경우 지상관측공의 Eh 값들은 다른 시료들과 유사한 범위의 값을 보여주고 있으며 1차보다 높은 값을 나타내

Table 2. Physico-chemical parameters of the various types of water samples (1st sampling)

| Sample no. | Sampling Date | Temp. (°C) | pH | Eh (mV) | FC (μS/cm) | DO (mg/L) | TDS (mg/L) | Turb. (NTU) | Concentration (mg/L) | | | | | | | | | | Concentrations (μg/L) | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------------|------------|------|---------|------------|-----------|------------|-------------|----------------------|------|------|------|------------------|------|-----------------|-----------------|------|------------------|-----------------------|-----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|-------|
| | | | | | | | | | Na | K | Ca | Mg | SiO ₂ | Cl | SO ₄ | NO ₃ | F | HCO ₃ | CO ₃ | Al | Fe | Mn | Cu | Zn | Sr | Li | Ni | As | Pb | |
| GOB | KG2 | 07-5-3 | 14.1 | 5.6 | 126 | 50.0 | 6.8 | 53.4 | 2.5 | 4.0 | 0.4 | 4.8 | 1.2 | 13.5 | 3.2 | 7.0 | 11.3 | 0.4 | 7.6 | 0.0 | 24.7 | 2.0 | 4.3 | 6.6 | 31.4 | 35.8 | 1.0 | 1.1 | <0.5 | 0.3 |
| | KG4 | 07-5-3 | 14.5 | 5.7 | 169 | 60.0 | 2.9 | 74.2 | 759.3 | 3.6 | 0.4 | 5.9 | 0.8 | 15.4 | 2.6 | 22.6 | 0.4 | 1.2 | 21.4 | 0.0 | 201.2 | 5140 | 3354 | 15.7 | 23.0 | 14.9 | 3.5 | 10.8 | 5.3 | 1.7 |
| | KG7 | 07-5-3 | 18.3 | 5.8 | 24.4 | 90.0 | 3.3 | 108.8 | 3.7 | 9.0 | 0.9 | 8.8 | 1.3 | 28.6 | 1.6 | 10.8 | 7.2 | 0.9 | 39.7 | 0.0 | 35.4 | 2.0 | 7.0 | 149.7 | 948.1 | 27.0 | 9.6 | 4.8 | <0.5 | 4.6 |
| | KG8 | 07-5-3 | 22.8 | 6.4 | -89.2 | 80.0 | 3.1 | 97.4 | 51.7 | 7.2 | 0.8 | 9.5 | 0.9 | 30.8 | 1.6 | 9.6 | 0.2 | 1.8 | 35.1 | 0.0 | 88.9 | 166.3 | 199.3 | 9.0 | 323.6 | 67.2 | 8.0 | 2.2 | 0.8 | 1.3 |
| | KG9 | 07-5-3 | 17.8 | 6.3 | -15.0 | 30.0 | 4.2 | 38.0 | 0.6 | 1.0 | 0.4 | 5.9 | 0.3 | 5.4 | 0.7 | 6.5 | 0.0 | 1.0 | 16.8 | 0.0 | 52.4 | 14.6 | 25.1 | 67.1 | 673.5 | 20.2 | 2.3 | 3.9 | <0.5 | 13.0 |
| | KG10 | 07-5-3 | 15.6 | 6.0 | -11.2 | 100.0 | 3.8 | 105.9 | 9.8 | 6.5 | 2.1 | 8.6 | 1.2 | 22.2 | 3.1 | 12.7 | 5.2 | 1.5 | 42.7 | 0.0 | 216.3 | 26.7 | 66.3 | 789.7 | 8625.0 | 24.3 | 8.0 | 68.0 | <0.5 | 2.9 |
| | KG11L | 07-5-3 | 17.1 | 7.4 | -121 | 170.0 | 4.9 | 190.1 | 4.7 | 14.8 | 1.5 | 21.6 | 2.2 | 34.7 | 5.0 | 24.1 | 0.3 | 3.4 | 82.4 | 0.0 | 58.7 | 45.3 | 10.0 | 72.0 | 604.7 | 36.9 | 111.1 | 5.8 | 4.1 | 2.9 |
| | KG11U | 07-5-3 | 16.2 | 7.5 | -135 | 180.0 | 4.7 | 177.7 | 3.1 | 7.9 | 9.4 | 24.8 | 1.2 | 16.4 | 3.6 | 10.7 | 19.6 | 1.7 | 82.4 | 0.0 | 47.1 | 26.2 | 6.8 | 29.6 | 79.3 | 66.1 | 14.0 | 1.8 | 17.3 | 2.5 |
| | KG12L | 07-5-3 | 17.2 | 6.1 | 6.97 | 150.0 | 6.0 | 146.1 | 205.0 | 13.8 | 1.5 | 14.8 | 2.0 | 30.0 | 3.2 | 34.3 | 8.1 | 3.3 | 35.1 | 0.0 | 35.4 | 2.0 | 41.2 | 43.2 | 439.5 | 47.6 | 29.4 | 6.0 | 2.1 | 2.0 |
| | KG12U | 07-5-3 | 15.6 | 6.7 | -79.4 | 70.0 | 4.9 | 49.6 | 0.8 | 2.9 | 1.0 | 5.0 | 0.6 | 7.7 | 2.2 | 6.2 | 4.4 | 1.4 | 18.3 | 0.0 | 11.8 | 2.0 | 79.3 | 266.4 | 3495.0 | 22.4 | 1.2 | 36.7 | <0.5 | 49.4 |
| | KG13L | 07-5-3 | 17.1 | 9.8 | -82.4 | 110.0 | 6.4 | 112.5 | 22.0 | 7.1 | 1.6 | 18.2 | 0.1 | 39.8 | 3.4 | 10.2 | 4.9 | 1.7 | 24.4 | 1.3 | 211.0 | 6.1 | 3.3 | 17.5 | 8.0 | 36.0 | 7.8 | 1.8 | 2.0 | 0.9 |
| | KG13U | 07-5-3 | 14.5 | 6.2 | -56.2 | 50.0 | 4.4 | 66.8 | 4.2 | 3.8 | 0.9 | 7.6 | 1.2 | 13.9 | 2.7 | 6.7 | 12.6 | 0.7 | 16.8 | 0.0 | 39.4 | 268.1 | 36.0 | 177.4 | 1184.0 | 24.0 | 4.3 | 17.1 | <0.5 | 24.0 |
| | KG14 | 07-5-3 | 16.3 | 6.7 | -73.4 | 90.0 | 5.2 | 121.3 | 1.3 | 8.4 | 1.8 | 13.4 | 1.3 | 29.0 | 3.4 | 15.8 | 7.9 | 2.1 | 38.1 | 0.0 | 8.1 | 2.0 | 2.1 | 42.9 | 632.3 | 43.3 | 12.0 | 3.8 | 9.2 | 5.3 |
| OBT | KH13 | 07-5-3 | 14.3 | 6.8 | 278 | 181.4 | 7.8 | 143.9 | 0.3 | 18.0 | 2.7 | 15.5 | 2.1 | 11.0 | 29.7 | 16.2 | 7.2 | 1.9 | 39.7 | 0.0 | 98.1 | 9.1 | 2.3 | 7.2 | 12.9 | 86.9 | 23.9 | 1.8 | 29.5 | 0.3 |
| | KH14 | 07-5-3 | 14.5 | 7.0 | 605 | 204.2 | 7.9 | 166.3 | 1.4 | 16.8 | 2.8 | 20.8 | 2.5 | 7.7 | 29.9 | 15.4 | 8.0 | 1.4 | 61.0 | 0.0 | 47.6 | 2.0 | 0.4 | 2.6 | 7.8 | 82.7 | 8.2 | 1.4 | 4.3 | 0.2 |
| | KH15 | 07-5-3 | 14.1 | 6.7 | 592 | 209.6 | 8.0 | 174.5 | 0.7 | 17.2 | 2.3 | 23.7 | 2.4 | 12.1 | 28.7 | 14.3 | 7.7 | 0.7 | 65.6 | 0.0 | 44.7 | 2.0 | 0.6 | 4.1 | 23.7 | 59.8 | 16.3 | 0.8 | 3.3 | 0.2 |
| | KH16 | 07-5-3 | 15.1 | 8.6 | 326 | 157.1 | 7.0 | 135.8 | 136.3 | 12.9 | 2.4 | 12.0 | 1.0 | 40.5 | 1.8 | 16.1 | 2.4 | 3.9 | 42.7 | 0.2 | 329.6 | 223.8 | 5.5 | 11.5 | 20.1 | 35.0 | 43.1 | 1.4 | 55.5 | 0.9 |
| | KH17 | 07-5-3 | 14.6 | 7.5 | 299 | 98.3 | 8.2 | 120.6 | 0.3 | 10.8 | 0.6 | 8.3 | 0.8 | 46.4 | 1.7 | 9.7 | 5.4 | 3.2 | 33.6 | 0.0 | 5.8 | 2.0 | 1.0 | 0.6 | 4.0 | 11.9 | 45.3 | 0.4 | 15.0 | <0.10 |
| | KH18 | 07-5-3 | 14.4 | 6.3 | 306 | 95.3 | 7.6 | 115.4 | 0.4 | 10.8 | 0.6 | 7.9 | 1.1 | 46.5 | 1.7 | 9.8 | 3.2 | 3.4 | 30.5 | 0.0 | 61.1 | 62.7 | 22.0 | 3.6 | 10.2 | 14.9 | 43.5 | 0.5 | 13.6 | 0.7 |
| | KH19 | 07-5-3 | 13.6 | 6.5 | 283 | 105.9 | 8.8 | 131.3 | 0.6 | 10.4 | 0.8 | 11.4 | 1.8 | 43.2 | 1.5 | 12.1 | 4.2 | 3.2 | 42.7 | 0.0 | 15.4 | 33.6 | 2.1 | 7.9 | 5.5 | 24.8 | 41.3 | 2.2 | 1.5 | 0.5 |
| | KH20 | 07-5-3 | 13.8 | 6.3 | 335 | 92.5 | 7.4 | 109.1 | 0.4 | 9.7 | 0.6 | 7.5 | 1.1 | 41.3 | 1.3 | 10.7 | 3.4 | 3.1 | 30.5 | 0.0 | 20.6 | 20.7 | 1.9 | 4.8 | 5.2 | 16.0 | 33.0 | 1.8 | 0.8 | 0.2 |
| IW | IW | 07-5-3 | 14.8 | 6.6 | 431 | 163.5 | 9.0 | 126.9 | 2.2 | 8.3 | 2.3 | 19.2 | 3.7 | 2.1 | 14.5 | 13.4 | 4.8 | 0.5 | 58.0 | 0.0 | 43.1 | 2.0 | 1.2 | 6.3 | 29.5 | 86.4 | 0.8 | 0.7 | <0.5 | 0.1 |
| IW | 3TGW | 07-5-3 | 13.4 | 7.1 | 642 | 213.1 | 7.6 | 149.3 | 0.7 | 18.4 | 5.1 | 20.1 | 2.2 | 14.7 | 23.8 | 20.1 | 7.1 | 1.1 | 36.6 | 0.0 | 36.4 | 2.0 | 5.4 | 8.3 | 10.8 | 101.1 | 14.3 | 0.9 | 6.0 | 1.7 |
| | 2CTW | 07-5-3 | 15.1 | 6.9 | 327 | 158.7 | 7.4 | 158.4 | 1.4 | 12.6 | 2.4 | 19.0 | 1.6 | 24.2 | 9.0 | 13.7 | 3.3 | 2.3 | 70.2 | 0.0 | 17.2 | 41.7 | 6.9 | 10.4 | 23.5 | 47.4 | 25.0 | 1.3 | 14.4 | 1.0 |
| | 3CTW | 07-5-3 | 14.3 | 8.2 | 266 | 230.8 | 7.4 | 217.7 | 1.0 | 32.1 | 16.3 | 8.9 | 0.4 | 30.5 | 10.3 | 35.8 | 8.5 | 1.8 | 73.2 | 0.0 | 28.3 | 12.2 | 0.6 | 5.0 | 10.1 | 65.6 | 24.4 | 0.5 | 22.2 | 0.5 |
| | 2CTW ^U | 07-5-3 | 15.1 | 6.5 | 228 | 168.7 | 6.0 | 160.4 | 3.1 | 13.3 | 2.3 | 20.4 | 1.7 | 24.2 | 9.3 | 13.6 | 0.3 | 2.3 | 73.2 | 0.0 | 15.4 | 2.6 | 2.6 | 2.4 | 13.7 | 61.8 | 25.5 | 1.2 | 14.2 | 0.2 |
| SPW | 1SPW | 07-5-3 | 15.5 | 6.9 | 250 | 241.5 | 5.1 | 244.6 | 3.6 | 16.9 | 4.3 | 33.5 | 1.3 | 24.6 | 11.4 | 15.6 | 0.1 | 2.7 | 134.2 | 0.0 | 5.7 | 10.9 | 159.2 | 9.4 | 7.4 | 88.0 | 37.3 | 3.5 | 5.4 | 0.2 |
| | 2SPW | 07-5-3 | 14.1 | 6.8 | 251 | 244.4 | 6.1 | 235.7 | 0.6 | 16.5 | 4.2 | 32.2 | 1.3 | 26.1 | 11.1 | 7.4 | 0.0 | 2.7 | 134.2 | 0.0 | 6.1 | 28.6 | 156.0 | 7.8 | 4.2 | 88.5 | 37.3 | 1.9 | 7.8 | 1.0 |
| | 3SPW | 07-5-3 | 17.6 | 6.9 | 277 | 265.4 | 8.1 | 238.7 | 0.6 | 19.0 | 4.3 | 30.9 | 1.9 | 25.5 | 15.8 | 14.0 | 0.0 | 2.2 | 125.1 | 0.0 | 19.6 | 194 | 13.1 | 2.5 | 19.1 | 90.4 | 40.3 | 0.9 | 9.2 | 0.6 |
| TDW | TSW | 07-5-3 | 16.9 | 7.1 | 372 | 250.8 | 8.4 | 204.4 | 0.6 | 17.2 | 3.9 | 29.7 | 1.6 | 27.0 | 12.3 | 12.5 | 0.1 | 2.6 | 97.6 | 0.0 | 6.2 | 65.1 | 0.2 | 3.6 | 6.2 | 83.2 | 42.3 | 1.0 | 10.7 | 0.7 |
| | DW | 07-5-3 | 17.4 | 7.2 | 380 | 228.5 | 8.5 | 227.8 | 0.5 | 17.6 | 4.0 | 30.7 | 1.6 | 27.4 | 12.4 | 12.6 | 0.1 | 2.5 | 119.0 | 0.0 | 12.5 | 40.7 | 0.3 | 4.1 | 2.8 | 82.0 | 40.5 | 1.3 | 10.1 | 0.3 |
| | RCW | 07-5-3 | 14.3 | 6.6 | 438 | 104.4 | 7.6 | 96.7 | 1.7 | 5.3 | 1.7 | 12.4 | 1.9 | 16.0 | 4.4 | 10.8 | 9.9 | 0.9 | 33.6 | 0.0 | 19.1 | 2.0 | 1.4 | 2.5 | 13.6 | 59.9 | 1.8 | 0.7 | 2.5 | 0.3 |
| SW | SW1 | 07-5-3 | 17.0 | 5.5 | 19.4 | 50.0 | 4.2 | 52.3 | 0.6 | 2.9 | 0.6 | 5.8 | 1.3 | 9.5 | 3.0 | 6.0 | 16.1 | 1.2 | 6.1 | 0.0 | 266 | 182 | 37.8 | 4.0 | 29.2 | 26.7 | 0.8 | 1.1 | <0.5 | 0.7 |
| | SW2 | 07-5-3 | 17.3 | 4.7 | 309 | 75.5 | 7.6 | 72.4 | 0.3 | 3.5 | 0.6 | 12.9 | 1.6 | 9.6 | 4.8 | 8.4 | 14.4 | 1.4 | 15.3 | 0.0 | 788 | 11.2 | 137.7 | 5.9 | 64.4 | 31.7 | 1.7 | 2.7 | <0.5 | 0.9 |
| | SW3 | 07-5-3 | 18.0 | 5.1 | 299 | 58.6 | 7.1 | 49.8 | 0.6 | 3.6 | 0.5 | 4.0 | 1.3 | 13.0 | 3.1 | 9.3 | 9.9 | 0.5 | 4.6 | 0.0 | 271 | 2.0 | 5.9 | 1.8 | 22.5 | 23.9 | 0.7 | 1.0 | <0.5 | 0.2 |
| | SW4 | 07-5-3 | 13.0 | 7.2 | -10.0 | 40.0 | 5.5 | 51.9 | 0.6 | 4.0 | 0.5 | 5.1 | 1.3 | 13.4 | 3.0 | 7.8 | 10.4 | 0.4 | 6.1 | 0.0 | 226 | 66.9 | 33.8 | 3.9 | 20.0 | 26.8 | 0.5 | 0.7 | <0.5 | 0.3 |
| | HRW | 07-5-3 | 15.5 | 7.7 | -139 | 180.0 | 4.4 | 129.8 | 3.3 | 9.1 | 2.4 | 20.6 | 4.2 | 1.4 | 10.8 | 16.1 | 3.7 | 0.5 | 61.0 | 0.0 | 12.4 | 74.9 | 21.5 | 9.6 | 9.3 | 95.0 | 0.4 | 1.3 | 0.7 | 0.4 |

Table 2. Continued (2nd sampling)

| Sample no. | Sampling Date | Temp. (C) | pH | Eh (mV) | EC (µS/cm) | DO (mg/L) | TDS (mg/L) | Turb. (NTU) | Concentration (mg/L) | | | | | | | | | | Concentrations(µg/L) | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|-----------|------|---------|------------|-----------|------------|-------------|----------------------|------|------|------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|------|------|------|------|------|
| | | | | | | | | | Na | K | Ca | Mg | SiO ₂ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | F ⁻ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ²⁻ | Al | Fe | Mn | Cu | Zn | Sr | Lj | Ni | As | Pb | |
| GOB | KG2 | 07-8-14 | 21.1 | 6.0 | 75.3 | 56.3 | 5.10 | 51.6 | 4.5 | 3.7 | 0.5 | 4.4 | 1.1 | 14.6 | 2.2 | 7.6 | 7.9 | 0.4 | 9.2 | 0.0 | 10.5 | 21.0 | 6.8 | 5.1 | 14.5 | 0.03 | 0.9 | 0.7 | <0.5 | 1.2 |
| | KG5 | 07-8-14 | 23.1 | 5.4 | 95.6 | 52.3 | 6.40 | 54.0 | 5.2 | 2.3 | 0.6 | 5.0 | 0.8 | 12.7 | 1.7 | 8.6 | 7.6 | 1.0 | 13.7 | 0.0 | 322.3 | 33.2 | 43.6 | 20.1 | 204.6 | 0.02 | 3.1 | 1.5 | <0.5 | 2.8 |
| | KG7 | 07-8-14 | 25.3 | 6.0 | 85.6 | 101 | 5.16 | 120.2 | 1.8 | 9.5 | 1.0 | 9.4 | 1.3 | 29.2 | 1.7 | 10.5 | 7.2 | 1.6 | 48.8 | 0.0 | 44.2 | 5.3 | 3.3 | 156.3 | 827.2 | 0.03 | 9.4 | 3.8 | <0.5 | 2.1 |
| | KG8 | 07-8-14 | 26.0 | 6.4 | 75.8 | 86.2 | 8.70 | 105.7 | 10.1 | 7.5 | 0.8 | 10.1 | 0.8 | 30.9 | 2.0 | 9.3 | 0.6 | 2.6 | 41.2 | 0.0 | 10.7 | 7.0 | 1.2 | 17.6 | 185.7 | 0.07 | 7.7 | 1.8 | <0.5 | 2.3 |
| | KG9 | 07-8-14 | 27.0 | 6.2 | 83.9 | 54.4 | 5.27 | 49.6 | 16.4 | 1.6 | 0.7 | 7.7 | 0.4 | 6.5 | 1.2 | 6.2 | 5.0 | 0.5 | 19.8 | 0.0 | 32.6 | 13.1 | 9.3 | 36.0 | 363.7 | 0.03 | 2.4 | 3.1 | <0.5 | 2.6 |
| | KG10 | 07-8-14 | 22.6 | 6.6 | 95.4 | 99.1 | 10.4 | 105.7 | 15.6 | 6.2 | 1.4 | 9.1 | 1.2 | 20.3 | 3.1 | 11.0 | 6.7 | 2.5 | 44.2 | 0.0 | 111.3 | 68.5 | 46.9 | 523.8 | 5953.0 | 0.03 | 6.4 | 35.8 | <0.5 | 3.4 |
| | KG11L | 07-8-14 | 27.0 | 7.4 | 44.9 | 181 | 7.49 | 191.0 | 21.5 | 15.8 | 1.9 | 22.1 | 2.0 | 34.7 | 3.9 | 21.5 | 1.2 | 4.0 | 83.9 | 0.0 | 9.0 | 6.2 | 905.5 | 53.1 | 121.2 | 0.04 | 81.6 | 4.0 | 6.0 | 3.0 |
| | KG11U | 07-8-14 | 27.0 | 7.5 | 34.9 | 152 | 10.7 | 148.7 | 1.7 | 4.5 | 6.3 | 23.8 | 0.7 | 12.0 | 2.3 | 10.4 | 6.9 | 2.5 | 79.3 | 0.0 | 17.9 | 4.5 | 8.2 | 53.5 | 111.1 | 0.06 | 4.1 | 6.2 | 3.5 | 13.6 |
| | KG12L | 07-8-14 | 27.0 | 6.7 | 42.5 | 179 | 3.50 | 166.5 | 810.0 | 17.0 | 2.0 | 17.6 | 2.4 | 35.4 | 5.1 | 42.4 | 1.7 | 3.2 | 39.7 | 0.0 | 4503 | 5922 | 1680 | 363.6 | 518.3 | 0.06 | 32.3 | 22.8 | 52.4 | 7.1 |
| | KG12U | 07-8-14 | 27.0 | 6.4 | 67.5 | 80.5 | 4.89 | 68.7 | 10.4 | 4.5 | 1.0 | 7.2 | 1.1 | 12.9 | 2.2 | 7.4 | 10.6 | 0.5 | 21.4 | 0.0 | 18.3 | 69.8 | 1067 | 90.4 | 730.2 | 0.03 | 1.3 | 5.8 | 1.0 | 2.8 |
| | KG13L | 07-8-14 | 27.0 | 7.0 | 31.6 | 149 | 10.4 | 120.7 | 23.7 | 8.2 | 1.5 | 23.1 | 0.3 | 35.0 | 4.7 | 11.0 | 1.4 | 2.0 | 33.6 | 0.0 | 28.6 | 144.7 | 14.2 | 83.4 | 128.7 | 0.04 | 6.1 | 7.1 | 1.8 | 3.3 |
| | KG13U | 07-8-14 | 25.0 | 5.4 | 34.4 | 112 | 7.05 | 95.1 | 11.0 | 4.2 | 0.8 | 6.3 | 1.0 | 15.1 | 10.9 | 8.4 | 7.9 | 0.7 | 39.7 | 0.0 | 338.5 | 62.6 | 31.8 | 219.0 | 509.9 | 0.02 | 4.0 | 16.6 | <0.5 | 2.3 |
| | KG14 | 07-8-14 | 27.0 | 7.0 | 40.1 | 121 | 4.64 | 128.3 | 118.2 | 8.8 | 1.5 | 13.6 | 1.4 | 30.0 | 3.3 | 15.5 | 7.1 | 2.9 | 44.2 | 0.0 | 8.6 | 24.9 | 0.9 | 4.8 | 13.5 | 0.05 | 14.1 | 1.1 | 8.0 | 2.1 |
| OBT | KH13 | 07-8-14 | 21.3 | 9.5 | -14.4 | 175 | 7.45 | 161.4 | 1.7 | 18.7 | 3.2 | 13.1 | 0.7 | 10.9 | 30.1 | 19.6 | 6.5 | 2.0 | 38.1 | 18.3 | 4.8 | 25.1 | 1.4 | 2.5 | 4.6 | 0.10 | 26.0 | 0.4 | 19.5 | 6.0 |
| | KH14 | 07-8-14 | 21.5 | 8.9 | 397 | 181 | 10.3 | 159.9 | 1.2 | 16.5 | 1.5 | 14.6 | 1.8 | 8.4 | 28.9 | 14.6 | 7.5 | 1.9 | 58.0 | 6.1 | 124.9 | 17.1 | 0.7 | 7.7 | 5.7 | 0.06 | 6.7 | 0.8 | 14.1 | 2.7 |
| | KH15 | 07-8-14 | 21.1 | 7.7 | 54.4 | 221 | 6.77 | 177.5 | 0.6 | 16.3 | 2.2 | 23.2 | 2.4 | 10.4 | 29.3 | 14.1 | 7.7 | 1.7 | 70.2 | 0.0 | 309.9 | 86.0 | 306.0 | 18.9 | 60.3 | 0.06 | 13.9 | 2.6 | 2.2 | 1.8 |
| | KH17 | 07-8-14 | 21.6 | 7.2 | 181 | 97.3 | 6.01 | 127.1 | 1.9 | 10.8 | 0.7 | 8.5 | 0.8 | 44.2 | 1.7 | 9.8 | 5.3 | 4.0 | 41.2 | 0.0 | 7.7 | 27.5 | 2.1 | 11.8 | 9.5 | 0.01 | 41.2 | 0.6 | 11.4 | 1.0 |
| | KH18 | 07-8-14 | 21.4 | 7.1 | 82.2 | 94.8 | 6.35 | 117.8 | 1.3 | 10.7 | 0.7 | 7.8 | 1.1 | 42.8 | 2.0 | 10.1 | 4.5 | 4.5 | 33.6 | 0.0 | 5.0 | 12.1 | 1.0 | 1.9 | 6.4 | 0.02 | 39.2 | 2.6 | 9.7 | 0.6 |
| | KH19 | 07-8-14 | 20.6 | 7.5 | 49.3 | 115 | 4.99 | 120.0 | 0.9 | 10.2 | 0.9 | 11.7 | 1.7 | 40.3 | 2.0 | 11.6 | 2.3 | 4.4 | 35.1 | 0.0 | 6.2 | 35.9 | 2.5 | 5.1 | 4.9 | 0.02 | 38.6 | 2.1 | 1.0 | 1.0 |
| | KH20 | 07-8-14 | 20.8 | 6.8 | 69.4 | 107 | 4.59 | 124.5 | 1.1 | 9.5 | 0.8 | 8.8 | 1.2 | 36.7 | 1.9 | 13.8 | 1.9 | 4.1 | 45.8 | 0.0 | 22.3 | 45.2 | 15.6 | 3.5 | 12.4 | 0.02 | 40.6 | 17.0 | 0.6 | 0.8 |
| IW | IW | 07-8-14 | 21.8 | 7.2 | 33.6 | 137 | 9.73 | 89.6 | 1.1 | 4.5 | 1.7 | 15.9 | 2.8 | 8.8 | 10.7 | 9.6 | 7.9 | 0.2 | 27.5 | 0.0 | 18.7 | 15.5 | 2.8 | 3.4 | 5.1 | 0.07 | 0.3 | 0.6 | <0.5 | 1.4 |
| TW | 3TGW | 07-8-14 | 20.4 | 8.1 | 20.0 | 209 | 8.96 | 186.2 | 3.4 | 18.5 | 6.4 | 19.3 | 1.8 | 18.6 | 20.7 | 21.5 | 5.6 | 2.2 | 71.7 | 0.0 | 28.7 | 8.8 | 2.3 | 13.8 | 4.2 | 0.10 | 17.2 | 0.6 | 6.3 | 8.9 |
| | 2CTW | 07-8-14 | 22.1 | 7.3 | 30.4 | 166 | 9.76 | 163.0 | 1.2 | 32.2 | 16.9 | 8.9 | 0.4 | 29.6 | 12.3 | 13.1 | 3.9 | 2.8 | 38.1 | 4.6 | 16.1 | 44.1 | 0.5 | 3.5 | 13.8 | 0.07 | 19.2 | 0.5 | 9.0 | 4.2 |
| | 3CTW | 07-8-14 | 21.3 | 8.7 | -4.5 | 228 | 10.4 | 214.8 | 1.1 | 19.6 | 4.4 | 32.3 | 2.0 | 31.5 | 10.6 | 35.1 | 8.2 | 2.6 | 68.6 | 0.0 | 23.2 | 351.9 | 0.9 | 2.9 | 6.2 | 0.09 | 23.6 | 0.3 | 17.3 | 21.4 |
| | 2CTWU | 07-8-14 | 22.1 | 6.6 | -15.6 | 166 | 7.23 | 133.5 | 1.4 | 12.0 | 4.2 | 17.7 | 2.5 | 9.3 | 16.0 | 12.0 | 1.5 | 0.5 | 58.0 | 0.0 | 12.4 | 53.7 | 6.5 | 7.3 | 21.6 | 0.12 | 2.4 | 1.4 | 1.4 | 5.1 |
| SPW | 1SPW | 07-8-14 | 22.5 | 6.9 | 8.3 | 237 | 10.3 | 178.0 | 1.7 | 17.6 | 4.3 | 33.0 | 1.2 | 27.1 | 12.3 | 8.8 | 0.0 | 3.5 | 70.2 | 0.0 | 24.2 | 43.8 | 100.8 | 1.1 | 79.9 | 0.09 | 37.2 | 0.7 | 32.2 | 9.8 |
| | 2SPW | 07-8-14 | 21.1 | 6.9 | 2.1 | 236 | 3.69 | 237.4 | 1.4 | 17.4 | 4.3 | 33.3 | 1.2 | 26.9 | 12.1 | 8.9 | 0.1 | 3.5 | 129.7 | 0.0 | 31.0 | 105.7 | 91.4 | 1.2 | 28.7 | 0.09 | 36.7 | 0.7 | 28.3 | 9.7 |
| | 3SPW | 07-8-14 | 24.6 | 7.0 | 20.9 | 247 | 8.02 | 217.3 | 2.0 | 13.4 | 2.9 | 17.9 | 1.7 | 20.9 | 16.1 | 14.7 | 0.0 | 3.0 | 126.6 | 0.0 | 140.3 | 8.8 | 149.3 | 18.6 | 8139.0 | 0.05 | 37.7 | 3.4 | 5.1 | 7.2 |
| TDW | TSW | 07-8-14 | 23.9 | 7.5 | 13.7 | 228 | 9.11 | 219.2 | 1.3 | 17.0 | 3.8 | 29.3 | 1.5 | 26.0 | 10.4 | 10.6 | 0.1 | 2.9 | 117.5 | 0.0 | 56.5 | 69.9 | 0.4 | 5.3 | 3.0 | 0.08 | 37.4 | 0.7 | 9.6 | 7.3 |
| | DW | 07-8-14 | 24.4 | 7.5 | 12.7 | 223 | 10.5 | 197.7 | 0.8 | 16.7 | 3.8 | 28.7 | 1.5 | 24.8 | 11.9 | 12.4 | 0.0 | 3.2 | 94.6 | 0.0 | 11.7 | 56.4 | 2.2 | 8.1 | 18.4 | 0.08 | 35.7 | 0.8 | 7.7 | 7.0 |
| | RCW | 07-8-14 | 21.3 | 6.8 | 35.6 | 101 | 10.1 | 172.8 | 1.6 | 4.0 | 2.1 | 13.1 | 1.4 | 12.5 | 3.0 | 11.8 | 6.3 | 1.2 | 117.5 | 0.0 | 9.7 | 7.1 | 0.4 | 8.6 | 22.1 | 0.05 | 2.0 | 0.6 | 2.8 | 3.9 |
| SW | SW1 | 07-8-14 | 24.0 | 5.8 | 62.1 | 62.5 | 4.30 | 89.9 | 1.2 | 4.6 | 0.9 | 4.6 | 1.4 | 16.3 | 2.4 | 9.6 | 14.6 | 0.3 | 35.1 | 0.0 | 103.4 | 5.6 | 8.6 | 4.8 | 17.7 | 0.03 | 0.9 | 0.8 | <0.5 | 3.2 |
| | SW2 | 07-8-14 | 24.3 | 5.5 | 63.3 | 45.5 | 10.5 | 44.1 | 0.9 | 3.0 | 0.6 | 2.9 | 1.1 | 12.1 | 2.1 | 7.8 | 7.8 | 0.6 | 6.1 | 0.0 | 205.6 | 17.9 | 10.8 | 3.9 | 16.2 | 0.02 | 0.7 | 0.9 | <0.5 | 1.8 |
| | SW3 | 07-8-14 | 25.0 | 5.4 | 45.7 | 48.1 | 5.61 | 52.8 | 0.7 | 3.1 | 0.6 | 3.0 | 1.1 | 12.6 | 2.2 | 8.0 | 8.0 | 0.5 | 13.7 | 0.0 | 224.3 | 8.5 | 12.0 | 3.8 | 12.1 | 0.02 | 0.7 | 0.9 | <0.5 | 1.8 |
| | SW4 | 07-8-14 | 21.0 | 5.3 | 58.8 | 46.3 | 10.3 | 45.1 | 0.7 | 3.1 | 0.6 | 2.8 | 1.1 | 12.6 | 2.2 | 8.0 | 8.2 | 0.6 | 6.1 | 0.0 | 229.3 | 21.2 | 11.7 | 2.1 | 14.0 | 0.02 | 0.7 | 1.0 | <0.5 | 1.8 |
| | HRW | 07-8-14 | 22.5 | 7.2 | 25.4 | 173 | 8.61 | 129.6 | 23.2 | 6.6 | 1.5 | 18.7 | 3.5 | 10.5 | 7.4 | 14.2 | 7.5 | 0.2 | 59.5 | 0.0 | 17.4 | 149.4 | 20.9 | 6.7 | 5.1 | 0.09 | 0.3 | 0.9 | 0.7 | 1.8 |

Table 3. Calculated saturation indices (S.I.) for various kinds of waters from the study area

| 1st sampling | | | | | | | | | | | | | | 2nd sampling | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|----------|------|------|-------|---------------------|--------|-------|------|------|--------|----------|------|--------------|-------|----------------------|-------|------------|------|----------|-------|------|------|---------------------|--------|-------|------|------|--------|----------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|------|------|
| Sample no. | Alb. | Ca-Mont. | Cal. | Chl. | Dol. | Fe(OH) ₂ | Fluor. | Gibb. | Goe. | Hem. | Illite | K-field. | Mica | Kaol. | Mang. | SiO ₂ (a) | Sid. | Sample no. | Alb. | Ca-Mont. | Cal. | Chl. | Dol. | Fe(OH) ₂ | Fluor. | Gibb. | Goe. | Hem. | Illite | K-field. | Mica | Kaol. | Mang. | SiO ₂ (a) | Sid. | | | |
| GOB | KG2 | -7.9 | -5.1 | -4.3 | -35.7 | -9.0 | -6.8 | -2.7 | -1.4 | -1.3 | -0.6 | -8.0 | -6.4 | -3.6 | -1.6 | -13.6 | -1.2 | -5.4 | GOB | KG2 | -6.2 | -2.1 | -3.7 | -26.8 | -7.7 | -5.1 | -2.8 | -0.1 | 0.7 | 3.3 | -4.5 | -4.7 | 0.7 | 0.8 | -12.9 | -1.2 | -3.8 | |
| | KG4 | -7.1 | -3.7 | -3.7 | -34.0 | -8.0 | -2.3 | -1.9 | -0.8 | 3.2 | 8.4 | -6.5 | -5.6 | -1.7 | -0.4 | -9.7 | -1.1 | -1.5 | | KG5 | -7.8 | -3.8 | -4.1 | -34.5 | -8.6 | -6.4 | -2.5 | -0.6 | -0.6 | 0.8 | -6.7 | -6.0 | -1.6 | -0.4 | -13.7 | -1.3 | -1.0 | |
| | KG7 | -6.2 | -3.5 | -3.1 | -31.2 | -6.8 | -7.8 | -1.8 | -1.2 | -2.2 | -2.4 | -6.0 | -4.8 | -1.5 | -0.7 | -14.6 | -0.9 | -4.5 | | KG7 | -5.5 | -2.4 | -2.7 | -26.0 | -5.8 | -5.6 | -1.4 | -0.6 | 0.3 | 2.6 | -4.7 | -4.2 | 0.1 | 0.2 | -13.2 | -0.9 | -3.7 | |
| | KG8 | -4.1 | 0.5 | -2.5 | -21.8 | -5.7 | -6.0 | -1.2 | 0.5 | -0.2 | 1.5 | -1.7 | -2.7 | 3.9 | 2.6 | -13.3 | -0.9 | -2.0 | | KG8 | -5.1 | -2.1 | -2.3 | -22.8 | -5.3 | -4.4 | -0.9 | -0.6 | 1.5 | 5.1 | -4.2 | -3.7 | 0.7 | 0.3 | -12.7 | -0.9 | -3.2 | |
| | KG9 | -7.2 | -2.3 | -3.1 | -27.8 | -7.2 | -6.1 | -1.8 | 0.4 | -0.4 | 1.1 | -4.7 | -5.2 | 1.2 | 1.1 | -13.1 | -1.6 | -3.5 | | KG9 | -6.3 | -0.6 | -2.9 | -24.1 | -6.6 | -4.5 | -2.6 | 1.2 | 1.5 | 5.0 | -2.9 | -4.3 | 3.6 | 2.4 | -12.1 | -1.6 | -3.4 | |
| | KG10 | -5.3 | -1.2 | -2.9 | -27.7 | -6.4 | -6.6 | -1.5 | -0.1 | -1.1 | -0.2 | -3.3 | -3.3 | 2.1 | 1.4 | -13.4 | -1.0 | -3.1 | | KG10 | -4.2 | 0.7 | -2.2 | -19.1 | -5.0 | -2.7 | -1.0 | 0.8 | 3.1 | 8.2 | -1.2 | -2.4 | 4.8 | 2.8 | -10.2 | -1.1 | -2.1 | |
| | KG11L | -1.3 | 4.1 | -0.9 | -8.9 | -2.5 | -4.3 | -0.2 | 1.7 | 1.3 | 4.5 | 2.8 | 0.2 | 9.2 | 5.3 | -12.2 | -0.8 | -1.4 | | KG11L | -2.6 | 1.1 | -0.7 | -8.7 | -2.1 | -2.2 | -0.2 | 0.6 | 3.8 | 9.6 | 0.0 | -1.2 | 5.5 | 2.7 | -7.5 | -0.9 | -2.1 | |
| | KG11U | -2.4 | 3.0 | -0.7 | -10.3 | -2.6 | -4.6 | -0.8 | 1.7 | 1.0 | 4.0 | 2.2 | 0.1 | 9.1 | 4.7 | -12.4 | -1.1 | -1.5 | | KG11U | -4.2 | 0.0 | -0.6 | -10.7 | -2.4 | -2.1 | -0.6 | 0.8 | 3.8 | 9.7 | -0.8 | -1.7 | 5.5 | 2.3 | -9.4 | -1.3 | -2.1 | |
| | KG12L | -6.3 | -4.7 | -2.7 | -28.9 | -6.0 | -7.3 | -0.5 | -1.8 | -1.7 | -1.4 | -6.8 | -4.8 | -2.7 | -1.8 | -13.2 | -0.9 | -4.3 | | KG12L | 0.0 | 8.2 | -2.2 | -8.3 | -5.0 | -1.1 | -1.6 | 3.7 | 4.9 | 11.8 | 6.5 | 1.4 | 14.4 | 9.0 | -9.1 | -0.9 | -0.4 | |
| | KG12U | -5.9 | -1.5 | -2.8 | -22.7 | -6.3 | -6.9 | -1.6 | 0.4 | -1.4 | -0.8 | -3.3 | -3.8 | 2.6 | 1.5 | -12.5 | -1.4 | -3.9 | | KG12U | -4.7 | 0.7 | -2.7 | -19.1 | -5.8 | -3.4 | -2.4 | 1.2 | 2.5 | 7.1 | -1.3 | -3.0 | 5.0 | 3.1 | -9.7 | -1.3 | -2.4 | |
| | KG13L | -1.4 | 0.2 | 0.4 | 5.3 | -1.2 | 0.4 | -0.9 | 0.0 | 6.0 | 14.1 | 0.6 | 0.4 | 5.9 | 1.4 | -5.0 | -1.0 | -3.3 | | KG13L | -2.5 | 2.8 | -1.5 | -14.8 | -4.4 | -2.1 | -0.8 | 1.3 | 3.8 | 9.7 | 1.1 | -0.9 | 7.4 | 4.2 | -10.6 | -0.9 | -1.4 | |
| | KG13U | -6.0 | -1.8 | -3.2 | -27.4 | -7.1 | -6.1 | -2.0 | 0.0 | -0.6 | 0.8 | -4.0 | -4.1 | 1.4 | 1.1 | -14.1 | -1.2 | -2.4 | | KG13U | -10.5 | -9.1 | -4.5 | -47.9 | -9.5 | -10.2 | -3.1 | -2.8 | -4.3 | -6.5 | -12.6 | -8.9 | -8.9 | -4.7 | -17.9 | -1.2 | -4.3 | |
| | KG14 | -4.4 | -1.0 | -2.1 | -21.3 | -5.0 | -7.0 | -0.8 | -0.3 | -1.4 | -0.8 | -2.8 | -2.7 | 2.4 | 1.2 | -14.2 | -0.9 | -3.7 | | KG14 | -3.3 | 1.0 | -1.6 | -13.1 | -3.7 | -2.7 | -0.7 | 0.7 | 3.3 | 8.6 | -0.5 | -1.7 | 5.2 | 2.8 | -11.6 | -0.9 | -2.0 | |
| | OBT | KH13 | -3.6 | 1.3 | -1.9 | -17.5 | -4.6 | 0.0 | -0.9 | 1.3 | 5.5 | 12.9 | -0.2 | -1.9 | 6.3 | 3.6 | -7.8 | -1.3 | -3.0 | OBT | KH13 | -4.3 | -5.3 | 0.6 | 3.1 | 0.2 | 1.0 | -1.0 | -1.5 | 6.7 | 15.5 | -4.6 | -2.7 | -0.2 | -2.7 | -5.5 | -1.5 | -2.7 |
| | KH14 | -3.4 | 1.9 | -1.4 | -14.5 | -3.6 | 0.5 | -1.0 | 1.8 | 6.0 | 14.0 | 0.6 | -1.7 | 7.4 | 4.2 | -2.3 | -1.4 | -8.2 | | KH14 | -3.0 | -0.9 | 0.3 | 3.0 | 0.1 | 1.1 | -1.0 | 0.5 | 6.9 | 15.8 | -0.8 | -1.6 | 4.9 | 1.3 | -0.2 | -1.5 | -8.0 | |
| | KH15 | -3.4 | 1.9 | -1.7 | -18.2 | -4.2 | 0.3 | -1.6 | 1.5 | 5.8 | 13.6 | 0.2 | -1.8 | 6.7 | 4.0 | -3.4 | -1.2 | -7.5 | | KH15 | -2.2 | 3.0 | -0.6 | -5.0 | -1.8 | 0.0 | -0.9 | 2.1 | 5.8 | 13.5 | 2.2 | -0.7 | 9.1 | 4.9 | -6.8 | -1.4 | -0.8 | |
| | KH16 | -0.1 | 4.2 | -0.2 | 1.4 | -1.3 | 2.8 | -0.3 | 1.5 | 8.3 | 18.6 | -4.0 | 1.6 | 10.1 | 5.0 | -1.2 | -0.7 | -4.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | KH17 | -1.8 | 2.5 | -1.5 | -11.4 | -3.9 | 0.7 | -0.6 | 0.8 | 6.2 | 14.4 | 1.0 | -0.5 | 6.6 | 3.7 | -5.6 | -0.6 | -4.1 | | KH17 | -2.4 | 1.8 | -1.6 | -12.7 | -3.9 | 0.3 | -0.5 | 0.7 | 6.1 | 14.2 | 0.2 | -1.1 | 5.8 | 3.2 | -8.1 | -0.7 | -1.9 | |
| | KH18 | -4.9 | -2.3 | -2.8 | -26.7 | -6.3 | -0.2 | -0.6 | -1.1 | 5.3 | 12.6 | -4.6 | -3.7 | -0.3 | 0.0 | -7.8 | -0.6 | -2.7 | | KH18 | -3.2 | 0.3 | -1.9 | -15.0 | -4.4 | -2.2 | -0.5 | 0.1 | 3.6 | 9.1 | -1.3 | -2.0 | 3.8 | 2.1 | -10.6 | -0.7 | -2.5 | |
| | KH19 | -4.8 | -2.3 | -2.3 | -24.1 | -5.3 | -0.3 | -0.5 | -1.1 | 5.2 | 12.3 | -4.4 | -3.4 | -0.1 | -0.1 | -8.6 | -0.7 | -2.7 | | KH19 | -2.3 | 1.5 | -1.3 | -8.9 | -3.1 | -1.0 | -0.3 | 0.5 | 4.8 | 11.5 | 0.3 | -1.0 | 5.7 | 3.0 | -9.5 | -0.8 | -1.6 | |
| | KH20 | -5.5 | -3.5 | -2.9 | -28.1 | -6.4 | -0.2 | -0.7 | -1.5 | 5.3 | 12.5 | -5.8 | -4.2 | -1.7 | -1.0 | -8.4 | -0.7 | -3.2 | | KH20 | -3.6 | 0.2 | -2.0 | -17.4 | -4.5 | -2.6 | -0.5 | 0.1 | 3.2 | 8.3 | -1.6 | -2.3 | 3.6 | 2.1 | -10.3 | -0.8 | -2.0 | |
| | IW | IW | -5.9 | -0.7 | -1.9 | -19.5 | -4.2 | 0.2 | -1.9 | 1.7 | 5.7 | 13.4 | -2.2 | -4.0 | 4.8 | 2.8 | -6.0 | -2.0 | -4.8 | IW | IW | -4.2 | 0.9 | -1.6 | -11.3 | -3.6 | -2.6 | -2.9 | 1.4 | 3.2 | 8.4 | -0.4 | -2.3 | 6.0 | 3.2 | -10.7 | -1.4 | -2.3 |
| | TW | 3TGW | -5.0 | -2.2 | -1.9 | -24.0 | -4.6 | -2.4 | -0.6 | -0.7 | 3.2 | 8.3 | -4.1 | -3.3 | 0.9 | 0.2 | -9.5 | -0.9 | -3.5 | TW | 3TGW | -2.4 | 0.8 | -0.2 | -3.6 | -1.1 | -0.3 | -0.7 | 0.7 | 5.4 | 12.8 | 0.5 | -0.4 | 6.5 | 2.5 | -8.3 | -1.1 | -1.4 |
| | 2CTW | -2.3 | 3.2 | -1.6 | -12.9 | -3.9 | 0.6 | -1.2 | 1.9 | 6.1 | 14.2 | 2.1 | -0.4 | 8.9 | 5.0 | -0.2 | -1.1 | -9.2 | | 2CTW | -1.9 | 2.1 | -1.6 | -12.9 | -4.1 | -1.8 | -0.8 | 1.1 | 4.0 | 10.1 | 1.4 | 0.2 | 7.9 | 3.7 | - | -0.9 | -1.6 | |
| | 3CTW | -3.3 | 0.9 | -1.5 | -17.2 | -3.8 | 1.5 | -0.6 | 0.6 | 7.0 | 16.0 | -0.6 | -1.6 | 5.2 | 2.8 | -6.1 | -0.9 | -2.3 | | 3CTW | -1.9 | 0.0 | 0.6 | 2.0 | 0.2 | 2.3 | -0.4 | -0.1 | 8.0 | 18.0 | 0.1 | -0.1 | 5.2 | 1.4 | -7.4 | -0.9 | 0.3 | |
| | 2CTWU | -1.1 | 2.3 | -0.6 | -6.8 | -2.3 | 1.6 | -1.1 | 0.9 | 7.1 | 16.2 | 2.2 | 1.1 | 8.5 | 3.6 | -4.6 | -0.8 | -3.6 | | 2CTWU | -4.4 | 0.5 | -1.8 | -17.7 | -4.2 | -4.7 | -2.1 | 1.2 | 1.1 | 4.2 | -1.0 | -2.5 | 5.6 | 3.1 | -12.9 | -1.4 | -2.1 | |
| | SPW | ISPW | -3.9 | -0.7 | -1.0 | -19.4 | -3.2 | -0.2 | -0.2 | -0.1 | 5.3 | 12.6 | -2.1 | -2.1 | 3.3 | 1.4 | -6.2 | -0.9 | -2.3 | SPW | ISPW | -3.1 | 1.0 | -1.2 | -15.7 | -3.4 | -3.4 | -0.1 | 0.6 | 2.4 | 6.8 | -0.4 | -1.4 | 5.5 | 2.8 | -10.4 | -0.9 | -1.8 |
| | 2SPW | -4.1 | -1.0 | -1.1 | -20.5 | -3.4 | 0.1 | -0.2 | -0.3 | 5.5 | 13.0 | -2.5 | -2.2 | 2.9 | 1.2 | -6.4 | -0.9 | -2.0 | | 2SPW | -3.2 | 1.0 | -0.9 | -16.3 | -3.0 | -3.3 | -0.1 | 0.6 | 2.5 | 7.0 | -0.4 | -1.4 | 5.5 | 2.8 | -10.7 | -0.9 | -1.2 | |
| | 3SPW | -3.0 | 1.3 | -1.0 | -16.3 | -3.1 | 1.5 | -0.5 | 0.8 | 7.1 | 16.2 | -0.1 | -1.2 | 5.9 | 3.1 | -6.9 | -0.9 | -1.1 | | 3SPW | -2.4 | 3.2 | -1.1 | -11.7 | -2.8 | -3.6 | -0.6 | 1.8 | 2.2 | 6.5 | 1.8 | -0.7 | 8.5 | 4.9 | -9.8 | -1.1 | -2.2 | |
| | TDW | TSW | -2.9 | 1.1 | -1.0 | -14.9 | -3.0 | 1.9 | -0.4 | 0.6 | 7.5 | 17.0 | -0.2 | -1.1 | 5.6 | 2.8 | -6.4 | -0.9 | -2.8 | TDW | TSW | -1.9 | 2.9 | -0.4 | -7.8 | -1.8 | -1.4 | -0.3 | 1.4 | 4.4 | 10.8 | 1.9 | -0.2 | 8.3 | 4.3 | - | -1.0 | -0.8 |
| | DW | -2.4 | 2.1 | -0.8 | -13.2 | -2.6 | 1.7 | -0.4 | 1.0 | 7.3 | 16.7 | 0.9 | -0.6 | 7.0 | 3.7 | -5.9 | -0.9 | -3.2 | | DW | -2.7 | 1.1 | -0.5 | -9.1 | -2.0 | -1.5 | -0.3 | 0.7 | 4.3 | 10.7 | 0.2 | -1.0 | 6.1 | 2.8 | -10.4 | -1.0 | -1.0 | |
| | RCW | -4.4 | 0.5 | -2.3 | -20.4 | -5.2 | 0.2 | -1.6 | 0.8 | 5.7 | 13.4 | -1.3 | -2.4 | 4.6 | 2.8 | -5.9 | -1.1 | -5.1 | | RCW | -4.5 | 0.4 | -1.4 | -16.9 | -3.5 | -4.1 | -1.4 | 1.0 | 1.7 | 5.4 | -1.1 | -2.4 | 5.1 | 2.8 | - | -1.3 | -2.5 | |
| | SW | SW1 | -8.1 | -4.8 | -4.3 | -35.0 | -9.1 | -6.7 | -2.1 | -1.0 | -1.1 | -0.3 | -7.6 | -6.4 | -2.7 | -1.2 | -14.6 | -1.4 | -3.6 | SW | SW1 | -5.3 | 0.2 | -3.3 | -25.9 | -6.9 | -6.6 | -3.3 | 0.9 | -0.7 | 0.6 | -2.3 | -3.6 | 3.8 | 2.8 | -13.8 | -1.2 | -4.0 |
| | SW2 | -10.2 | -8.0 | -4.4 | -45.8 | -9.6 | -5.6 | -2.5 | -2.2 | 0.0 | 1.9 | -11.4 | -8.6 | -7.4 | -3.7 | -11.8 | -1.3 | -5.3 | | SW2 | -7.2 | -2.9 | -4.6 | -32.0 | -9.2 | -7.0 | -3.1 | -0.1 | -1.1 | -0.2 | -5.6 | -5.5 | -0.2 | 0.5 | -14.6 | -1.3 | -4.5 | |
| | SW3 | -8.2 | -4.7 | -5.0 | -39.1 | -10.3 | -5.4 | -3.5 | -1.0 | 0.3 | 2.5 | -7.9 | -6.7 | -3.1 | -1.1 | -12.1 | -1.2 | -6.1 | | SW3 | -6.8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

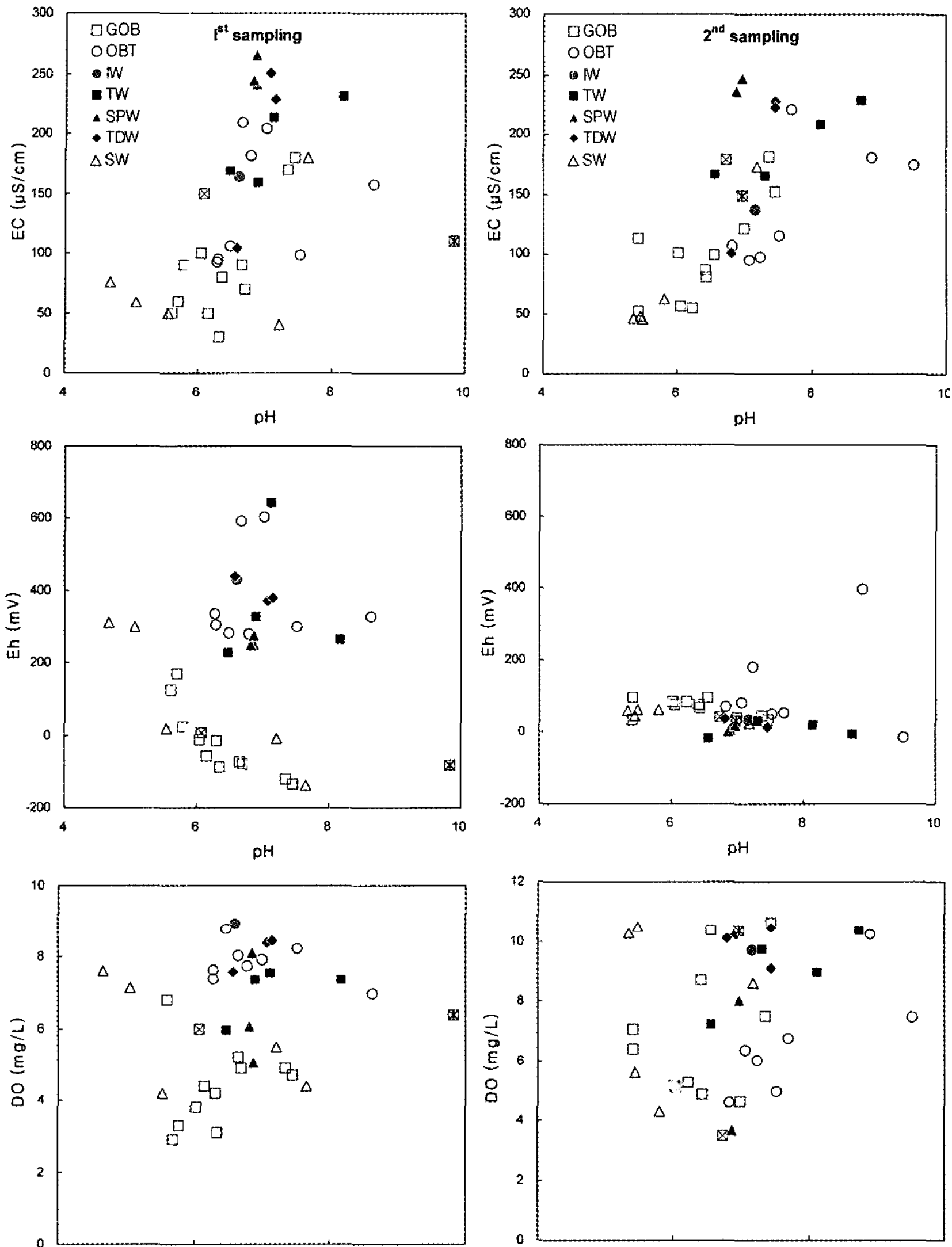


Fig. 1. Plots of pH versus EC, Eh and DO of various kinds of waters from the study area.

고 있다. 이는 2차 시료들이 우기에 채취되었기 때문에 강우의 영향을 받은 것으로 판단된다. 용존산소(DO) 또한 Eh 값과 마찬가지로 산화-환원 조건을 반영하는 지시자로서 1차의 경우 Eh 값에서 나타난 결과와 마찬가지로 지상관측공의 시료들이 다른 공 내 관측공이나 기타 기지 내 공동 운영수들에 비해 명확히 낮은 값을 보이고 있다. 용존산소량이 많은 산화환경에서는 뒤에 설명할 호기성 세균과 점액성 세균들의 성장이 활발해 질 수 있고, 반면에 환원환경에서는 혐기성 세균과 황환원 세균들의 성장이 활발해 질 수 있

다. 따라서 미생물의 증식에 의해 산소가 소비되어 용존산소량이 감소하게 된다. 그러나 뒤에 설명될 미생물 분석결과는 이러한 경향을 반영하고 있지 않으며, 일반적으로 심도가 깊어질수록 산소와의 접촉이 차단되고, 물-암석 반응이 진행되면서 환원환경의 특성을 보이기 때문에 상대적으로 깊은 심도에서 채수된 지상관측공의 시료에서 낮은 Eh 값과 DO 값을 보이는 것으로 판단된다. 반면 2차시료에서 이들 지상관측공의 용존산소 농도가 1차시료보다 높은 값을 보여주며 다른 시료들과 유사한 범위의 값을 보여주는데 이는 준

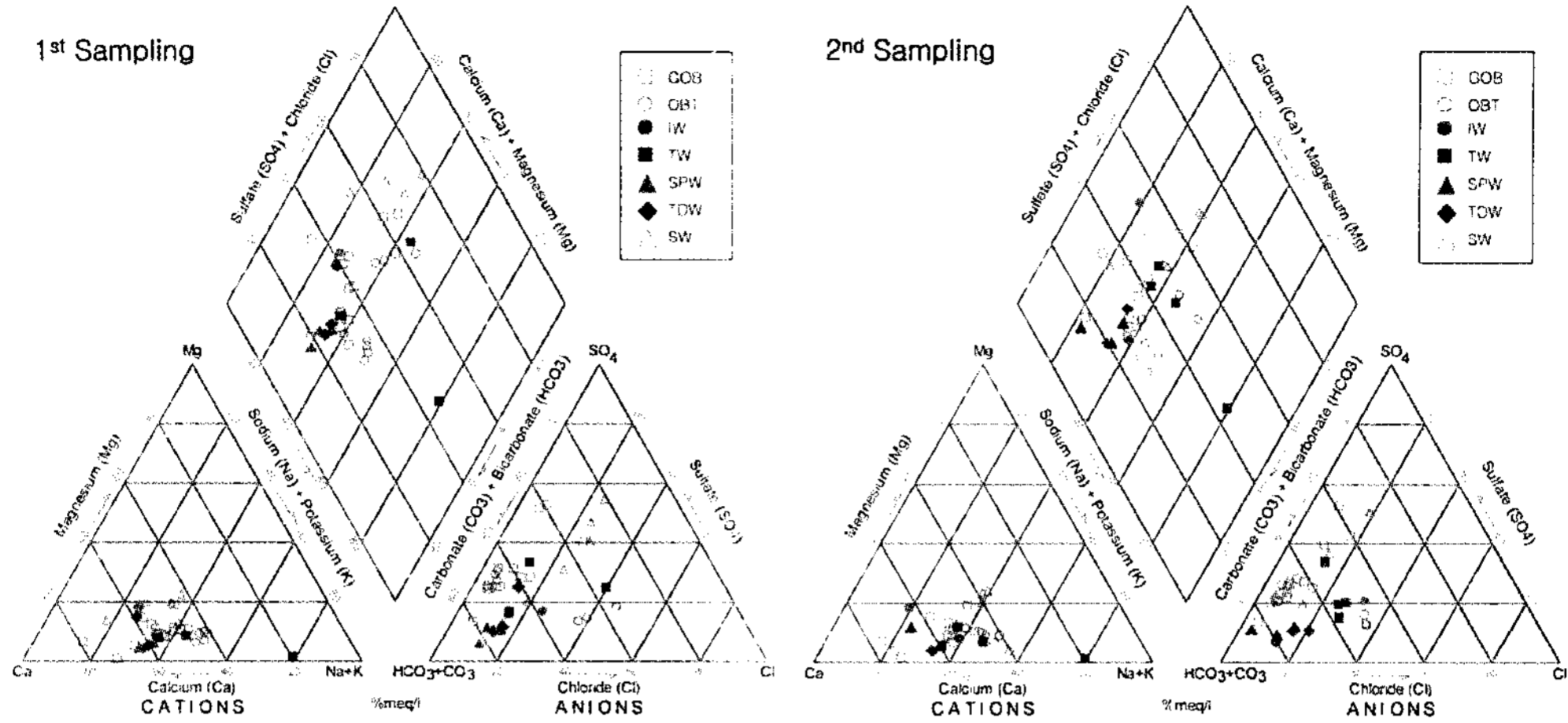


Fig. 2. Piper's diagram showing compositions of various kinds of waters from the study area.

다. 이 역시 우기의 강우 영향으로 연구지역 전체가 영향을 받은 결과로 보인다.

탁도는 물의 흐린 정도를 나타내는 파라미터로 부유물질의 양과 관계가 있다. 분석 결과를 살펴보면 지상 관측공 시료들과 공 내 관측공 중 KH-16 관측공을 포함하여 일부 시료에서 탁도가 높은 것으로 나타난다(표 2). 이는 자체의 고유 특성이 아니라 물시료 채취시 일부 관측공의 상태가 일반적인 시료채취기를 이용할 수 없기 때문에 공내부를 교란시킨 후 시료를 채취하면서 공벽의 침착되어 있던 물질들이 물시료 내에 혼합된 것으로 판단된다. 이들 관측공 이외에 기지 내 공동 운영수들에 대한 탁도 분석 결과는 부유물질이 표면을 덮고 있는 2 공동 공사용 터널수와, 침전조, 재활용수를 제외하고는 대부분 매우 낮은 값을 보여 이들 기지 내 공동 운영수들은 부유물질에 의한 클로킹 증거는 없는 것으로 판단된다.

물시료의 주요 용존이온에 대하여 파이퍼도(Piper's diagram) (그림 2)에 도시한 결과 대부분 Ca-HCO₃ 유형에서 Ca-HCO₃-SO₄ 유형을 보이나 일부 공 내 관측공 시료(KH-13,14,15)에서 Ca-HCO₃-Cl 유형을 보이며, 3 공동 공사용 터널수(3CTW)는 Na-HCO₃(SO₄-Cl) 유형에 속함을 알 수 있다. 장기관측자료에서 수위하강현상을 보여주는 일부 관측공의 물시료는 다른 관측공들이나 기지 내 공동 운영수들과 유사한 유형에 속하여 특별히 화학적으로 구별되지는 않는다.

황산염은 황철석의 산화와 같은 자연적인 기원

과 대도시에서는 아황산가스와 같은 대기오염에 의해 농도가 증가하게 된다(Cook and Herczeg, 2000; Robinson and Bottrell, 1997). 황철석의 산화는 산소를 소모하고 수소이온을 내놓음으로써 물의 pH를 낮추게 된다. 하지만 연구지역에서 황산염 농도와 pH는 역의 상관성을 보여주지 않는다. 또한 황철석의 산화는 황산염 농도를 증가시키기 때문에 TDS와도 높은 양의 상관성을 보여 주어야 한다. 하지만 그림 3에서 보는 것과 같이 TDS와 황산염의 상관계수는 0.2로 매우 낮은 상관성을 보여주고 있다. 이런 결과는 조사지역 지하수의 황산염은 황철석의 산화가 아닌 강수에 기인하고 있음을 나타내는 것으로 판단된다. 이는 파이퍼도에서 보듯이 지표수에서 황산염이 다른 음이온에 비해 상대적인 비율이 매우 높은 것으로도 알 수 있다.

지하수의 Cl 원소의 기원은 물-암석 반응이 진행되면서 모암 내의 광물들 중 구조 내에 (OH)가 Cl로 치환된 광물들의 용해에 의해 증가할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 연구지역 물시료 중 일부 공 내 관측공 시료 내의 높은 Cl과 Na 함량은 수벽공 주입수에 첨가하는 처리시약인 NaOCl (차아염소산나트륨)의 영향으로 생각할 수도 있다. NaOCl은 Na⁺와 OCl⁻로 분해되면 Cl 종은 조사지역 pH와 Eh 조건에서는 대부분 Cl⁻로 존재할 것으로 예상된다(Stumm and Morgan, 1996). 따라서 다른 기원이 없다면 지하수 내의 Na와 Cl은 1:1의 몰비를 나타내야 한다. Na와 Cl의 몰비를 나타내는 그림 4에서 특히 Cl 함량이

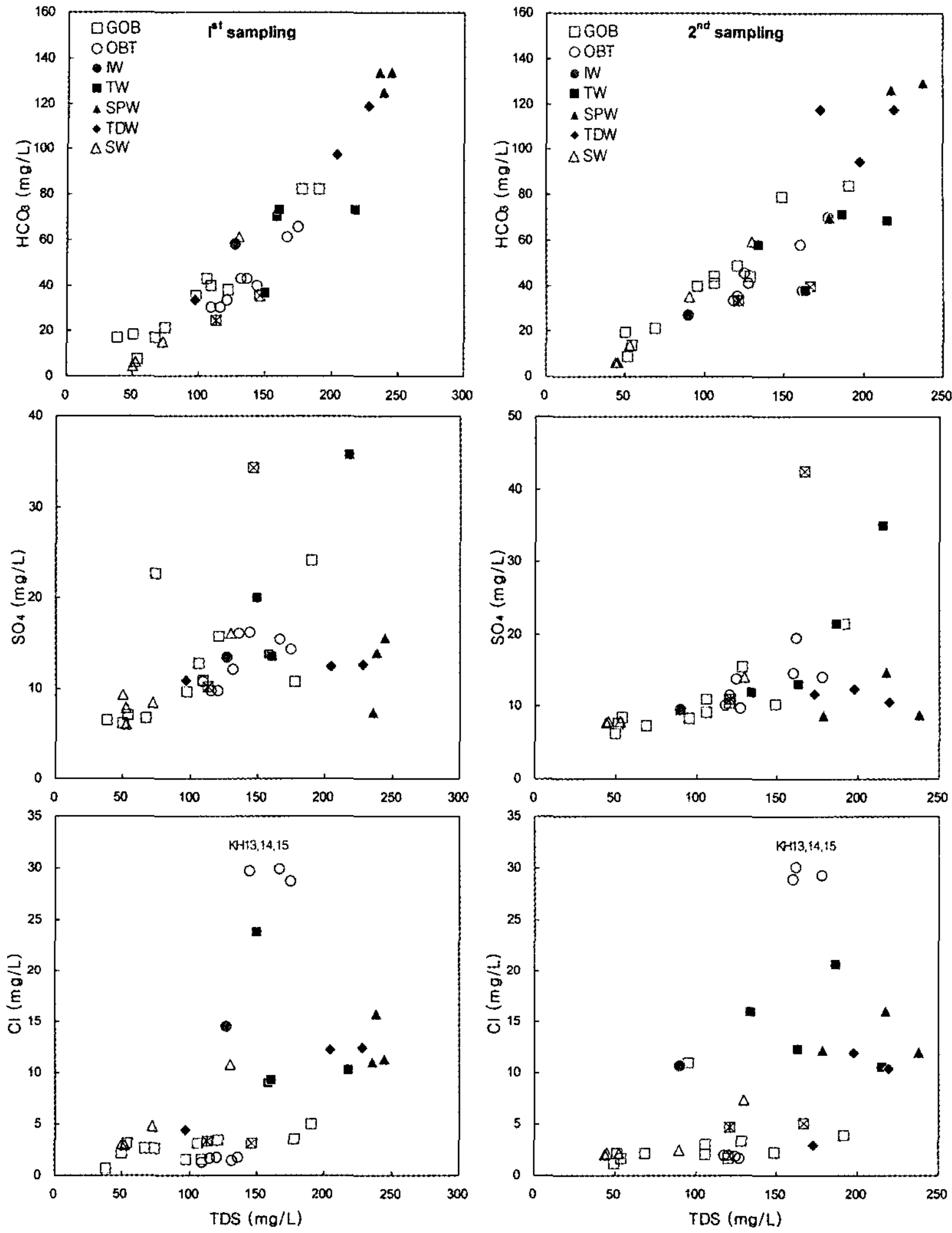


Fig. 3. Plots of TDS versus HCO_3 , SO_4 and Cl concentrations (mg/l) of various kinds of waters from the study area.

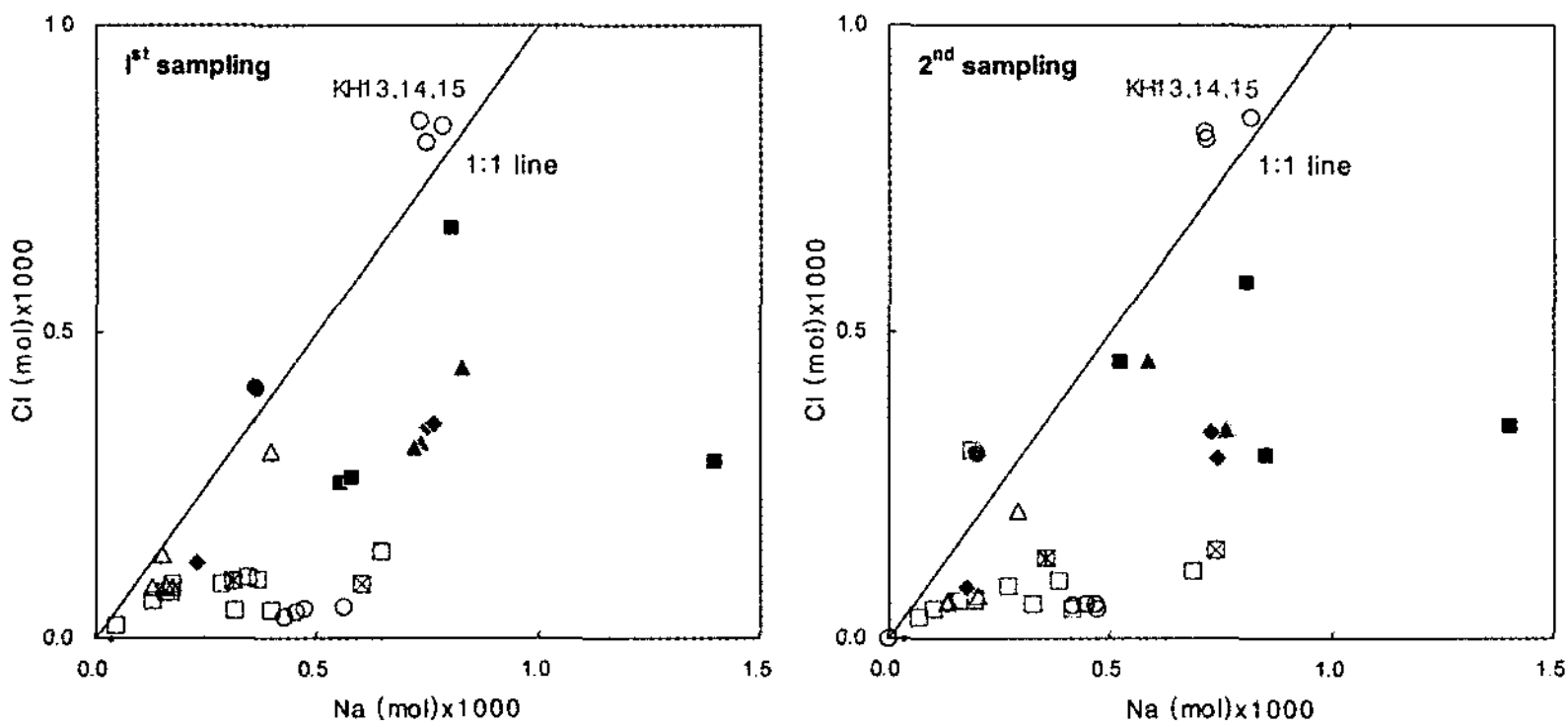


Fig. 4. Plots of Na (mol) versus Cl (mol) of various kinds of waters from the study area.

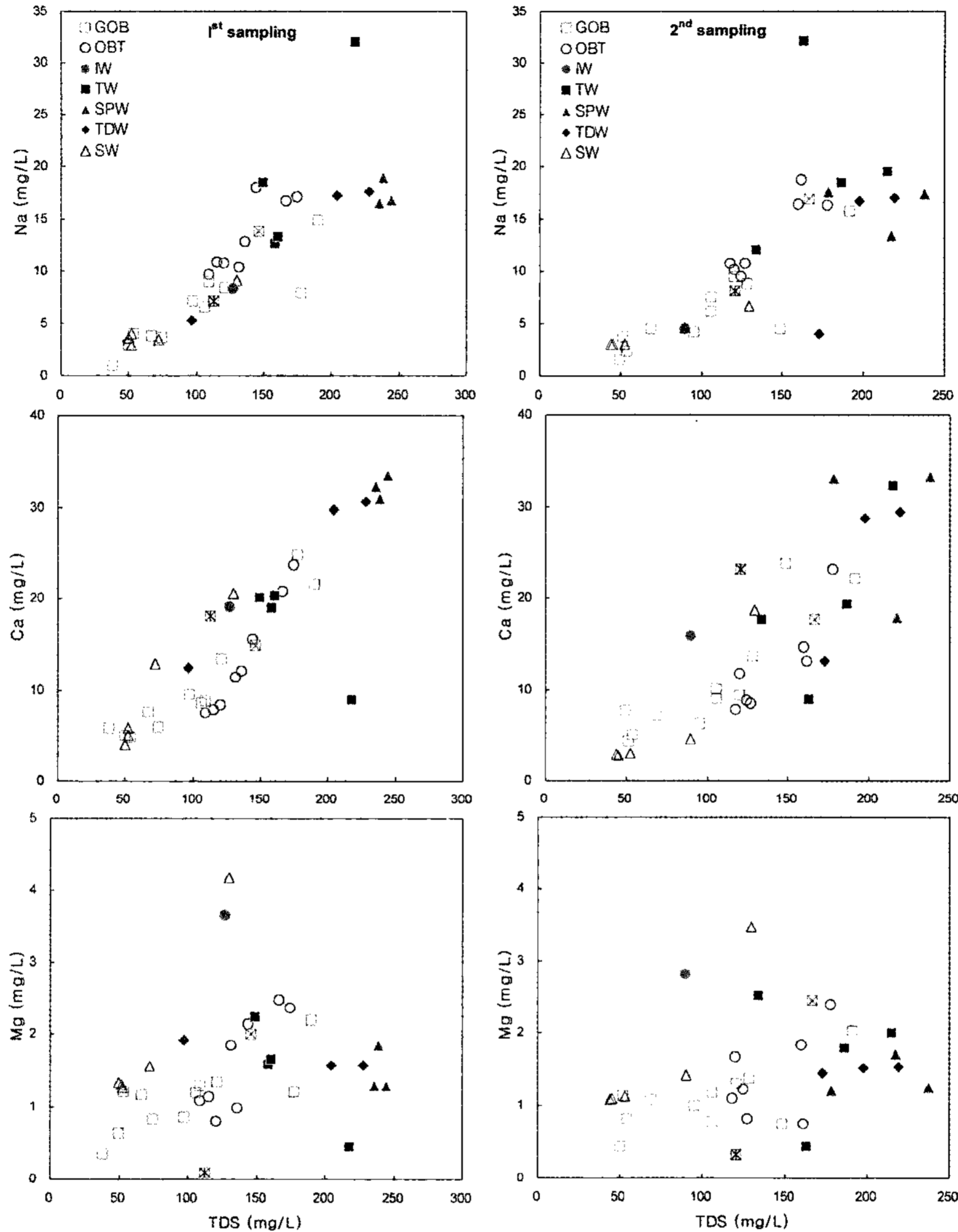


Fig. 5. Plots of TDS versus Na, Ca and Mg concentrations (mg/l) of various kinds of waters from the study area.

높은 KH-13, -14, -15는 1:1 직선에 근접하여 도시됨을 알 수 있다. 따라서 이들 시료는 차아염소산나트륨의 영향에 의해 높은 Cl 농도를 보여주는 것으로 보인다. 하지만 다른 대부분의 시료들은 1:1 직선에서 Na 비율이 더 높은 것으로 도시되고 있다. 이러한 결과는 Na가 다른 기원에 의해 그 농도가 증가하고 있음을 보여준다. Na는 암반 대수층에서 일반적으로 규산염 광물과의 반응에 의해 그 농도가 증가하게 된다. 이 반응은 또한 물속에 HCO_3^- 의 농도를 증가시키고 TDS를 증가시키게 된다. 이는 그림 3과 그림 5의 TDS

와 HCO_3^- , Na 관계에서 명확히 볼 수 있다. 그림 3에서 TDS와 HCO_3^- 의 상관계수는 0.9 (1차), 0.8 (2차)로 매우 높은 상관성을 보여주고 있으며 그림 5에서 TDS와 Na의 상관계수 역시 0.7 (1차), 0.6 (2차)로 매우 높은 양의 상관성을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Na가 대부분 규산염광물과의 반응에 의해 농도가 조절되고 있음을 보여주고 있다.

Ca의 경우 Na, HCO_3^- 와 마찬가지로 TDS와 매우 높은 상관계수를 보여주고 있다(그림 5). Ca 역시 Ca를 포함하는 규산염 광물 및 방해석과 같

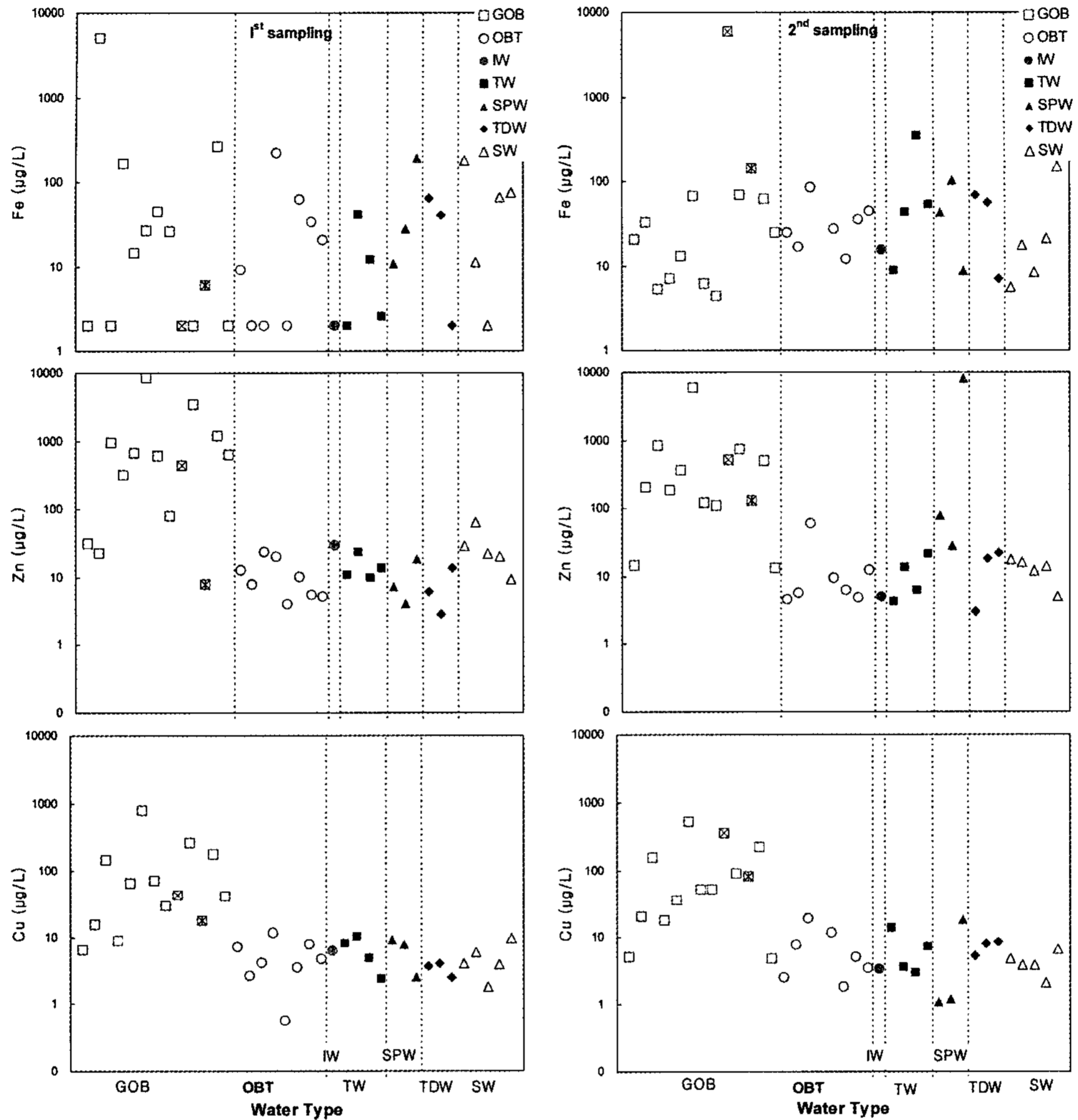


Fig. 6. Plots of Fe, Zn and Cu concentrations ($\mu\text{g/l}$) of various kinds of waters from the study area.

은 탄산염 광물과의 반응에 의해 그 농도가 조절된다. 특히 다음에 설명할 탄산염 광물의 포화지수를 나타내는 그림 7에서 보는 것처럼 대부분 지하수 시료가 방해석과 돌로마이트에 불포화상태에 있어 이들 광물이 존재한다면 지속적으로 용해될 수 있는 조건을 나타낸다. 물시료 내 용존 미량원소들의 함량을 살펴보면(그림 6), 주요 이온들의 함량 특성과는 다소 상이한 결과를 보여준다. 대부분의 지상관측공 물시료에서 높은 Cu 및 Zn 함량을 보이고 있다. 이는 관측공 내부에 설치된 케이싱의 영향으로 판단된다. 그러나 Fe함량은 다른 공 내 관측공이나 기지 내 공동 운영수들과 유사한 값을 보여서 바축기지 내 물

시료들의 Fe함량은 산화철 광물들의 침전에 의해 조절되고 있음을 알 수 있다.

광물학적 클로킹 가능성 분석 결과

지하유류비축기지의 수벽공 시스템에서는 원활한 지하수의 흐름과 안정적인 수두를 유지하는 것이 필수적인데, 이를 저해하는 중요한 요인 중의 하나가 클로킹 현상이다. 이러한 클로킹을 유발시키는 요인들은 다양하지만, 그 중 지구화학적 요인들로서 지하비축기지에서도 중요하게 고려되어야 할 사항은 용존 양이온 성분들과 음이온 성분들과의 반응에 의한 침전현상과 산화-환원전

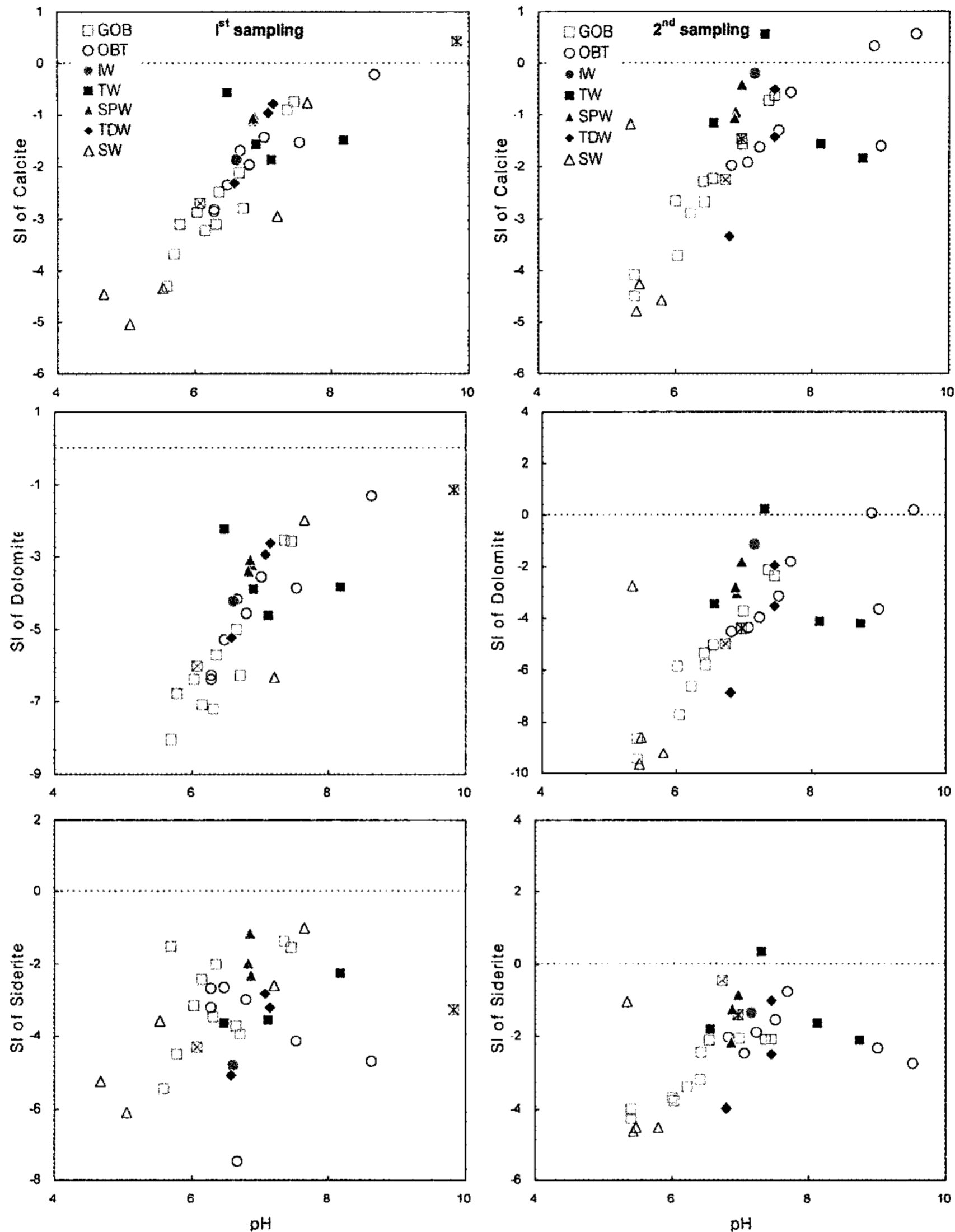


Fig. 7. Plots of pH versus saturation indices (S.I.) of calcite, dolomite and gypsum of the water samples from the study area.

위(Redox potential) 변화에 따른 수산화물로의 침전현상 등이다.

모든 물시료들에 대한 1, 2차 현장측정 및 화학분석 결과를 바탕으로 물리·화학적 환경에서 각종 용해된 광물과 물과의 평형상태 및 포화상태를 알기 위하여 열역학적 모델링 프로그램인 PHREEQC (Parkhurst, 1995)를 이용하여 지구화학적 모델링을 실시하였다. 이 모델링의 입력자료로는 연구지역에서 조사된 현장측정자료와 화학분석자료를 사용하였다. PHREEQC를 이용한

모델링은 열역학적 평형상태를 가정하고 다양한 광물들에 대한 평형방정식에 필요한 자료를 입력하여 각종 용존 원소들의 화학종(chemical species)과 해당 광물에 대한 포화지수(S.I.: saturation index) 및 관련 열역학적 계수들을 신속히 얻을 수 있는 장점이 있다(Reed, 1982). 특히 포화지수를 이용하면 용존된 이온들이 광물로의 침전 가능성을 예측할 수 있는데, 포화지수는 다음과 같이 정의된다.

Table 4. Results of the analysis of variance

| | pH | Eh | DO | TDS | Alk. | Na | K | Ca | Mg | Si | F | Fe | SI Calcite | SI Fe(OH) ₃ | SI Goethite | SI Hematite |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------|---------------------------|----------------|----------------|
| 1st (significant probability) | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.29 | 0.10 | 0.03 | 0.82 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2nd (significant probability) | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.44 | 0.53 | 0.00 | 0.88 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

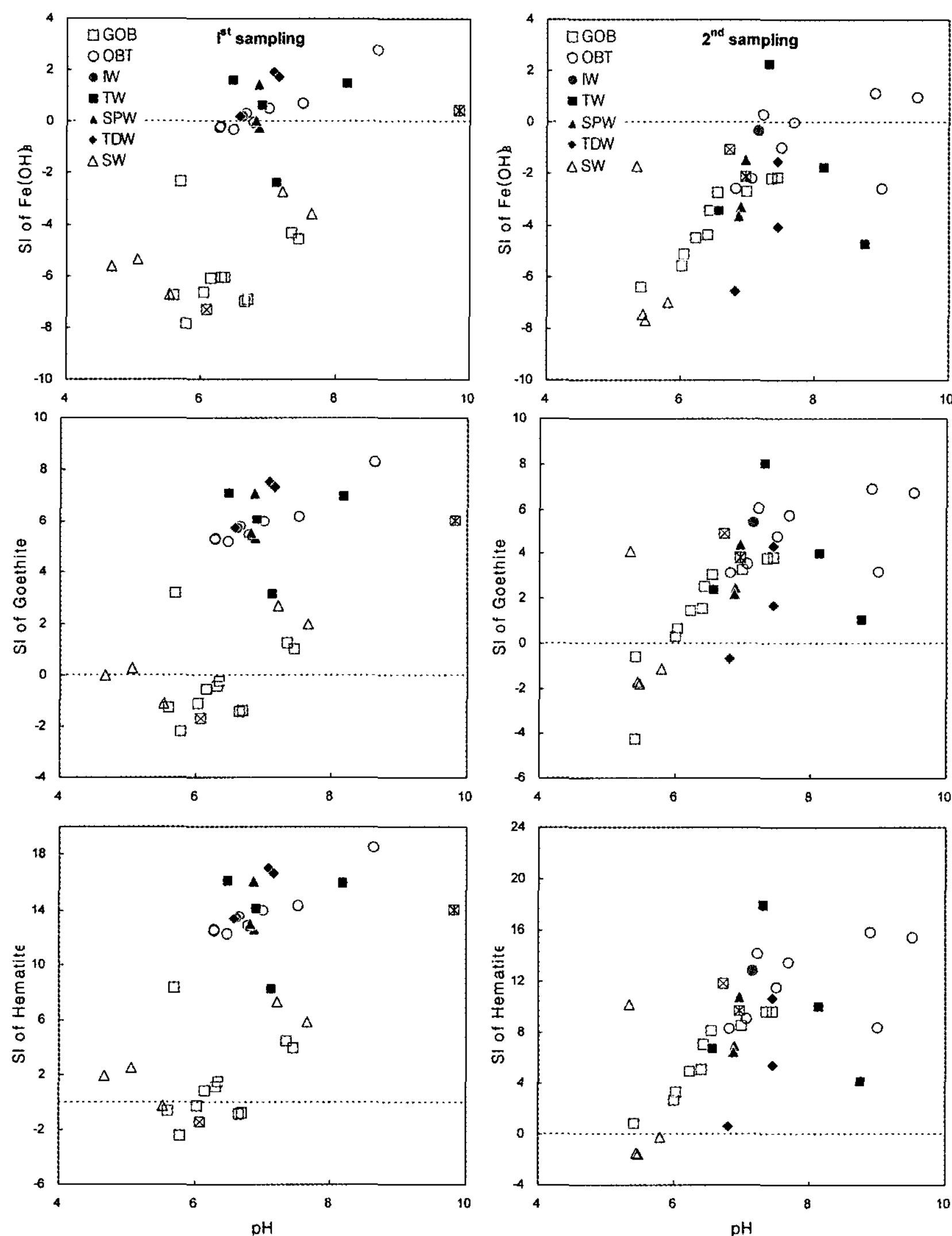


Fig. 8. Plots of pH versus saturation indices (S.I.) of Fe(OH)₃, goethite and hematite of the water samples from the study area.

$$S.I. = \left(IAP \frac{IAP}{K_{sp}} \right)$$

상기 식에서 IAP (ionic activity products)는 물에 존재하는 이온들의 활동도 곱이며 K_{sp} (solubility product at equilibrium)는 평형상태에서의 용해도 곱으로서, 어떤 고형물의 포화지수가 0보다 큰 경우는 과포화 상태(oversaturated state)로서 침전될 가능성이 있음을 의미하고, 0보다 작은 경우는 불포화 상태(undersaturated state)로서 침전되기보다는 용존 상태로 존재할 가능성이 큼을 의미하며, 0일 경우는 그 고형물은 물과 평형상태(equilibrium state)로 존재할 가능성이 큼을 의미한다(Freeze and Cherry, 1979; Snoeyink and Jenkins, 1980).

한편 포화지수가 0보다 큰 값을 갖는 고형물이라 해서 항상 침전되는 것이 아님에 주의해야 하는데, 그 이유는 일부 광물들의 생성 환경은 고온 고압 하에서만 생성 가능하고 지표환경에서는 생성될 수 없기 때문이다. 그러므로 포화지수가 0보다 큰 고형물들은 이론적으로 침전될 가능성이 있음을 의미한다.

침전속도가 매우 빠르고 클로킹을 일으킬 수 있는 광물로는 대표적으로 탄산염 광물인 방해석과 철-산화/수산화물로 알려져 있다. 용존 양이온 성분들과 음이온 성분과의 반응에 의한 침전물중 대표적인 광물이 방해석(calcite, CaCO_3)이다. 방해석은 동역학적으로 용해, 침전속도가 빠르고 열극충진물질로서 흔하게 나타나는 광물로서 물리·화학적인 클로킹을 유발할 수 있는 광물로서 외국의 지하공동에서도 보고된 바 있다(Nordstrom, 1989). 또한 철-산화/수산화물은 물속의 용존 철이 산소와 산화반응을 일으켜 침전하여 생성되는 것으로 산소가 존재 시 그 반응속도가 매우 빠르고 관정의 스크린에 클로킹을 형성하는 것으로 알려져 있다(Brown *et al.*, 1999; Houben, 2003). 이와 함께 지하수의 화학 조건에서 쉽게 관찰되는 점토광물들에 대해서도 평가하여야 한다.

PHREEQC 모델링으로 구한 탄산염 광물, 철-산화/수산화물, 점토광물과 망간광물 등의 대표적인 포화지수값을 표 4에 정리하였으며, 이들 포화지수를 pH의 변화 및 시료 종류에 따라 각각 그림 7, 8, 9에 도시하였다.

그림 7에 도시된 결과를 살펴보면 탄산염 광물인 방해석(calcite), 돌로마이트(dolomite), 능철석(siderite)의 경우 pH가 증가함에 따라 포화지수 값이 증가하기는 하지만 1차와 2차 모두 대부분의 시료에 대해 불포화상태에 있다. 따라서 조사 지역에서 탄산염 광물은 침전하지 않고 용해되는 조건임을 나타내고 있다. 반면 철-산화/수산화물의 포화지를 도시한 그림 8에서 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 경우 지상관측공과 지표수를 제외하고 대부분의 시료는 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 에 대해 포화 및 과포화 상태에 도달해 있다. 또한 침철석(goethite)와 적철석(hematite)에 대해서는 일부 지상관측공 및 지표수를 제외하고는 모두 과포화 상태에 도달해 있음을 볼 수 있다. 이는 조사지역의 높은 용존산소 농도를 고려할 때 철-산화/수산화 광물이 쉽게 침전될 수 있는 조건임을 나타낸다. 따라서 현재 관측공의 용존이온함량은 일반적으로 알려진 지하수 내 함량에 비해 높지 않지만, 철-산화/수산화 광물의 포화지수 해석결과에 의하면 광물의 침전에 의한 클로킹이 장기간에 걸쳐 서서히 진행될 수 있는 것으로 판단된다.

특히 KG-13L 물시료의 경우에는 지화학적으로 계산된 모든 철-산화/수산화 광물과 더불어 미세한 열극을 충전될 수 있는 점토 광물에 대하여 지상 관측공들 중 가장 높은 포화 지수를 보여 주어 이들 광물의 침전에 의한 클로킹 가능성을 지시하고 있다(그림 9). 더구나 뒤에 설명할 미생물 분석결과에 의하면 클로킹을 유발시키는 미생물로 알려져 있는 점액성 세균이 우점하는 것으로 보아 철 수산화/산화 광물의 침전은 미생물이 증식할 수 있는 핵으로 작용할 수 있기 때문에 광물의 침전과 미생물의 증식이 결합된다면 클로킹 가능성이 더욱 상승되는 효과를 가져올 수 있다

지구화학적 통계 분석

통계 분석에서는 지상관측공, 공동 내 관측공, 터널수, 삼출수, 처리수, 지표수의 수질 특성이 서로 구별되는지의 여부와 어떤 수질 항목과 클로킹 평가와 관련된 광물들의 포화지수가 수질 특성을 결정하는지를 알고자 하였다. 이를 위해 1차와 2차 시료에 대해 분산분석과 요인 분석을 수행하였다.

지상관측공, 공동 내 관측공, 터널수, 삼출수,

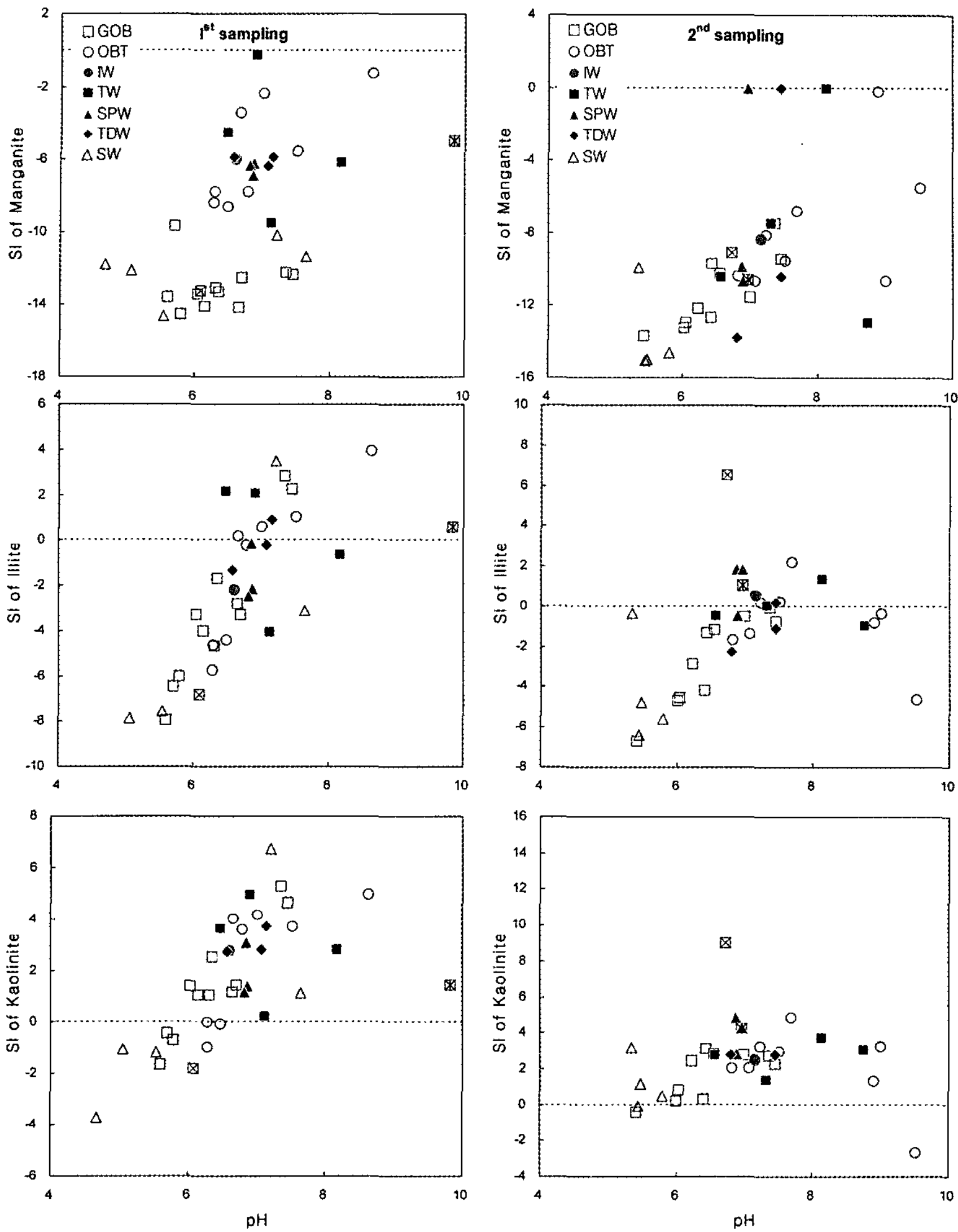


Fig. 9. Plots of pH versus saturation indices (S.I.) of manganite, illite and kaolinite of the water samples from the study area.

처리수, 지표수간의 수질 특성에 차이가 있는지를 알기 위해 분산분석(Analysis of Variance)를 수행하였다. 분산분석은 각 그룹 간 평균을 비교하여 분석하는 방법으로 어떠한 변수가 그룹 간의 차이를 나타내게 하는지 알 수 있다(Leterme *et al.*, 2006). 분산분석의 가설은 ‘각 그룹의 평균은 모두 같다’이며 이에 대한 대립가설은 ‘적어도 하나는 다르다’이다. 본 분석에서 통계분석은 유의수준 95% 이내에서 수행되었기 때문에 유의확률이 0.05 이하면 가설이 기각되어 ‘그룹간의

평균이 적어도 하나는 다르다’라는 결론을 얻게 되며 유의확률이 0.05 이상이면 가설이 채택되어 평균이 같다는 결론을 얻게 된다. 사용된 변수는 pH, Eh, DO, TDS, 알칼리도(Alkalinity), Na, K, Ca, Mg, Si, F, Fe, 방해석의 포화지수(SI_{calcite}), $Fe(OH)_3$ 의 포화지수(SI_{FeOH_3}), 침철석의 포화지수(SI_{goethite}), 적철석의 포화지수(SI_{hematite})를 사용하였으며 인위적 오염 기원이 대부분일 것으로 판단되는 Cl 과 SO_4 는 제외하였다. 또한 자료의 수가 많지 않아서 자료가 정규분포를 만족하지 않

Table 5. Results of the factor analysis

| 1st | Factor | | | 2nd | Factor | | |
|------------------------|--------|------|-------|------------------------|--------|-------|------|
| | 1 | 2 | 3 | | 1 | 2 | 3 |
| pH | | | | pH | 0.91 | | |
| Eh | | 0.93 | | Eh | | -0.68 | |
| DO | | 0.87 | | DO | | | |
| TDS | 0.90 | | | TDS | | 0.79 | |
| Alkalinity | 0.89 | | | Alkalinity | | 0.77 | |
| Na | 0.73 | | | Na | | 0.60 | |
| K | 0.67 | | | K | | 0.62 | |
| Ca | 0.86 | | | Ca | | 0.76 | |
| Mg | | | -0.63 | Mg | | | |
| Si | | | 0.86 | Si | | | 0.83 |
| F | | | 0.70 | F | | | 0.67 |
| Fe | | | | Fe | | | |
| SI _{calcite} | 0.81 | | | SI _{calcite} | 0.84 | | |
| SI _{FeOH3} | | 0.84 | | SI _{FeOH3} | 0.95 | | |
| SI _{goethite} | | 0.84 | | SI _{goethite} | 0.95 | | |
| SI _{hematite} | | 0.84 | | SI _{hematite} | 0.95 | | |

기 때문에 비모수통계인 Kruskal-Wallis test를 사용하였다. 1차와 2차 각각의 분석분석 결과는 표 4에 제시하였다.

1차 조사의 경우 pH, Mg, Si, Fe, 방해석의 포화지수(SI_{calcite})는 유의확률 0.05 이상으로 그룹간의 차이가 없는 것을 보여주고 있으며 나머지 항목은 유의확률 0.05 이하로 그룹간의 차이가 존재함을 보여주고 있다. 이는 그룹 간 수질 특성이 매우 뚜렷함을 보여주는 것으로 판단된다. 2차 조사의 경우에는 DO, Mg, Si, Fe의 유의확률이 0.05 이상으로 그룹간의 차이가 없는 것을 보여주고 있으며 나머지 항목은 그룹간의 차이가 있을 보여주고 있다. 특히 클로킹과 관련된 Fe는 1차와 2차 모두 그룹별로 차이가 없으나 Fe-산화/수산화물로 침전되는데 중요한 변수인 pH와 DO는 변화를 보여주고 있어 이들 변수에 의해 Fe-산화/수산화물의 침전 여부가 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

다음으로 연구 지역의 수질을 결정하는 요인을 파악하기 위해 요인 분석을 수행하였다. 요인분석은 변수들의 상관관계를 통해 수질 특성을 설명할 수 있는 변수들을 새로운 변수(즉, 요인)로

도출하는 다변량 통계분석법이다(Lawrence and Upchurch, 1993; Vega *et al.*, 1998). 요인분석에서 변수들은 -1과 1사이의 값을 가지며, 일반적으로 ± 0.6 이상의 값을 가지면 상관성이 있는 것으로 판단하게 된다. 1차와 2차 수질분석에 대한 요인분석 결과는 표 5에 제시하였다.

1차의 경우 요인 1은 TDS, 알칼리도, Na, K, Ca, 방해석의 포화지수(SI_{calcite})와 매우 높은 상관성을 보여주고 있다. 이들 항목은 주로 물/암석 반응을 나타내는 수질 변수로 요인 1은 물/암석 반응을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 포화지수(SI)와도 높은 상관성을 보여주고 있어 방해석은 Ca와 알칼리도에 의해 포화정도가 결정됨을 알 수 있다. 요인 2의 경우 Eh와 DO가 매우 높은 상관성을 보여주고 있으며 이들은 또한 Fe(OH)₃의 포화지수(SI_{FeOH3}), 침철석의 포화지수(SI_{goethite}), 적철석의 포화지수(SI_{hematite})와 매우 높은 상관성을 보여주고 있기 때문에 요인 2는 산화/환원 조건을 나타내며, Eh 및 철-산화/수산화물의 포화정도는 용존산소에 의해 결정되는 것임을 보여주고 있다. 요인 3은 Si와 F가 매우 높은 상관성을 보여주고 있으며 이는 F가 F를 포함하

는 규산염 광물의 풍화에 기인하고 있음을 나타내고 있다. Mg의 경우에는 Si, F와 역의 높은 상관성을 보여주고 있으나 Mg의 거동특성은 양이온 교환, 점토광물 침전 및 흡착 등에 의해 영향을 받기 쉽기 때문에 이번 통계분석결과로만으로는 이의 관계를 설명하기 어렵다.

2차의 결과는 요인 1의 경우 pH, 방해석의 포화지수(SI_{calcite}), Fe(OH)₃의 포화지수(SI_{FeOH3}), 침철석의 포화지수(SI_{goethite}), 적철석의 포화지수(SI_{hematite})가 매우 높은 양의 상관성을 보여주고 있다. 이는 2차의 경우에는 클로깅과 관련된 광물들의 포화정도를 pH가 조절하고 있음을 나타내고 있다. 요인 2는 물/암석 반응을 나타내는 TDS, 알칼리도, Na, K, Ca가 높은 상관성을 보여주고 있다. Eh는 이들과 음의 상관성을 보여주고 있는데 이는 단순히 물/암석 반응은 심도가 깊어짐에 따라 증가하고 Eh는 심도가 깊어짐에 따라 감소하는 경향을 보여주는 것으로 보인다. 요인 3은 1차와 마찬가지로 Si와 F가 매우 높은 상관성을 보여주고 있다.

이상의 결과들은 2회 분석된 결과이기 때문에 일반적인 결론을 내리기는 어렵지만 클로깅과 관련된 광물들의 포화/침전 정도를 주로 pH, Eh, DO가 결정하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 이들 항목들은 지속적인 관찰이 필요할 것으로 판단된다.

미생물 분석 결과

미생물의 분석역시 총 2회 채취된 시료에 대해 수행하였다. 분석은 채수된 모든 물 시료에 대해 호기성(Aerobic)미생물, 혐기성(Anaerobic)미생물, 점액성(Slime-forming)세균, 황환원(Sulfur-reducing)세균과 총세균의 항목에 대해 실시하였다. 실험의 신뢰도 확보를 위해 동일 시료에 대해 3회의 중복 실험을 실시하였으며 각 분석치에 대한 산술평균을 사용하여 분석 결과를 제시하였다. 분석된 결과를 표 6에 정리하였다.

호기성 미생물은 수중의 용존 산소를 전자수용체로 사용하고 탄화수소를 유기 영양원 이용하는 종속영양 미생물로서 용존산소가 존재하며, 유기성 탄소원이 존재하는 조건에서 손쉽게 발견될 수 있다. 연구지역의 1차시료에서는 호기성미생물이 다소 높은 것으로 측정되었으며, 2공동 공사용 터널수 표면에서 3.0×10^4 CFUs/mL로 가

장 높은 수치를 보이고 있다(표 6).

혐기성미생물은 산소가 존재하지 않는 환경에서 성장하는데 용존산소 이외의 화학적으로 결합된 산소와 수소 등을 전자수용체로 사용하며 유기물질을 이용하여 증식한다. 산화환원전위차(ORP) -200 mV 이하의 환원성조건에서 성장하는 미생물로 황환원균이나 메탄생성균 등이 대표적인 혐기성 미생물이라 할 수 있다. 시료의 분석 결과는 전반적으로 혐기성 세균은 매우 낮은 값(< 92 CFUs/mL)을 나타내고 있으며 많은 시료에서는 검출이 되지 않았다. 동일 지점에서 채수한 1, 2차 시료간에 혐기성미생물 수의 차이가 나타나고 있는데 주로 하절기에 채수한 2차 시료가 1차 시료에 비해 비교적 많은 수의 미생물 수가 분석되고 있다(표 6).

혐기성세균의 일종인 황 환원세균은 자연생태계의 혐기성 조건에서 유기물을 최종적으로 분해하는 역할을 하며 pH 4~9의 범위에서 생존 가능하다. 황환원세균은 전체 시료에서 혐기성 세균과 유사한 수로 발견되고 있으며, 대체로 100 CFUs/mL 이하의 적은 값을 보여주고 있다.

세포 주위에 점액성 물질을 형성하는 점액성 세균은 클로깅을 유발시키는 미생물로 알려지고 있는데 전반적으로 약 $10^2 \sim 10^3$ CFUs/mL 내외의 값을 나타내고 있다.

한천배지에서 성장하는 총세균은 호기성, 혐기성 미생물뿐 아니라 임의성균이라고도 칭하는 통성균까지도 포함하고 있다. 이러한 총세균수는 전체 시료에서 $10^2 \sim 10^4$ CFUs/mL로 나타나고 있다.

이상과 같이 비축기지의 물 시료에서 분석된 미생물은 모든 시료에서 10^5 CFUs/mL 이하의 값을 나타내고 있다. 또한 대부분의 시료에서 호기성 미생물과 점액성 세균이 우점하는 것으로 나타나고 있으며 황환원세균 등의 혐기성균은 대부분 시료에서 적은 양으로 나타나고 있는데, 하절기에 채취한 2차 시료는 1차 시료에 비해 비교적 혐기성 균의 양이 증가한 것으로 나타나고 있다. 그러나 그 차이는 크지 않으며, 특히 관측공과 공동 내 운영수의 미생물 분석결과에서 큰 차이를 보이고 있지 않기 때문에 관측공 및 공동 내에서는 계절변화에 따른 급격한 미생물 증식은 없는 것으로 판단된다. 비록 세포 주위에 점액성 물질을 형성하며 클로깅을 유발시키는 미생물로 알려져 있는 점액성 세균 등이 시료채취 시기 및

Table 6. Results of the microbial analysis for various kinds of waters from the study area

| 1st sampling | | | | | | | 2nd sampling | | | | | | |
|--------------|------------|------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|----------------|--------------|------------------|--------------------|---------------------------|------------------------|----------------|----------|
| | Sample No. | Aerobic Microbes | Anaerobic Microbes | Sulfate Reducing Bacteria | Slime Forming Bacteria | Total Microbes | Sample No. | Aerobic Microbes | Anaerobic Microbes | Sulfate Reducing Bacteria | Slime Forming Bacteria | Total Microbes | |
| GOB | KG 2 | 1.60E+02 | N.D. | N.D. | 1.50E+02 | 2.10E+03 | GOB | KG 2 | 1.20E+02 | 62 | 33 | 1.76E+03 | 3.15E+03 |
| | KG 4 | 8.00E+03 | N.D. | N.D. | 6.60E+03 | 3.03E+04 | KG 4 | 6.00E+01 | 69 | 26 | 4.06E+03 | 4.52E+03 | |
| | KG 7 | 3.00E+03 | N.D. | N.D. | 2.23E+03 | 4.00E+03 | KG 7 | 5.00E+03 | 14 | 14 | 2.00E+03 | 6.64E+03 | |
| | KG 8 | 2.00E+03 | 2 | N.D. | 1.60E+03 | 5.20E+03 | KG 8 | 8.00E+04 | 35 | 20 | 5.85E+03 | 9.65E+04 | |
| | KG 9 | 1.00E+03 | 12 | 1 | 8.90E+01 | 2.60E+03 | KG 9 | 4.80E+02 | 28 | N.D. | 2.28E+03 | 3.63E+03 | |
| | KG 10 | 9.00E+03 | 11 | N.D. | 7.30E+03 | 4.10E+04 | KG 10 | 1.00E+04 | 55 | N.D. | 3.36E+03 | 4.21E+04 | |
| | KG 11L | 1.40E+01 | N.D. | N.D. | 1.10E+01 | 2.20E+02 | KG 11L | 1.00E+03 | 83 | 21 | 2.69E+03 | 3.37E+03 | |
| | KG 11U | 4.00E+03 | 16 | 1 | 2.60E+03 | 2.31E+04 | KG 11U | 3.00E+03 | 76 | 9 | 3.24E+03 | 8.89E+03 | |
| | KG 12L | 4.00E+03 | 10 | N.D. | 1.80E+03 | 6.00E+03 | KG 12L | 1.60E+04 | 24 | 44 | 5.75E+02 | 2.25E+04 | |
| | KG 12U | 2.50E+01 | 6 | N.D. | 1.60E+01 | 1.30E+02 | KG 12U | 7.60E+04 | 97 | 12 | 1.60E+03 | 8.56E+04 | |
| | KG 13L | 2.00E+03 | N.D. | N.D. | 8.20E+02 | 4.80E+03 | KG 13L | 1.00E+03 | 21 | 41 | 1.82E+03 | 2.26E+03 | |
| | KG 13U | 8.00E+00 | N.D. | N.D. | 8.00E+00 | 2.16E+02 | KG 13U | 6.00E+03 | 55 | 25 | 3.13E+03 | 7.75E+03 | |
| | KG 14 | 1.70E+01 | 1 | N.D. | 1.30E+01 | 2.20E+02 | KG 14 | 6.00E+03 | N.D. | 14 | 2.12E+03 | 7.66E+03 | |
| | OBT | KH 13 | 3.00E+03 | 28 | N.D. | 2.30E+03 | 4.10E+04 | OBT | KH 13 | 1.00E+03 | 76 | 62 | 1.18E+03 |
| KH 14 | | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | 1.80E+02 | KH 14 | N.D. | 35 | 33 | 2360 | 3.37E+03 | |
| KH 15 | | 1.00E+03 | 6 | N.D. | 6.40E+02 | 6.30E+03 | KH 15 | 1.00E+03 | 69 | 40 | 2.88E+03 | 4.54E+03 | |
| KH 17 | | 1.00E+03 | N.D. | N.D. | 5.50E+02 | 2.40E+04 | KH 17 | 1.30E+01 | 15 | 32 | 3.02E+03 | 5.49E+03 | |
| KH 18 | | 1.20E+01 | 10 | N.D. | 9.00E+00 | 2.36E+03 | KH 18 | 1.60E+01 | N.D. | 40 | 1.02E+03 | 3.36E+03 | |
| KH 19 | | 1.80E+01 | N.D. | N.D. | 8.00E+00 | 3.10E+02 | KH 19 | 3.10E+01 | 83 | 28 | 1.89E+03 | 2.60E+03 | |
| KH 20 | | 1.00E+03 | N.D. | N.D. | 7.30E+02 | 2.26E+03 | KH 20 | 3.00E+03 | 15 | 21 | 4.72E+02 | 4.41E+03 | |
| IW | IW | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | IW | IW | 8000 | 42 | 7 | 3240 | 9140 |
| TW | 3TGW | 3.00E+03 | N.D. | N.D. | 2.38E+03 | 4.74E+03 | TW | 3TGW | 5.00E+03 | 10 | 4 | 1.84E+03 | 5.70E+03 |
| | 2CTW | 3.00E+03 | 3 | N.D. | 1.90E+03 | 4.11E+04 | 2CTW | 4.00E+03 | 12 | 10 | 9.63E+02 | 4.54E+03 | |
| | 3CTW | 1.00E+03 | 16 | 2 | 8.20E+02 | 2.61E+03 | 3CTW | 2.00E+03 | 12 | 18 | 1.20E+02 | 3.22E+03 | |
| | 2CTWU | 3.00E+04 | N.D. | N.D. | 6.66E+03 | 5.15E+04 | 2CTWU | 1.45E+03 | N.D. | N.D. | 1.61E+03 | 3.33E+03 | |
| SPW | 1SPW | 8.00E+03 | N.D. | N.D. | 4.48E+03 | 2.86E+04 | SPW | 1SPW | 1.00E+03 | 8 | 10 | 1.04E+03 | 3.78E+03 |
| | 2SPW | 7.00E+03 | 2 | N.D. | 5.15E+03 | 1.56E+04 | 2SPW | 2.00E+03 | 41 | 7 | 1.14E+03 | 4.54E+03 | |
| | 3SPW | 1.00E+03 | 2 | N.D. | 7.10E+02 | 2.14E+03 | 3SPW | 2.00E+03 | 15 | 6 | 1.92E+03 | 5.31E+03 | |
| TDW | TSW | 2.00E+03 | 3 | N.D. | 1.53E+03 | 3.85E+03 | TDW | TSW | 1.10E+04 | 48 | 7 | 2.30E+03 | 3.13E+03 |
| | DW | 3.00E+03 | 2 | N.D. | 2.15E+03 | 6.05E+03 | DW | 1.40E+04 | 15 | 16 | 1.25E+03 | 2.15E+04 | |
| | RCW | 1.00E+03 | N.D. | N.D. | 5.30E+02 | 3.30E+03 | RCW | 9.00E+02 | 2 | N.D. | 1.74E+03 | 2.32E+03 | |
| SW | SW1 | 2.50E+03 | 26 | 1 | 2.43E+03 | 4.11E+04 | SW | SW1 | 4.00E+03 | 21 | N.D. | 3.16E+03 | 5.55E+03 |
| | SW2 | 6.00E+03 | N.D. | N.D. | 4.80E+03 | 5.30E+04 | SW2 | 2.00E+03 | 20 | 4 | 1.96E+03 | 3.29E+03 | |
| | SW3 | 7.00E+03 | N.D. | 1 | 5.67E+03 | 5.56E+03 | SW3 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | |
| | SW4 | 1.00E+03 | N.D. | N.D. | 6.30E+02 | 2.38E+03 | SW4 | N.D. | 10 | 13 | 8.82E+02 | 1.25E+03 | |
| | HRW | 1.30E+04 | 12 | 1 | 2.68E+03 | 5.15E+04 | HRW | 3.60E+04 | N.D. | 14 | 9.28E+02 | 4.14E+04 | |

시료의 종류와 상관없이 모든 시료에서 10^5 CFUs/mL 이하의 값을 나타내고 있지만, 장기적 관점에서는 점액성 세균은 수벽공 또는 공사용 터널 내에서 저장공동과 연결된 균열입구부를 클로킹시켜 주입수 흐름을 방해할 가능성이 있는 것으로 예상된다.

결 언

지하유류비축기지의 관측공 및 지하공동 지하수 분석 결과를 토대로 판단되는 광물학적, 지화학적, 미생물학적 클로킹 가능성은 아래와 같이 정리할 수 있다.

1) 물시료들은 대부분 Ca-HCO₃에서 Ca-HCO₃-SO₄유형에 속하며 물시료의 유형에 따른 차이를

보이지 않는다.

2) 방해석을 포함하여 탄산염 광물들은 pH가 증가함에 따라 포화지수 값이 증가하기는 하지만 대부분의 시료에 대해 불포화상태에 있기 때문에 이들에 의한 클로킹 가능성은 낮다.

3) 지상관측공과 지표수를 제외하고 대부분의 시료는 Fe(OH)₃에 대해 포화 및 과포화 상태이며 침철석과 적철석에 대해서는 일부 지상관측공 및 지표수를 제외하고는 모두 과포화 상태에 도달해 있다. 조사지역의 높은 용존산소 농도를 고려할 때 철-산화/수산화 광물이 쉽게 침전될 수 있는 조건임을 나타낸다. 특히 KG-13L 지상관측공의 물시료의 경우에는 지화학적으로 계산된 모든 철-산화/수산화 광물과 더불어 미세한 열극을 충전할 수 있는 점토 광물에 대하여 지상 관측공들

중 가장 높은 포화 지수를 보여주어 이들 광물의 침전에 의한 클로킹 가능성을 지시하고 있다.

4) 지상관측공, 공동 내 관측공, 터널수, 삼출수, 처리수, 지표수간의 수질 특성에 차이가 있는지를 알기 위해 수행한 분산분석과 비축기지 관측공 및 공동 내 운영수의 수질을 결정하는 요인을 파악하기 위해 수행한 요인분석 결과는, 클로킹과 관련된 광물들의 포화/침전 정도를 주로 pH, Eh, DO가 결정하고 있는 것으로 판단된다. 특히 포화지수 계산결과에 의해 클로킹과 관련된 것으로 판단되었던 Fe가 Fe-산화/수산화물로 침전되는데 pH와 DO 변수에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

5) 미생물 분석결과는 대부분의 시료에서 호기성 미생물과 점액성 세균이 우점하는 것으로 나타나고 있으며 황환원세균 등의 혐기성균은 대부분 시료에서 적은 양으로 나타나고 있다.

6) 관측공 및 공동 내에서는 계절변화에 따른 급격한 미생물 증식은 없는 것으로 판단된다. 또한 관측공 지하수의 미생물 분석결과에 의하면 공동 내 운영수들과 큰 차이가 없기 때문에 현상에서는 클로킹 현상에 대한 미생물의 영향이 미약할 것으로 기대되나 일부 지상 관측공(KG4, KG10, KG12L, KG12U)과 공동 내 관측공(KH13, KH17)에서 총 세균수가 다소 높고, 특히 세포 주위에 점액성 물질을 형성하며 클로킹을 유발시키는 미생물로 알려져 있는 점액성 세균이 우점하는 것으로 보아 장기적 관점에서는 점액성 세균은 수벽공 또는 공사용 터널 내에서 저장공동과 연결된 균열입구부를 클로킹시켜 주입수 흐름을 방해할 가능성이 있는 것으로 예상된다.

7) 철 수산화/산화 광물의 침전가능성과 함께 고려하면 광물의 침전은 미생물이 증식할 수 있는 핵으로 작용할 수 있기 때문에 광물의 침전과 미생물의 증식이 결합된다면 클로킹 가능성이 더욱 상승되는 효과를 가져올 수 있다.

8) 현재 지상 관측공들에 대하여 광물 및 미생물에 의한 특별히 높은 클로킹 가능성은 확인되지 않았지만 클로킹 진행은 장기간에 걸쳐 축적되는 현상으로 그 가능성을 항상 고려해야 하며, 지하유류비축기지의 안정적인 운영을 위하여 클로킹 평가와 관련된 체계적이고 장기적인 프로그램이 필요하다.

사 사

미생물분석을 수행하여 주신 우송대학교의 어성욱 교수님께 감사드린다. 아울러 논문을 심사하고 좋은 의견을 주신 전철민 박사님과 익명의 심사위원께 감사드린다. 본 연구는 한국석유공사의 수리안정성 종합진단용역으로 수행되었으며, 일부 교육과학기술부 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었음을 밝힌다.

참고문헌

- 강태섭, 한일영 (1997) 지하 LPG 저장공동에서의 Clogging 추정을 위한 역해석 수치모형, 지하수환경, 4, 161-167.
- 정찬호 (2004) 지하원유비축기지 공동주변 지하수의 수질화학적 변화와 기밀성과의 관계, 지질공학회지, 14, 259-272.
- 최원규 (2005) 지하수질이 LPG 저장 공동의 수리지질학적 특성에 미치는 영향, 한국지구시스템공학회지, 42, 371-377.
- Brown, C.J., Walter, D.A., and Colabufo, S. (1999) Iron in the Aquifer System of Suffolk County, New York, 1990-98. USGS, WRIR 99-4126.
- Burdige, D.J. and Kepkay, P.E. (1983) Determination of bacterial manganese oxidation rates in sediment using an in-situ dialysis technique, I. Laboratory studies, Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 1907-1916.
- Cook, P.G. and Herczeg, A.L. (2000) Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Kluwer Academic Publishers.
- Freeze R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
- Hem, J.D. and Lind, C.J (1983) Nonequilibrium models for predicting forms of precipitated manganese oxides, Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 2037-2046.
- Houben, G.J. (2003) Iron oxide incrustations in wells. Part 1. genesis, mineralogy and geochemistry, Applied Geochemistry, 18, 927-939.
- Kim, T., Lee, K.-K., Ko, K.S., and Chang, H.W. (2000) Groundwater flow system inferred from hydraulic stresses and heads at an underground LPG storage cavern site, Journal of Hydrology, 236, 165-184.
- Lawrence, A.R. and Upchurch, S.B. (1993) Identification of recharge areas usign geochemical factor analysis, Ground Water, 20, 680-687.
- Leterme, B., Vanclooster, M., Rounsevell, M.D.A., and Bogaert, P. (2006) Discriminating between point and non-point sources of atrazine contamination of a sandy aquifer, Science of the Total Environemnt, 362, 124-142.

- Mustoe, G.E. (1981) Bacterial oxidation of manganese and iron in a modern cold spring, *Geol. Soc. of Am. Bull.*, Part 1, 92, 147-153.
- Nordstrom, D.K. Ball, J.W. Donahoe, R.J., and Whittemore, D. (1989) Groundwater chemistry and water-rock interaction at Strip, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 1727-1740.
- Parkhurst, D.L. (1995) User's guide to PHREEQC-A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations, U. S. Geol. Surv., Water-Res. Invest. Report 95-4227.
- Reed, M.H. (1982) Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 513-528.
- Robinson, B.W. and Bottrell, S.H. (1997) Discrimination of sulfur sources in pristine and polluted New Zealand river catchment using stable isotopes, *Applied Geochemistry* 12, 305-319.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D. (1980) *Water Chemistry*, John Wiley & Sons, N. Y.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1996) *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, John Wiley & Sons, INC.
- Urrutia, M.M. and Beveridge, T.J. (1994) Formation of fine-grained metal and silicate precipitates on a bacterial surface (*Bacillus subtilis*), *Chemical Geology*, 116, 261-280.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E., and Debn, L. (1998) Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Research* 32, 3581-3592.
-
- 접수일(2008년 5월 9일), 수정일(1차 : 2008년 5월 23일), 게재확정일(2008년 5월 23일)