

돼지사체 매몰지역 지하수의 수지구화학 특성: 침출수 누출 판단

오준섭¹ · 김호림² · 이정호¹ · 김경호³ · 최광준⁴ · 김현구⁵ · 윤성택^{1,2*}

¹고려대학교 지구환경과학과

²고려대학교 KU-KIST 그린스쿨대학원

³한국환경정책평가연구원

⁴한국농어촌공사

⁵국립환경과학원

Hydrochemical Characteristics of Groundwater in an Area Affected by Pig Carcass Burial: Leakage Detection

Junseop Oh¹ · Ho-rim Kim² · Jeong-Ho Lee¹ · Kyoung-ho Kim³ · Kwang-jun Choi⁴

Hyeon-Koo Kim⁵ · Seong-Taek Yun^{1,2*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University

²KU-KIST Green School, Korea University, Seoul

³Korea Environmental Institute, Sejong

⁴Korea Rural Community Corporation, Naju

⁵Korea National Institute of Environmental Research, Incheon

ABSTRACT

To evaluate potential impacts of shallow groundwater by the leachate from buried carcass, we investigated hydrochemical characteristics of both leachate and shallow groundwater from monitoring wells and surrounding shallow groundwater wells in an area potentially affected by pig carcass burial. The hydrochemical survey was conducted before and after the relocation of a burial pit. The leachate samples and the groundwater affected by leachate showed the hydrochemistry of Ca-HCO₃ type with high NH₄⁺ concentrations, while unaffected groundwater was mostly the Ca(Na)-Cl+NO₃ type due to pervasive impacts from agrochemicals. The results of factor analysis on hydrochemical data showed the followings: 1) contamination of groundwater from agro-livestock farming and livestock burial are coexisting in the study area, 2) among ionic species, HCO₃⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ and Mn are very useful to differentiate the groundwater contamination from leachate, and 3) groundwater contamination by leachate has been recognized around the monitoring wells even after the relocation of a burial pit, likely due to residual contaminants in surrounding soils. Therefore, it is suggested that continued monitoring of groundwater contamination should be conducted after the relocation of carcass burial pits.

Key words : Groundwater contamination, Carcass burial, Hydrochemical monitoring, Leakage indicators

1. 서 론

2010년 12월에서 2011년 4월에 걸쳐 발생한 구제역 (Foot and Mouth Disease)으로 인하여 제주와 전남을 제외한 전국의 약 4,600개소의 매몰지에 약 340만 마리의 폐사축이 긴급 매몰 처리되었다. 긴급한 매몰로 인하여 일부 매몰지 주변에서는 침출수 유출로 인한 지하수오염 우

려가 지속 제기되어 왔다(Ko et al., 2012; Choi et al., 2013; Kim et al., 2014). 매몰지 내 가축 사체의 부패로 발생하는 침출수는 병원성 미생물을 함유하고 전형적인 환원 특성(즉, 낮은 산화-환원전위 및 용존산소)을 나타내며, 높은 전기전도도(EC)와 고농도의 암모니아성 질소(NH₃-N) 및 기타 다양한 무기이온(Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄ 등)을 함유하는 것으로 보고되었다(MacArthur et

*Corresponding author : styun@korea.ac.kr

Received : 2017. 11. 14 Reviewed : 2017. 12. 24 Accepted : 2018. 1. 16

Discussion until : 2018. 4. 30

al., 2002; Pratt, 2009; Kang et al., 2012; Ko et al., 2012; Choi et al., 2013; Joung et al., 2013; Yuan et al., 2013). 이러한 수질특성으로 인해 매몰지 침출수가 주변으로 유출되면 지하수계에 위해를 가할 수 있다.

해외에서는 침출수 유출이 지하수계에 미치는 영향에 관하여 일부 연구가 수행되었다. Glanville(2000)은 토양 조건이 다른 2개의 실험 매몰지에서 모니터링을 수행하여 생화학적 산소요구량(BOD), $\text{NH}_3\text{-N}$, 총용존고체(TDS) 및 Cl이 매몰지 내부 혹은 아주 가까운 지점에서 높은 농도로 관측되었음을 확인하였고, 특히 Cl이 가축 매몰과 관련한 지하수오염을 효과적으로 지시하는 인자임을 언급하였다. Ritter와 Chimsid(1995)는 조류 사체를 매몰한 지역에서의 연구를 통해 질소계 물질이 박테리아에 의한 오염보다 더 강하게 나타나고, 매몰 사체의 규모가 클수록 오염은 커질 수 있음을 보고하였다.

우리나라 환경부에서는 가축매몰지 주변 지하수의 수질 실태를 파악하고 수질의 안전성을 확보하기 위하여 “가축매몰지 환경조사지침(Ministry of Environment, 2013)”을 마련하였다. 지침에는 ‘침출수의 유출을 모니터링하기 위하여 매몰지 조성 후 반드시 지하수 흐름을 고려하여 이격거리 5 m 이내에 1개소 이상의 관측(감시)정을 설치하고, 염소이온, 암모니아성질소, 질산성질소, 총대장균군, 전기전도도 등의 조사대상 수질 항목을 지정하여 모니터링을 수행할 것’을 명기하였다. 나아가 암모니아성질소, 염소이온, 전기전도도의 검출 농도를 활용하여 매몰지 침출수 유출을 판단하기 위한 단계별 해석 요령을 제시하였다.

그렇지만, 국내 매몰지의 대부분이 농업지역에 위치하고 있어, 기존의 농업활동에 의해 발생하는 다양한 무기이온(Ca, Mg, K, Cl, SO_4 , NO_3 등)의 농도 증가(Böhlke, 2002)로 인해 침출수 유출로 인한 지하수오염을 구분해 내기가 용이하지 못하다. 따라서 농축산활동에 의한 지하수오염을 침출수로 인해 발생하는 오염과 효과적으로 판별하기 위한 방법에 관한 연구가 필요한 실정이다.

이에, 본 연구에서는 침출수 유출이 의심된 어느 돼지매몰지지역의 관측(감시)정과 주변 천부지하수를 대상으로 수화학 특성 분석 연구를 수행함으로써, 가축매몰지 침출수의 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위하여, 1) 침출수의 수질(수화학) 특성을 분석하여 오염원의 특징을 정의하고, 2) 매몰지 주변의 침출수 유출을 감지하기 위한 관측정과 함께 주변 이용 관정에서 지하수를 채수 및 분석하여 각각의 수화학 특성을 비교 분석하였고, 3) 다변량 통계기법인 요인분석을 수행하여 침출수 누출을 효과적으로 판단하기 위한 적절한 수화학 인자를 제시하고 매몰지 이설 전후의 오염 현황을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역

연구지역은 경기도에 위치하고 있으며(Fig. 1), 2011년 해당 지역의 연평균 온도와 강우량은 각각 11°C , 2045 mm이고 7월에 861 mm의 강우가 집중되었다(Korea Meteorological Administration, 2011). 지질은 제4기 충

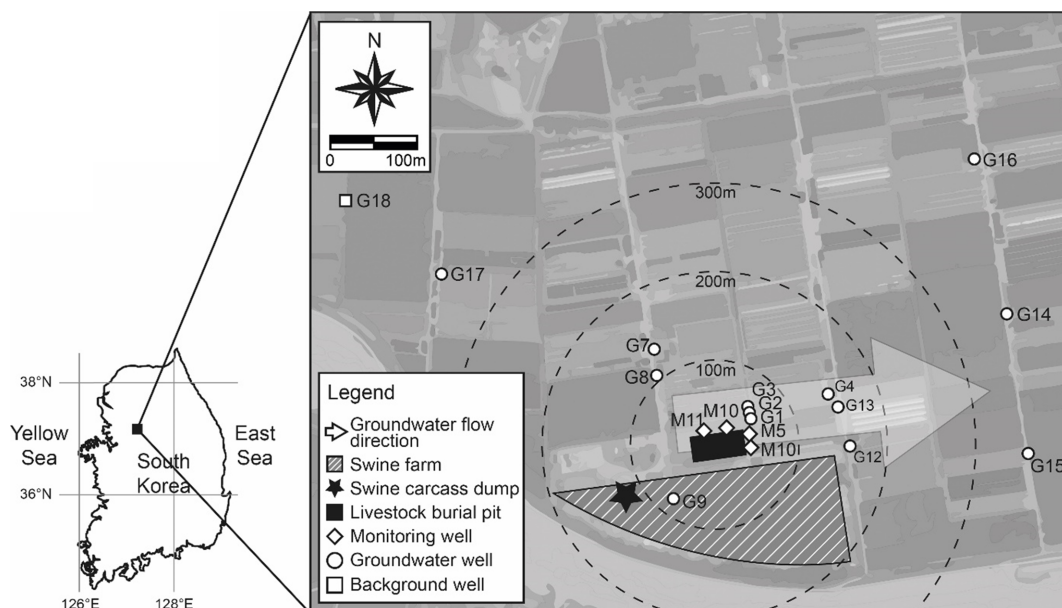


Fig. 1. Location of monitoring wells and groundwater wells in the study area.

적층으로 이루어지며, 표토는 미사질 양토 및 양토, 심토는 미사 식양질 및 사양질로 구성되어 있다(Yeo and Im, 1974; KSIS, 2017). 연구지역의 남쪽에는 한강의 지류인 소규모 하천이 서에서 동쪽방향으로 흐르며, 하천 주변에 대규모 축사가 위치하고 있다. 축사 주변에서는 비닐하우스 및 논농사 중심의 경작이 시행되고 있다. 연구지역의 고도(해발고도 기준)는 서쪽과 북쪽이 48~50 m, 동쪽이 44~46 m이며, 따라서 지하수 흐름은 동쪽 방향으로 완만한 흐름을 가질 것으로 판단된다.

연구지역의 매몰지는 2011년 1월 15~18일에 조성되었다. 매몰지 면적은 약 1900 m²에 달하며, 돼지 약 9천마리가 매몰되었다. 매몰지 조성 당시에는 침출수를 취득할 수 있는 유공관은 설치되지 않았다. 악취 및 지하수질에 대한 지역 주민의 지속적인 항의로 인하여 본 매몰지는 2011년 3월 22~24일에 철거되었고, 매몰지 내 사체는 인접 축사 내의 축분처리장으로 이설되었다.

2.2. 현장조사 및 수질분석

본 연구를 위한 수질조사는 2011년에 두차례에 걸쳐 수행되었다(Fig. 1) 1차 조사는 매몰지 이설 이전인 3월 12일에 수행되었는데, 매몰지 인근에 설치되어 지속적으로 양수 중이던 4개의 관측정과 더불어 해당지역에 산재한 14개 지하수 관정을 대상으로 조사 및 분석을 실시하였다. 주변 지하수 관정 중에서 지하수 흐름 방향과 반대쪽에 위치하며 매몰지로부터 가장 먼 거리에 위치한 관정(G18)을 선정하여 매몰지 침출수 영향 등 인위오염과 비교하기 위한 목적의 배경 관정으로 선정하였다. 2차 조사는 매몰지 이설 이후인 동년 9월 30일에 수행되었는데, 매몰지 이설 이후의 수질영향을 파악하기 위해 이설 이후에도 남아있던 4개의 관측정과 10개의 주변 지하수 관정을 대상으로 실시하였다. 2차 조사 시에는 매몰지 침출수 유출 우려로 인해 상수도가 설치되었고 농업이 완료되는 시기였기에 배경 관정(G18)을 포함한 일부 지하수 관정(G2, G16, G17)의 조사는 불가능하였다. 한편, 해당 매몰지의 설치 특성과 조기 이설로 인하여 침출수를 직접 취득할 수 없었으며, 그 대신 조사기간 중이던 동년 7월에 인근의 동일 축종 5,100두를 매몰한 인근 매몰지에서 유공관을 통해 침출수를 채수하여 분석하였다.

침출수 및 지하수의 채수와 동시에 현장에서는 온도, pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO), 알칼리도, 암모늄 이온(NH₄⁺) 및 2가철(Fe²⁺)의 측정 및 분석을 수행하였다. 온도, pH, Eh, EC, DO 측정은 Thermo Fisher Scientific사의 Orion 5 star plus meter

를 이용하였다. 알칼리도는 0.05 노르말 농도의 질산용액을 사용한 적정법(APHA, 1995)을 사용하여 현장에서 측정하였으며, 암모늄 이온과 2가철은 HACH사의 DR890 Colorimeter를 이용하여 분석하였다. 분석결과의 신뢰성을 확보하기 위해 모든 기기는 매뉴얼에 따라 항목별 보정 절차를 거친 후 사용하였다.

수질분석 시료 채취는 대표성을 확보하기 위해 충분히 양수한 후 수행하였으며, 양이온과 음이온 분석용 시료는 각각 60 ml씩 채수하였다. 채수 시료는 동일 압력 하에서 공극 크기 0.45 µm인 셀룰로오스 질산염 막필터에 통과시켜 부유물질을 제거한 후 폴리에틸렌 용기에 담았다. 특히, 양이온 분석용 시료에 대해서는 채수 용기 표면에서 발생하는 양이온의 흡착과 용존 이온의 침전 및 미생물의 성장과 산화를 방지하기 위해 농질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 채수 시료의 실내 분석을 위한 운반 과정에서는 아이스박스과 냉장고를 이용하여 항상 4°C의 저온 상태를 유지하였다. Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Mn (Total) 등 양이온의 정량 분석은 Perkin Elmer사의 유도 결합플라즈마 방출분광분석기(ICP-AES, Model XL3000)를, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ 등 음이온 정량 분석에는 Dionex사의 이온크로마토그래피(IC, Model 120)를 사용하였다. 분석결과에 대해서는 전하균형식(Charge balance error)을 이용하여 데이터의 품질관리를 수행하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 매몰지 침출수의 수질 특성

본 연구를 위해 획득한 주변 매몰지 침출수의 수화학 분석 결과를 기존의 연구 사례(MacArthur et al., 2002; Pratt, 2009)에서 보고된 침출수 분석 결과와 비교하여 Table 1에 제시하였다. pH는 5.73으로 생활용 지하수 수질기준 최소치인 5.8에 비해 약간 낮은 값을 보이고 있다. Eh와 DO는 각각 173.3 mV과 0.01 mg/L로서 전형적인 환원환경을 나타내고 있으며, 이러한 양상은 유기물(사체)이 많고 산소가 유입되지 않는 매몰환경에서의 사체 분해 과정 중 미생물의 활동에 의한 것으로 보인다. EC는 4,470 µS/cm로서 매우 높은 값을 보이고 있으나, 해외 사례에서 보고된 수치에 비해서는 낮다. NH₄⁺는 기축매몰지 침출수에서 고농도로 검출되는 대표적인 오염물질이며, 폐기물 매립지 내 유기물의 분해 과정에 관한 기존 연구에서도 유기물 내 단백질의 호기성 분해로 형성된 아미노산의 혐기성 분해에 의해 생성되는 것으로 보고하고 있다(McBean, Rovers and Farquhar, 1995). 본 연구에서 획

Table 1. Chemistry of leachate from a nearby burial pit

Parameter	This study	Average value (MacArthur et al., 2002)	Average value (Pratt, 2009)
Temp (°C)	14.1	-	-
pH	5.73	6.9	6.70
Eh (mV)	173.3	-	-
EC (μs/cm)	4470	11210	41300
DO (mg/L)	0.01	-	-
NH ₄ ⁺ (mg/L)	17.4	3294 ^{a)}	10188.7 ^{a)}
Fe ²⁺ (mg/L)	92.0	52	36.3
Ca ²⁺ (mg/L)	739.03	200	46.43
Mg ⁺ (mg/L)	180.44	-	30.00
Na ⁺ (mg/L)	100.63	-	2000.00
K ⁺ (mg/L)	198.87	-	2528.57
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	2163.06	11935 ^{b)}	42314.29
Cl ⁻ (mg/L)	165.94		2537.86
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	21.83		4342.86
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.55	2.1	7.39
Mn (Total) (mg/L)	120.04	-	0.67

a) NH₃-N (mg/L) b) Alkalinity as CaCO₃

득한 침출수의 NH₄⁺ 농도는 17.4 mg/L로서 먹는물 수질 기준에 비해서는 매우 높지만, 기존에 보고된 값에 비해서는 크게 낮은 값을 보이고 있다. Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺는 모두 100 mg/L 이상의 고농도로 관측되었으며, Na⁺와 K⁺는 기보고된 농도(각각 2000 mg/L와 2528.57 mg/L)에 비해서는 크게 낮다. 특이할 사항으로 Ca²⁺가 739.03 mg/L로 기존의 보고된 수치에 비해 높은데, 이는 pH 조절을 통한 구제역 바이러스의 불활화(Park et al., 2009)를 위해 매몰 당시 사체와 함께 다량 투입된 생석회(CaO)의 용해에 의한 결과로 판단된다.

침출수의 HCO₃⁻ 농도는 2,163.06 mg/L로 높으며 사체 내 유기물이 분해되면서 HCO₃⁻를 형성하는 전형적인 침출수 특징(Pratt, 2009)을 보인다. Cl⁻와 SO₄²⁻는 각각 165.94 mg/L와 21.83 mg/L로서 기보고된 수치에 비해서는 낮다. NO₃⁻는 0.55 mg/L로서 낮은 농도를 보이고 있는데, 이는 매몰지 내 질소가 유기물이 풍부한 환원상태에서는 NH₄⁺ 형태로 용출되는 특징을 보여주기 때문이다. 용존 Mn(Total)는 120.04 mg/L로 매우 높은 값을 농도를 보였는데, 사체 조직의 Mn 함량을 보고한 기존의 연구사례(Nutsch et al., 2004; Rozeboom, 2014)를 고려하면 해당 농도는 사체에서 기인한 것으로 보인다.

본 연구에서 획득한 가축매몰지 침출수의 수질특성을 전체적으로 평가하여 보면, 전반적으로 낮은 Eh 및 DO 값과 함께 높은 용존 무기성분을 함유한 전형적인 침출수의 특징을 보임을 알 수 있다. 그러나 Ca²⁺는 기존 사례

에 비해 높은 농도를 보였으며, NH₄⁺ 등 다수의 관측 항목은 기존 보고자료에 비해 낮은 편이었다. 본 침출수를 채수한 7월에는 861 mm에 이르는 다량의 강우가 내렸으며, 따라서 매몰지 내 침출수가 강우에 의한 희석을 받아 생석회의 용해에 기인하는 Ca²⁺를 제외하고는 대부분의 용존이온들이 상대적으로 낮은 농도를 갖게 된 것으로 판단된다.

3.2. 관측점 및 주변 관정 지하수의 수질 특성

Table 2는 관측점과 주변 관정 지하수에 대하여 조사시 기별 분석 결과의 기술통계량(최소값, 중앙값, 최대값, 평균, 최대값)과 함께 배경 관정 지하수의 항목별 분석 값을 정리하여 기재한 것이다. 각 분석 결과의 전하 균형값은 ±9% 범위로 확인되었으며, 검출 한도(detection limit) 미만 값으로 측정된 일부 항목(NH₄⁺, Fe²⁺, NO₃⁻, Mn(Total))은 검출한도 미만의 절반 값을 기입하여 보고하였다. 또한, 매몰지 관측점과 주변 관정 지하수 간의 항목별 농도 차이를 정량적으로 평가하기 위하여 비모수 검정기법의 하나인 Mann Whitney U-test(95% 신뢰 수준)를 적용하고 도출된 p-value 값을 함께 기재하였다.

3.2.1. 현장 측정 항목

매몰지 관측점 및 주변 관정 지하수의 평균 온도는 1차 조사에서 각각 12.33°C와 12.34°C로 나타났고, 2차 조사 시기에서는 각각 16.45°C와 16.84°C로 나타났다. 동일 조

Table 2. Statistical summary of water quality parameters for groundwater samples from monitoring wells and preexisting groundwater wells

Parameter	Sampling time	Monitoring wells					Surrounding Groundwater wells					Background well value	Statistical difference (P-value ^c)
		Min.	Median	Max.	Mean	STD	Min.	Median	Max.	Mean	STD		
Temp (°C)	1st ^{a)}	12.00	12.15	13.00	12.33	0.46	8.70	12.50	14.50	12.34	1.83	8.40	0.915
	2nd ^{b)}	15.10	16.20	18.30	16.45	1.42	13.40	16.80	20.70	16.84	2.01		0.777
pH	1st	6.58	6.76	6.89	6.75	0.13	6.35	6.76	7.21	6.75	0.24	6.94	0.750
	2nd	6.46	6.62	6.72	6.60	0.12	6.22	6.61	7.16	6.65	0.31		0.944
Eh (mV)	1st	213.10	224.40	261.60	230.88	21.31	316.90	527.30	685.20	525.00	131.44	432.40	0.003
	2nd	157.50	244.20	338.70	246.15	75.02	254.30	361.25	531.20	360.43	93.07		0.047
EC (μS/cm)	1st	250.00	385.50	456.00	369.25	88.28	178.70	276.00	376.00	271.64	68.62	173.60	0.038
	2nd	241.00	374.50	623.00	403.25	161.13	196.30	288.00	368.00	278.43	55.53		0.077
DO (mg/L)	1st	3.57	3.77	4.13	3.81	0.28	1.49	2.84	6.07	3.03	1.19	6.99	0.152
	2nd	1.35	2.29	3.38	2.33	0.90	1.24	2.19	5.03	2.59	1.26		0.944
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1st	6.83	12.37	14.81	11.59	3.69	0.01	0.36	8.24	1.87	2.59	0.01	0.005
	2nd	1.03	2.64	16.74	5.76	7.37	0.01	0.08	3.86	0.58	1.18		0.018
Fe ²⁺ (mg/L)	1st	0.02	0.13	3.20	0.87	1.56	0.02	0.06	3.80	0.38	1.04	0.09	0.411
	2nd	0.32	1.00	2.98	1.32	1.22	0.03	0.20	1.89	0.54	0.65		0.137
Ca ²⁺ (mg/L)	1st	26.32	46.58	51.66	42.79	11.24	24.40	32.85	61.62	35.57	10.34	26.89	0.265
	2nd	22.57	37.47	75.97	43.37	22.86	20.40	29.37	39.84	29.80	6.97		0.229
Mg ²⁺ (mg/L)	1st	5.87	8.30	8.97	7.86	1.38	5.61	6.64	9.53	7.07	1.32	5.70	0.367
	2nd	5.00	9.09	16.19	9.84	4.70	4.20	6.48	8.28	6.40	1.42		0.138
Na ⁺ (mg/L)	1st	22.24	39.87	42.45	36.11	9.39	21.07	29.53	51.55	33.35	11.62	22.18	0.710
	2nd	19.10	29.89	42.36	30.31	9.51	6.56	22.26	39.02	25.24	10.87		0.525
K ⁺ (mg/L)	1st	0.59	2.86	10.74	4.26	4.78	0.19	0.54	12.76	3.00	4.16	0.28	0.265
	2nd	5.11	12.48	13.85	10.98	3.99	1.29	5.54	10.75	5.28	2.68		0.056
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	1st	118.98	178.48	207.46	170.85	40.07	61.02	91.53	193.73	100.44	36.48	51.86	0.013
	2nd	99.15	156.36	358.48	192.59	113.84	79.32	89.24	163.22	105.10	29.27		0.056
Cl ⁻ (mg/L)	1st	28.78	51.06	51.17	45.52	11.16	29.09	40.93	68.68	45.29	15.56	29.51	0.958
	2nd	31.67	46.66	57.34	45.58	13.16	11.96	35.58	55.61	36.57	12.48		0.179
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1st	8.73	20.15	24.68	18.43	6.86	9.08	19.48	39.35	22.75	9.08	17.10	0.791
	2nd	19.42	24.92	33.58	25.71	6.87	14.43	22.74	32.60	22.61	6.57		0.437
NO ₃ ⁻ (mg/L)	1st	1.61	2.73	4.49	2.89	1.45	0.67	16.31	23.94	12.49	9.13	22.78	0.152
	2nd	0.00	0.73	4.56	1.51	2.07	0.00	10.57	22.64	10.40	6.63		0.034
Mn (Total) (mg/L)	1st	1.54	5.96	8.34	5.45	2.89	0.01	0.29	2.65	0.70	0.82	0.00	0.009
	2nd	0.46	2.64	13.17	4.73	5.73	0.00	0.34	1.48	0.39	0.44		0.028

a) 1st sampling, b) 2nd sampling, c) Calculated by Mann-Whitney U test

사 시기 내 관정별 온도 차이는 없는 것으로 나타났다. 1차 시기에 비해 2차 시기의 온도가 높은 것은 조사 기간의 평균 기온의 차이(3.4°C와 19.6°C)를 반영하기 때문이다. pH 범위는 관측정과 주변 관정 지하수 간, 그리고 조사 시기별로 유의한 차이를 보이지 않았다.

관측정과 주변 관정 지하수의 Eh의 평균값은 1차 조사 시기에서 각각 230.88 mV와 525.00 mV, 그리고 2차 시기에서는 각각 246.15 mV와 360.43 mV로 나타났다. 배경 관정 지하수의 Eh는 432.40 mV로서 주변 관정 지하

수의 범위(316.90~685.20 mV) 내에 포함되는 것으로 확인되었다. 1차 시기와 2차 시기 모두에서 관측정 지하수의 Eh가 주변 관정 지하수에 비해 낮게 관측되었고, p-value도 0.05 미만으로서 유의한 차이를 나타내었다. 따라서 1차 조사 시기의 관측정 지하수의 Eh는 가축 매몰의 영향으로 인한 환원 상태를 명확히 보여주었다. 2차 조사 시기(매몰지를 철거 이설한 이후)에서도 관측정에서는 매몰 부지 내에 잔존하는 오염으로 인해 환원상태가 지속되고 있는 것으로 판단된다.

관측정 및 주변 관정 지하수의 EC의 평균값은 1차 시기에서 각각 369.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 와 271.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 2차 시기에서는 각각 403.25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 와 278.43 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났다. 전반적으로 1차 조사 시기에 비해 2차 조사 시기에서 EC 값이 높게 관측되었다. 1차 시기의 배경 관정 지하수는 173.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타났다. 지하수의 EC는 온도가 1°C 증가할 때 2% 증가하는 것으로 보고되었으며(Hem, 1985), 따라서 조사 시기별 EC 차이는 주로 온도 차에 의한 것으로 판단된다. 특히, 1차 시기에서 관정 유형별로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며, 관측정, 주변 관정, 배경 관정의 순으로 낮아지는 경향을 보였다.

관측정 및 주변 관정 지하수의 DO의 평균값은 1차 시기에서 각각 3.81 mg/L와 3.03 mg/L(배경 관정 지하수는 6.99 mg/L)로, 그리고 2차 시기에서는 각각 2.33 mg/L와 2.59 mg/L로 나타났다. 비모수 검정 결과 두 조사시기 모두에서 관정 간의 유의한 차이를 보이지는 않았으나, 1차 시기의 경우에 관측정과 주변 지하수 관정이 배경 지하수 관정에 비하여 낮은 DO 값을 갖음을 확인할 수 있다. 축산활동에서 발생하는 유기물의 분해과정에서 용존산소의 감소가 일어나는 것은 잘 알려진 사실이며(Hooda et al., 2000), 따라서 관측정과 주변 지하수 관정 간의 유의하지 않은 DO 농도의 차이는 광범위한 인위오염(축산활동 기원)에 의해 주변 관정이 영향을 받고 있기 때문으로 판단된다.

NH_4^+ 의 경우, 관측정 및 주변 관정 지하수 내 평균값은 1차 시기의 경우 각각 11.59 mg/L와 1.87 mg/L였으며, 배경 관정 지하수에서는 검출한계 미만으로 나타났다. 특기할 점으로서 관측정과 주변 관정 지하수 간에 NH_4^+ 농도가 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 관측정과 주변 관정 지하수 내 NH_4^+ 의 최대값이 수질기준치(0.05 mg/L)를 크게 상회하고 있다. 이는 매몰지에서 유출된 침출수가 주변 지하수에 영향을 미치고 있음을 지시한다. 한편, 2차 조사 시기에는 관측정과 주변 관정 지하수의 NH_4^+ 의 평균 농도가 각각 5.76 mg/L 및 0.58 mg/L로 나타났다. 즉, 오염원인 매몰지가 철거 이설된 이후에도 전반적으로 NH_4^+ 의 농도 수준은 1차 시기에 비해 크게 줄어들었지만 여전히 높은 농도 수준을 유지하고 있다.

Fe^{2+} 의 경우, 관측정 및 주변 관정 지하수에서 평균값은 1차 시기에서는 각각 0.87 mg/L와 0.38 mg/L(배경 관정 지하수는 0.09 mg/L), 2차 시기에서는 각각 1.32 mg/L와 0.54 mg/L로 나타났다. 1차 시기에서 일부 관측정과 주변 관정 지하수에서 수질기준(0.3 mg/L)을 초과하였지만, 관정 간의 유의한 차이는 나타나지 않았다.

3.2.2. 무기 이온 특성

Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ 의 기술통계량을 비교한 결과, 조사 시기 간의 특징적인 농도 차이는 나타나지 않았다(Table 2). 그러나 관측정과 주변 관정 지하수 간에는 1차 및 2차 시기 모두에서 4개 이온종 모두가 평균값과 중앙값에서 관측정에서 높게 나타났다. 그렇지만, 4개 이온종의 관측정에서의 농도 범위는 주변 관정 지하수에서의 농도 범위 내에 속하고 있으며, 오히려 1차 시기의 Ca^{2+} 와 Na^+ 의 최대값은 주변 관정 지하수에서 높게 관측되고 있다. 이러한 결과는 기축 매몰지에 의한 4개 양이온의 부하는 연구지역 내 기존의 농업 및 축산 활동에 의한 부하를 상회할 정도로 뚜렷하지는 않음을 지시한다.

HCO_3^- 의 경우, 관측정 및 주변 관정 지하수에서의 평균값은 1차 조사 시기에서 각각 170.85 mg/L와 100.44 mg/L(배경 관정 지하수는 51.86 mg/L)로 나타났다. P-value는 0.013으로서 관측정과 배경 관정 지하수 간에 유의한 차이가 있음을 보여주었으며, 관측정, 주변 관정, 배경 관정 순으로 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있다. 2차 조사시기에서는 관측정과 주변 관정 지하수 간에 유의한 차이는 보이지 않았으나, 관측정의 최댓값은 358.48 mg/L로 매우 높은 값을 보였다. 전반적으로 관측정 지하수의 HCO_3^- 가 주변 관정 지하수에 비해 고농도로 관측되었는데, 이러한 차이는 침출수 내의 유기물이 분해된 이후에 HCO_3^- 의 형태로 변화하기 때문이다.

Cl^- 의 경우, 관측정 및 주변 관정 지하수에서 평균값이 1차 조사 시기에서 각각 45.52 mg/L와 45.29 mg/L(배경 관정 지하수는 29.51 mg/L)로 나타났다. 2차 조사시기에서는 관측정 및 주변 관정 지하수에서의 평균값이 각각 45.58 mg/L와 36.57 mg/L였다. Cl^- 이온은 물 환경에서 대표적인 보존성 원소이며, 따라서 지하수의 수질 변화를 파악하고 오염물질의 기원을 추적하는데 있어 유용한 인자이다. 관측정이 침출수의 영향을 강하게 받았다면 주변 관정 지하수에 비하여 매우 큰 농도 차이를 보일 것으로 예상되었으나, 관측정과 주변 관정 지하수는 배경 관정 지하수에 비해서는 명확히 높지만 두 집단 간에는 유의한 차이를 보이지 않았다. Cl^- 는 농업 및 축산활동에 의해서도 증가할 수 있는 인자이며(Böhlke, 2002), 따라서 관측정 지하수와 주변 관정 지하수 간의 유의하지 않은 농도 차이는 관측정 지하수 수질의 희석효과 혹은 주변 오염원(농업 및 축산활동 기원)으로부터의 Cl^- 의 유입 때문으로 생각된다.

SO_4^{2-} 의 경우, 관측정 및 주변 관정 지하수의 평균값은 1차 조사시기에서 각각 18.43 mg/L와 22.75 mg/L(배경 관

정 지하수는 17.10 mg/L로 나타났다. 2차 조사시기에서는 관측정 및 주변 관정 지하수의 평균값은 각각 25.71 mg/L와 22.61 mg/L였다. 조사 시기 간의 차이는 확인되지 않았으며, 관측정과 주변 관정 지하수 간에도 유의한 차이를 보이지 않았다. 관측정 지하수에서의 낮은 SO_4^{2-} 농도는 환원환경 조성에 의한 황산염 환원 때문으로 해석할 수 있다. 반면, 주변 관정 지하수에서의 SO_4^{2-} 의 부화는 농업 및 축산업 등 인위활동에 의한 결과로 보인다. 따라서 매몰지 침출수 영향을 파악함에 있어 SO_4^{2-} 의 부화는 적절한 지표가 될 수 없음을 알 수 있다.

NO_3^- 의 경우, 1차 조사 시기 관측정과 주변 관정 지하수에서의 평균값은 각각 2.89 mg/L와 12.49 mg/L(배경 관정은 22.78 mg/L)로 나타났고, 2차 조사 시기에서의 관측정과 주변 관정 지하수에서의 평균값은 각각 1.51 mg/L와 10.40 mg/L였다. 조사 시기 간 농도의 차이는 뚜렷하지 않지만, 관측정에서 주변 관정 지하수에 비해 농도가 현저하게 낮음을 알 수 있다. 매몰지 침출수의 영향을 받은 관측정에서 NO_3^- 농도가 낮게 유지되는 것은 환원환경의 조성으로 인한 NO_3^- 의 환원(탈질)의 결과로 판단된다.

Mn의 경우, 1차 조사시기 매몰지 관측정 및 주변 관정 지하수에서의 용존 망간의 농도 평균값은 각각 5.45 mg/

L 및 0.70 mg/L이었고, 배경 관정 지하수에서는 Mn은 검출되지 않았다. 2차 조사시기 관측정 및 주변 관정 지하수에서의 망간 농도의 평균값은 각각 4.73 mg/L 및 0.39 mg/L로 나타났다. 1차 및 2차 시기 모두에서 매몰지 관측정 시료는 망간 수질기준치(0.3 mg/L)를 초과하였으며, 주변 관정 지하수에서도 다수의 시료가 수질기준을 초과하였다. 또한, 1차와 2차 조사시기 모두에서 관측정 지하수의 Mn 농도가 주변 관정 지하수에 비해 높게 나타났다. 가축매몰지 침출수에는 다량의 유기물이 존재하며, 이러한 환경에서는 미생물의 활동으로 인한 유기물의 산화로 인해 Fe 및 Mn 등 전이수용체의 환원성 용해를 촉진시킨다(von Gunten et al., 1994). 또한, 유공관 침출수의 Mn 농도가 매우 높게 관측된 것을 고려하면, 관측정과 주변 지하수에서의 Mn의 농도 차이는 침출수 기원의 Mn의 직접 유출, 혹은 환원환경 조성에 따른 Mn^{2+} 의 환원 침출로 인한 것으로 판단된다.

3.3. 수화학상 분석

침출수 및 주변 관정 지하수의 수화학 자료를 듀로브도(Durov Diagram)에 도시하여 수화학상(hydrochemical phase)을 평가하였다(Fig. 2). 침출수의 영향과 수화학상

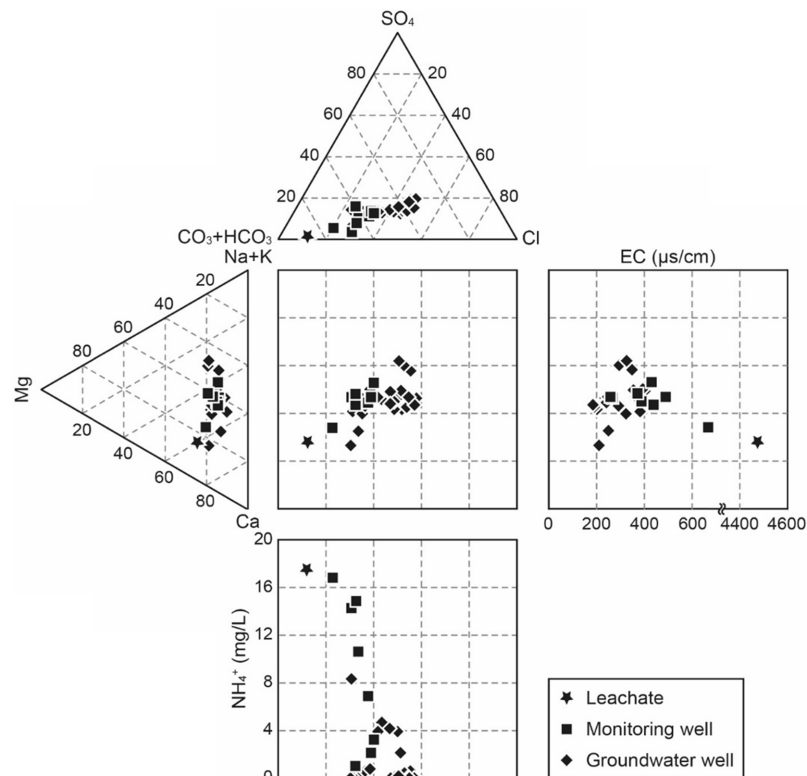


Fig. 2. Ionic compositions of three kinds of samples on the Durov diagram.

사이의 관계를 파악하기 위하여 듀로브도 중심에 위치한 사각형 영역의 축을 따라 EC와 NH_4^+ 의 농도를 함께 도시하였다. 매몰지 침출수의 수화확상은 Ca-HCO_3 유형, 관측정 지하수는 Ca-Na-HCO_3 유형으로 나타났으며, 주변 관정 지하수는 Ca(Na)-HCO_3 에서 Ca(Na)-Cl+NO_3 유형으로 변화하는 것으로 확인되었다.

침출수는 다른 지하수 시료에 비하여 상대적으로 높은 Ca와 HCO_3^- 함량을 가짐을 알 수 있는데, 이는 앞서 기술한 바와 같이 고함량 Ca와 HCO_3^- 는 각각 다량의 소석회 투입, 그리고 폐사축의 생분해 과정에 의한 높은 일갈리도 때문으로 판단된다. EC 값과 NH_4^+ 의 농도 역시 침출수에서 높게 관측된다. 따라서 듀로브도를 통해 EC, NH_4^+ 및 HCO_3^- 농도가 높은 침출수 특징을 확인할 수 있다.

매몰지 주변 침출수 관측정 지하수의 경우, 양이온 조성은 침출수와 다소 차이를 보이고 있지만 다수의 관측정 지하수 시료가 Ca 유형을 나타내며, 음이온 조성에서는 침출수와 동일하게 HCO_3^- 의 상대 비율이 높게 나타났다. NH_4^+ 농도 역시 주변 관정 지하수에 비해 상대적으로 높은 특징을 보였다. EC 값은 주변 관정 지하수와 유사하거나 높게 나타나지만 침출수에 비해서는 낮았다. 따라서 매몰지 관측정 지하수의 수화확상은 전반적으로 침출수의 특성을 반영하고 있으나, 주변 지하수나 강우의 유입으로 인하여 다소 희석된 양상을 나타냄을 확인할 수 있다.

주변 관정 지하수의 경우, Ca(Na)-Cl+NO_3 유형은 농업 및 축산활동 지역에서 나타나는 전형적인 지하수 수질유형에 해당하며, 따라서 주변 관정 지하수는 대부분이 침출수 보다는 축산활동 등에 기인한 인위오염의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다. Ca(Na)-HCO_3 유형과 Ca(Na)-Cl+NO_3 유형의 주변 지하수 간에는 EC 값의 차이를 보이지 않으며, 이들은 관측정 지하수와도 유의한 차이를 보이지 않았다. 다만, Ca(Na)-HCO_3 유형의 주변 관정 지하수 시료에서 특징적으로 NH_4^+ 가 검출되는 특징을 보여주었으며, 이는 일부 주변 지하수에서 침출수에 의한 영향이 있음을 지시한다. 관측정 지하수와 주변 관정 지하수의 수화확상을 종합하여 요약하면, 지하수가 Ca-HCO_3 유형으로 진화할수록 NH_4^+ 의 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 이들 지하수는 침출수 영향을 반영하는 것으로 평가된다. 아울러, 수질 유형과 함께 NH_4^+ 의 농도를 함께 고려하는 것이 가축 매몰지 침출수 누출에 의한 지하수 수질영향을 평가하는데 유용함을 알 수 있다.

3.4. 요인분석을 통한 가축 매몰지 영향 평가

3.4.1. 평가인자 도출

연구지역 가축 매몰지에 의한 수질영향을 확인하고 오염을 지시하는 유용한 인자를 도출하기 위하여 요인분석(factor analysis)을 적용하였다. 요인분석은 다변량 통계분석의 하나로서 상관관계가 높은 여러 변수들을 조합하여 잠재적인 변인(latent variable), 즉 요인을 도출하는 기법이다(Park, 2000). 본 연구에서는 매몰지가 존재하던 시기인 3월에 취득한 18개의 시료를 대상으로 요인분석을 적용하였다. 분석 항목은 동 시기 내에서 뚜렷한 차이를 보이지 않은 온도를 제외한 현장 측정항목(pH, ORP, EC, DO, NH_4^+)과 양이온(Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Mn(Total)) 및 음이온(Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) 등 15개 항목이며, 검출한계 미만으로 검출된 측정분석값에 대해서는 검출한계의 1/2 값을 사용하였다. 또한 각 변수가 가진 왜도를 최소화하여 정규성을 최대한 충족시키고 변수간의 차원을 통일하기 위하여 모든 변수는 로그 변환을 거쳐 표준화를 수행하였다. 요인 추출을 위해 주성분 분석법을 이용하여 고유값이 1 이상인 성분을 추출하였으며, 각 변수들과 요인간의 관계를 명확하게 파악하기 위하여 베리맥스 회전(varimax rotation)을 적용하였다(Kaiser, 1958). 요인분석 결과, 고유값 1 이상의 유의한 요인은 4개이며 이들의 전체 누적 분산은 84.52%로 계산되었다(Table 3).

요인 1(Factor 1)에서는 EC, Fe^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 가 정(+)의 상관관계를 보이고 있으며, 이들은 DO와 부(-)의 상관관계를 이루고 있다. 요인 1은 인위오염원에 의한 용존 성분의 증가와 함께 환원환경의 형성을 지시하는 것으로 판단된다. 앞서 기술한 바와 같이, 가축 매몰지 침출수가 이들 항목에 대해 특징적으로 높은 값을 보이므로, 요인 1은 침출수 유출에 의한 환원대 형성 및 용존 성분의 농도 증가로 해석될 수 있다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이, EC, Fe^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} 등의 용존 성분은 농업 및 축산 활동에 의해서도 부화될 수 있으며, 연구지역의 경우 매몰지 관측정 지하수와 주변 관정 지하수 간에 이들 성분이 뚜렷한 차이를 보여주지 않았다. 따라서 요인 1은 주변의 농축산 활동과 가축 매몰에 의한 침출수 영향 등 인위오염 과정이 복합적으로 작용하여 국지적 환원대 형성과 더불어 용존 성분의 농도 증가를 설명하는 것으로 해석함이 타당할 것이다.

요인 2(Factor 2)는 정의 상관성을 나타내는 NH_4^+ , K^+ , HCO_3^- , Mn(Total) 과 함께 이들과 부의 상관성을 보이는 NO_3^- 로 특징된다. 이러한 특징은 요인 2가 연구지역 내에서 일어나는 산화-환원 과정(redox process)을 설

Table 3. Factor loadings of 15 variables extracted by varimax rotation

Parameter	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
pH	-0.076	-0.065	-0.038	-0.933
ORP (mV)	-0.256	-0.235	-0.751	0.294
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0.699	0.546	0.411	0.073
DO (mg/L)	-0.521	-0.132	0.529	0.202
NH_4^+ (mg/L)	0.069	0.951	0.134	0.016
Fe^{2+} (mg/L)	0.621	-0.072	0.414	-0.522
Ca^{2+} (mg/L)	0.534	0.138	0.651	0.202
Mg^{2+} (mg/L)	0.706	0.454	0.103	0.114
Na^+ (mg/L)	0.956	0.073	0.225	-0.072
K^+ (mg/L)	-0.249	0.829	-0.200	0.309
HCO_3^- (mg/L)	0.379	0.701	0.531	-0.018
Cl^- (mg/L)	0.951	0.150	0.053	0.001
SO_4^{2-} (mg/L)	0.618	-0.337	-0.418	-0.138
NO_3^- (mg/L)	-0.517	-0.568	-0.286	0.430
Mn (Total) (mg/L)	0.298	0.908	0.119	-0.106
Eigenvalues	6.77	2.95	1.62	1.34
% of variance	31.78	26.52	15.23	10.98
Cumulative %	31.78	58.30	73.53	84.51

명함을 지시한다. 가축 사체에서 기인한 침출수 내에 고 농도로 존재하는 유기탄소는 환원제의 역할을 하며, 따라서 침출수 유출에 의한 영향을 받는 물의 수질은 상대적으로 높은 EC와 함께 특징적으로 환원상태를 갖게 된다. 결국 요인 2에서 나타나는 상관관계는 가축 매몰지 침출수에 의한 일부 용존성분(NH_4^+ , Mn, HCO_3^- 등)의 뚜렷한 농도 증가 및 국지적 환원환경의 조성에 의한 NO_3^- 농도 감소를 명확히 지시하는 것으로 해석된다.

요인 3(Factor 3)은 ORP와 Ca^{2+} 간의 부의 상관관계로 특징된다. 이는 침출수 영향에 의한 환원특성과 더불어 가축 매몰지 내에 다량 투입된 생석회(CaO)의 용해를 지시하는 것으로 판단된다. 한편, 요인 4(Factor 4)는 pH와 Fe^{2+} 간의 정의 상관관계로 특징되지만, 이 관계에 대해 명확한 설명을 부여하는 것은 어렵다.

3.4.2. 가축매몰지 영향의 공간적 평가

요인분석 결과, 요인 2로 도출된 특성, 즉 산화-환원 관련 인자와 질소계 성분의 농도 변화가 침출수 영향을 효과적으로 지시할 수 있는 인자임을 파악하였다. 이에, 요인 2의 성분 점수가 양(+)의 값을 더 크게 가질수록 매몰지 영향이 강한 것으로 해석할 수 있으며, 이를 활용하여 침출수 영향을 공간적으로 파악해 보았다.

Fig. 3은 관정 별로 요인 2의 요인점수를 매몰지로부터

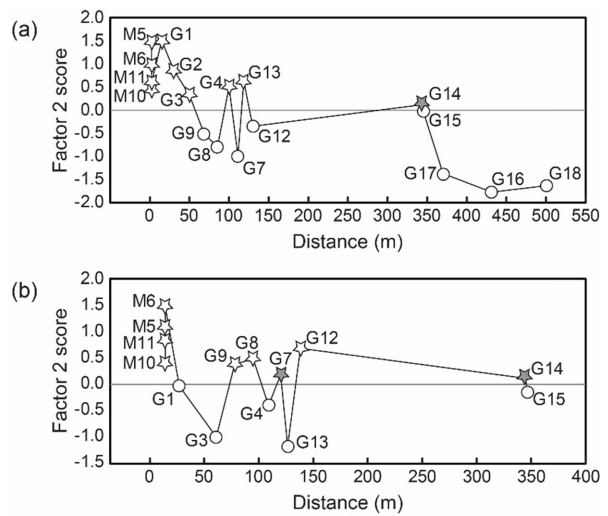


Fig. 3. The changes of factor scores with the distance of sampling sites from a livestock burial pit. (a) first sampling and (b) second sampling.

의 거리에 따라 도시한 그림이다. 즉, 요인분석으로 도출한 성분 점수 계수 행렬에 로그 변환 및 표준화를 거친 분석 자료를 곱하여 획득한 요인점수 값을 나타낸다. Fig. 3(a)는 매몰 직후인 3월의 결과이며, Fig. 3(b)는 매몰지 이설 이후인 9월의 결과이다. 평가 결과, 매몰지 주변의 4개의 관측정에서 3월과 9월 모두 양의 요인점수 값을 나타내었다. 이는 4개의 관측정 지점이 매몰지 침출수의 영향을 받고 있으며, 또한 매몰지 이설 이후에도 매몰부지에 잔존하는 오염원으로 인해 이들 관측정에 지속적인 영향이 나타나고 있음을 지시한다. 주변 관정 지하수를 보면, 3월에는 매몰지와 가장 인접한 G1, G2, G3에서 명확한 영향을 나타내고 있으며, G4와 G13 및 G14와 G15에서도 요인점수 0에 근접하거나 상회하여 침출수 영향의 가능성이 있음을 시사한다.

한편, 요인점수의 분포를 공간적으로 파악한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 매몰 직후, 그리고 Fig. 4(b)는 이설 이후의 결과이다. 매몰 직후에는 침출수 영향이 매몰지를 중심으로 지하수의 흐름 방향을 따라 동쪽 방향으로 나타나고 있음이 확인된다(Fig. 4(a)). 이설 이후에는 양의 요인점수 값을 가지는 지점들이 G9, G8, G7, G12, G14 등으로 불규칙하게 분산되는 경향을 보여주었다(Fig. 4(b)). 이는 매몰지 조성 이후로 이설 이후에도 지속된 관측정 및 주변 농업 관정에서의 양수 행위에 기인한 것으로 판단된다. 또한 본 평가 결과는 매몰지 이설 이후에도 잔류 오염원의 영향이 당분간 지속됨을 시사하고 있다.

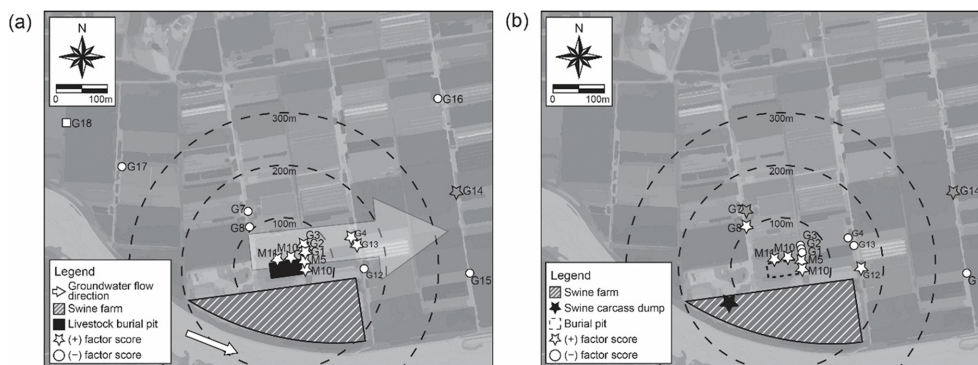


Fig. 4. Factor scores depicted on the map of study area, to estimate the spatial influence of leachate leakage.

4. 결론 및 제언

가축 매몰지 침출수의 유출에 따른 주변 지하수의 수질 영향을 파악하고 적정 오염지시자를 평가하기 위하여, 어느 돼지 사체 매몰지역을 대상으로 유공관 침출수, 매몰지 관측정 및 연구지역에 산재한 기존 지하수 관정을 대상으로 수화학 분석 연구를 수행하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1) 침출수는 낮은 Eh, 낮은 DO, 그리고 높은 EC 값을 갖는 전형적인 고농도 환원 유체의 특징을 나타내었다. 분석된 양이온 및 음이온은 기존 해외 사례에서 보고된 침출수 조성에 비하여 다소 낮은 농도를 보여주었다. 이는 매몰지 내에서 조성된 침출수와 강우 기원의 주변 지하수 간에 혼합이 일어나 희석된 결과로 판단된다. 다만, 희석효과에도 불구하고 Ca^{2+} 의 농도는 보다 높게 나타났는데, 이는 가축 매몰 당시 다량 투입된 생석회의 용해 때문으로 생각된다.

2) 매몰지 관측정 지하수와 주변 관정 지하수의 분석결과를 비교하면, 관측정 지하수가 대부분의 분석항목에서 높은 농도를 나타내었다. 특히, ORP, NH_4^+ , NO_3^- , Mn (Total) 등 질소계 물질과 산화-환원 관련 인자들이 뚜렷한 농도 차이를 보여주었다. 이들은 매몰지 침출수의 누출평가에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

3) 가축매몰지 침출수는 수화학적으로 Ca-HCO₃ 유형으로 확인되었다. 반면, 관측정과 주변 관정의 지하수는 Ca-HCO₃ 유형에서 Na-Cl+NO₃ 유형에 걸쳐 넓게 변화하는 양상을 보였다. 관측정과 주변 관정의 지하수는 특징적으로 Ca-HCO₃ 유형으로 변화하면서 NH_4^+ 의 농도가 높아지는 양상을 나타내었다. 이는 관측정 지하수와 일부 주변 관정 지하수에서 침출수의 영향이 나타남을 지시하며, 특히 수질 유형과 더불어 NH_4^+ 의 농도를 함께 고찰함으로써 매몰지 침출수의 영향을 확인할 수 있음을 시사한다.

4) 현장 측정 자료 및 수화학 자료에 관한 요인분석 결

과, 요인 1은 농축산 활동 및 매몰지에 의한 복합적인 인위오염 영향을, 그리고 요인 2는 매몰지 침출수에 의한 직접적인 영향을 지시하는 것으로 확인되었다. 본 연구 결과, 매몰지 침출수가 주변 지역 지하수에 미치는 영향이 농축산 활동에 의한 보다 광범위한 영향과 혼재하여 나타나며, 특히 HCO_3^- 및 산화-환원 반응과 관련된 이온종 (NO_3^- , NH_4^+ , Mn)의 농도 변화는 매몰지 침출수의 영향을 효과적으로 확인하는데 있어 매우 유용한 인자로 활용될 수 있음을 지시한다.

5) 요인 2의 요인점수를 활용하여 연구지역 내 침출수 유출에 의한 수질영향을 평가한 결과, 매몰지와 인접한 관측정에서는 침출수 영향이 명확하게 확인되었으며, 일부 주변 농업 관정에서도 수질영향이 확인되었다. 또한, 매몰지 이설 이후에도 잔존오염물에 의한 수질 영향이 어느 정도 지속됨을 확인하였다. 따라서 매몰지 이설 시 잔존오염물질의 완벽한 제거가 필요하며, 매몰 이후에도 지하수 수질모니터링이 당분간 이루어져야 함을 시사한다.

6) 본 연구결과는 침출수 영향을 평가함에 있어 산화-환원반응에 민감하거나 연관되는 인자들, 특히 HCO_3^- 및 NO_3^- , NH_4^+ , Mn가 효과적임을 지시한다. 침출수 유출 이후 주변 지하수계로의 확산 과정에서는 지하수의 산화-환원 특성은 토양 및 충적층의 지질-수리지질-지화학 조건에 의해 조절되므로, 매몰지의 수질영향 평가 및 예측(매몰부지 선정도 포함)을 위해서는 해당지역의 이러한 조건에 관한 공간적 이해가 반드시 수행되어야 할 것이다.

가축매몰지에서 기인한 침출수에는 고농도의 무기이온 및 다양한 환경오염물질이 함유되며, 따라서 유출 모니터링은 지하수 수질관리에 있어 매우 중요한 사항이다. 우리나라에서는 ‘가축매몰지역 환경조사지침’을 적용하여 매몰지 침출수의 유출을 모니터링 하고 있으나 유출 여부를 정밀하게 평가하기 위해서는 매몰지역 내의 기존 오염 특성 등을 정교하게 고려할 필요가 있다. 본 연구는 비록 1

개의 매몰 지역에 국한하여 수행되었지만, 기존의 인위적 활동(농축산활동)에 의한 수질 영향이 존재하는 상황에서 실제 침출수 누출의 영향을 판단하는데 유용한 수화학 판단 방법을 제시하였다. 기존의 국내외 사례에서 침출수의 특성 분석 및 주변 수계의 영향을 우려하는 연구는 다수 존재하지만, 실제 침출수 누출 영향이 의심되는 지역에서의 연구 사례는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구 결과는 매몰지 침출수의 누출 판단의 정교성을 향상하고 모니터링 관련 규정을 보완함에 있어 도움이 될 것이다.

사 사

본 연구에 활용된 자료는 국립환경과학원 및 한국농어촌공사의 가축매몰지 조사사업의 지원에 의해 획득되었다. 자료정리는 “2017년 농축산지역 지하수 질산성질소 수질 관리 시범사업(I)”의 지원을 받았다.

References

- APHA (American Public Health Association), 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
- Böhlke, J.K., 2002, Groundwater recharge and agricultural contamination, *Hydrogeol. J.*, **10**(1), 153-179.
- Choi, N.C., Choi, E.J., Kim, B.J., Park, J.A., Kim, S.B., and Park, C.Y., 2013, Characterization of water quality and the aerobic bacterial population in leachate derived from animal carcass disposal, *J. Eng. Geol.*, **23**(1), 37-46.
- Glanville, T., 2000, Impact of Livestock Burial on Shallow Groundwater Quality, *American Society of Agricultural Engineers Mid-Central Meeting*, April 28-29, 2000.
- Hem, J.D., 1985, Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
- Hooda, P.S., Edwards, A.C., Anderson, H.A., and Miller, A., 2000, A review of water quality concerns in livestock farming areas, *Sci. Total Environ.*, **250**(1), 143-167.
- Joung, H.K., Han, S.H., Park, S.J., Jeong, W.H., Ahn, T.S., Lee, J.B., Jeong, Y.S., Jang, K.L., Lee, G.C., Rhee, O.J., Park, J.W., and Paik, S.Y., 2013, Nationwide Surveillance for Pathogenic Microorganisms in Groundwater near Carcass Burials Constructed in South Korea in 2010, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **10**, 7126-7143.
- Kaiser, H.F., 1958, The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, *Psychometrika*, **23**(3), 187-200.
- Kang, M.A., Kim, M.S., Choi, B.W., and Sohn, H.Y., 2012, Organic matter analysis and physicochemical properties of leachate from a foot-and-mouth disease landfill site, *Korean J. Microbiol. Biotechnol.*, **40**(2), 128-134.
- Kim, H.K., Park, S.H., Kim, M.S., Kim, H.J., Lee, M.K., Lee, G.M., and Kim, T.S., 2014, Contamination characteristics of agricultural groundwater around livestock burial areas in Korea, *J. Eng. Geol.*, **24**(2), 237-246.
- Ko, J.S., Kim, B.J., Choi, N.C., Kim, S.B., Park, J.A., and Park, C.Y., 2012, Characterization of an animal carcass disposal site using electrical resistivity survey, *J. Eng. Geol. (Korea)*, **22**(4), 409-416.
- Korea Meteorological Administration, 2011, Annual Report, 170-172.
- MacArthur, A.J., Milne, J.C., and Young, P.J., 2003, Leachate characteristics arising from the foot and mouth mass burial site in Scotland. In: *9th International Waste Management and Landfill Symposium*, Sardinia, Italy.
- McBean, E.A., Rovers, F.A., and Farquhar, G.J., 1995, Mass balance computational procedures in landfill assessment, In: *Solid Waste Landfill Eng. Design*, Prentice Hall, 83-106.
- Ministry of Environment, 2013, Guide of the Survey of Livestock Carcass Burial, 20-23.
- Nutsch, A., McClaskey, J., and Kastner, J., 2004, Carcass disposal: a comprehensive review, National Agricultural Biosecurity Center, Kansas State University, Manhattan, KS.
- Park, J.H., Lee, K.N., Kim, S.M., Ko, Y.J., Lee, H.S., and Cho, I.S., 2009, Resistance of foot-and-mouth disease virus in various environments, *Korean J. Vet. Public Health*, **33**, 197-204.
- Park, G.B., 2000, Multivariate Analysis, Hakgi Pub. Co., 87-88.
- Pratt, D.L., 2009, Environmental impact of livestock mortalities burial, University of Saskatchewan, Doctoral thesis.
- RDA (Rural Development Administration), Korean Soil Information System, <http://soil.rda.go.kr/soil/soilmap/characteristic.jsp> [17.10.21]
- Ritter, W. F. and A. E. M. Chirside., 1995, Impact of dead bird disposal pits on ground-water quality on the Delmarva Peninsula., *Bioresour. Technol.*, **53**(2), 105-111.
- Rozeboom, D.W. and Ross, D., 2014, Mortality Compost Nutrients and Use On Farm, Ways to Enhance Nutrient Content. American Institute for Goat Research, Langston University, Langston, OK.
- von Gunten, H.R., Karametaxas, G., and Keil, R., 1994, Chemical processes in infiltrated riverbed sediments, *Environ. Sci. Technol.*, **28**(12), 2087-2093.
- Yeo, S.C. and Im, J.H., 1974, Geological Map of Korea-Icheon Sheet (1:50,000), National Institute of Geology and Mineralogy, 45p.
- Yuan, Q., Snow, D.D., and Bartelt-Hunt, S.L., 2013, Potential water quality impacts originating from land burial of cattle carcasses, *Sci. Total Environ.*, 456-457, 246-253.