가축매몰지 주변 농업지역 지하수의 수질오염 특성 분석

김현구¹ · 박선화¹ · 김문수¹ · 김혜진¹ · 이민경¹ · 이경미¹ · 김소현¹ · 양재하¹ · 김태승^{1*}

¹국립환경과학원 토양지하수연구과

Contamination Characteristics of Agricultural Groundwater Around Livestock Burial Areas in Korea

Hyun Koo Kim¹, Sun Hwa Park¹, Moon Su Kim¹, Hye Jin Kim¹, Min Kyeong Lee¹, Gyeong-Mi Lee¹, So-Hyun Kim¹, Jae-Ha Yang¹, Tae Seung Kim^{1*}

¹Soil and Groundwater Division, National Institute of Environmental Research,
Environmental Research Complex, Incheon, Korea

Received 26 May 2014; received in revised form 16 June 2014; accepted 19 June 2014

경기도 가축매몰지 주변 지하수의 계절별 변동 특성과 원인 분석을 위하여 가축매몰지 주변 60 m 이내에 위치한 관정(84개소)을 선별하여 오염물질들의 분포 및 특성과 그 원인에 대한 분석을 수행하였다. 오염원에 대한 지시인자(pH, DO, ORP, EC)의 경우, 대부분의 관정에서 계절에 상관없이 비교적 일정한 값을 유지하고 있는 것으로 나타나 침출수와 같은 오염원에 의한 계절적 영향이 뚜렷하지 않은 것으로 분석되었다. 질산성질소의 경우 대부분 30 mg/L 내외의 농도 분포를 보이는 것으로 나타났으며 특히 가축매몰지로부터 20 m 이내에 위치한 관정에서도 15 mg/L 이하의 농도 분포를 보이는 것으로 분석되었다. 암모니아성질소와 염소이온의 경우 가축매몰지와 근접한 곳에 위치한 관정보다는 오히려 40 ~ 60 m 거리에 위치하는 관정에서 더 높은 농도 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대부분 가축매몰지 침출수와 같은 높은 농도의 오염물 유입보다는 각 관정 주변에 위치한 기존의 오염에 의한 영향을 나타내주는 것이라 할 수 있으며 향후 가축매몰지 관련 지하수 보전 및 관리에 있어서 유용한 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 가축매몰지, 지하수 오염, 질산성질소, 암모니아성질소, 염소이온

Seasonal variations of major contaminants in groundwater around livestock burial areas in Gyeonggi province, Korea, were examined. Seven typical contamination indicators (NO₃-N, NH₃-N, chloride, pH, DO, ORP, and EC) were monitored in groundwater samples collected from 84 wells located within 60 m of livestock burial sites for the leachate plume emanating from the livestock burial sites. The monitoring results of pH, DO, ORP, and EC revealed minimal seasonal variations, providing no evidence for leachate plumes. The NO₃-N concentrations were below 30 mg/L and exhibited minimal seasonal fluctuations, even in the wells located close to (< 20 m) the burial sites; the NH₃-N and chloride concentrations also showed similar results. The contamination indicators examined in this study indicate that the observed groundwater contamination is primarily from preexisting pervasive contamination due to agricultural activities and livestock farming, not leachates derived from nearby livestock burial sites.

Key words : livestock burial area, groundwater contamination, NO₃-N, NH₃-N, chloride

*Corresponding author: tskim99@korea.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

가축전염병인 구제역(Foot and mouth disease)은 전염성이 매우 강한 바이러스성 질병의 하나로 국내에서는 제1종 가축전염병으로 지정, 관리하고 있다. 특히 2010년 경북 안동에서 시작되어 2011년 4월까지 전국으로 확산, 발병하여 국가적으로 재난형 가축질병으로 인식되었다. 가축매몰지는 바이러스의 확산을 막기 위하여 구제역 또는 조류인플루엔자 바이러스에 의해 감염되거나 감염 우려가 있는 가축들을 살처분하여 매립한 곳을 지칭하는데, 조류인플루엔자 매몰지(203개소)를 포함하여 9개 시·도, 70개 시·군·구에 걸쳐 전국적으로 4,632개가 조성된 것으로 조사되었다(Central disaster and safety countermeasures headquarters, 2011). 가축의 매몰두수는 전국적으로 소 약 15만두, 돼지는 약 320만두에 달하는 것으로 조사되었다. 정부에서는 가축매몰지의 효율적인 관리와 매몰지 환경안전관리를 위해 범정부 차원의 사후관리팀을 구성/운영하였다.

특히, 경기도의 가축매몰지는 총 가축매몰지의 약 53%(2,331개소)에 해당할 만큼 큰 피해를 입은 지역으로써 공중보건학적인 문제와 더불어 침출수에 따른 지하수 오염과 토양 오염 그리고 상수원 오염 문제가 제기되고 있다. 이에 대한 대책으로는 문제가 되는 매몰지의 보완/정비 공사를 통해 초기 부설시공의 문제를 보완하고, 지하수 수질 모니터링을 통해 매몰지의 사후 관리를 위한 대책을 강구하여 현장에 직접적으로 반영하는 방향으로 진행되고 있다(Lee, 2011).

구제역으로 매몰된 가축들은 장기간에 걸쳐 서서히 분해되면서 침출수를 발생시키며, 특히 매몰과정에서 훼손된 차수시설을 통해 분해과정에서 생성된 침출수가 외부로 누출될 경우 주변 지하수를 오염시킬 수 있다. 매몰된 가축 사체들은 분해 과정을 거치면서 지하수 환경 내 높은 생물학적 산소요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 암모니아성질소(Ammonia-nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$), 총 용존 고형물(Total dissolved solids, TDS), 그리고 염소이온(Chloride)을 야기하는 것으로 알려졌다(Bae et al., 2004; Fonstad, 2004; Jung and Lee, 2007; Pratt, 2009). 질소에 의한 수질 오염은 박테리아 오염보다 더 심각한 문제로 간주되고 있으며, 염소이온은 다른 오염물질의 농도에 비해 낮은 편이지만 침출수의 환경영향을 평가하는 중요한 지표로 활용되고 있다(Bjerg et al., 1995; University of Seoul Industry-Academic Cooperation Foundation, 2008).

이러한 가축매몰지에 의한 침출수 발생은 농어촌 지역 면단위 인구의 약 55%, 읍단위 인구의 14%가 생활용수 또는 음용수로서 지하수에 의존하고 있는 농촌 주민(Ministry of Environment, 2010)의 환경에 큰 문제를 야기시킬 수 있지만 침출수 발생과 지하수 환경 영향에 대해서는 축적된 연구가 많지 않다.

본 연구에서는 경기도에 위치한 가축매몰지 주변 지하수 수질의 문제점 및 그 원인을 확인하기 위하여 매몰지 주변 60 m 이내에 위치한 지하수 관정을 선별하여 계절별로 지하수 수질을 분석하였다. 특히, 지하수 내 오염물질 및 이에 수반되는 수질 지시인자들의 계절적 변동 특성 및 그 원인에 대하여 고찰하였다.

연구지역 및 연구 방법

연구 지역 및 조사 대상

연구 지역인 경기도는 27개의 시와 4개 군으로 이루어져 있으며 2011년 말 현재 약 1,200만 명이 거주하고 있는 지역이다. 2010년 발생한 구제역에 의한 가축매몰지는 도내 2,331개소에 이르며, 파주시(238개), 양주시(240개), 포천시(279개), 이천시(376개), 여주군(199개), 안성시(202개), 연천군(159개) 등에 집중적으로 설치되었다.

2011년 각 계절별 조사 관정수는 Table 1과 같다. 이 중 가축매몰지 주변 지하수의 수질 변화 특성을 정밀 평가하기 위하여 매몰지로부터 20 m 이내에 위치한 관정은 A관정(17개), 21 ~ 40 m는 B관정(21개), 41 ~ 60 m 거리에 있는 관정은 C관정(46개)으로 총 84개 관정을 가축매몰지로부터의 거리에 따라 선별하여 분류하였다(Fig. 1). 또한 1/4분기조사 관정(2월 분석 샘플) 중, 질산성질소 농도가 가장 높은 A-2, A-13, A-17, B-3, B-6, B-9, C-1, C-22, 그리고 C-28 관정을 계절별 분석 모니터링 관정으로 선정하였으며 이들 관정에 대하여 시간경과에 따른 농도 변화 분석을 수행하였다. 조사 관정은 축산 단지 내에서 음용수 또는 생활용수로 사용되고 있으나 미신고 관정이 대부분이어서 대체적으로 관정 심도 등 제원의 파악이 불가능하였으나 개별적인 탐문결과 15 ~ 30 m인 것으로 조사되었다.

수질 현장 측정 및 실내 분석

지하수의 시료 채취 시에는 교란과 기포가 발생하지 않도록 양수량을 조절하였으며 대기 접촉으로 인한 시료의 변질을 방지하기 위하여 무균채수병 상부에 빈공

Table 1. Total number of observed monitoring wells and those selected wells for analysis in this study.

	1st quarter	2nd quarter	3rd quarter	4th quarter
^a No. of observed monitoring wells	1,512	1,523	1,505	1,505
^b No. of monitoring wells used in this analyses	84	84	84	84

^aMonitoring wells located within 300 m from the carcass burial area.

^bMonitoring wells located within 60 m from the carcass burial area.

Fig. 1. Distribution of the monitoring wells in close proximity to the carcass burial site in Gyeonggi province.

간(Headspace)이 발생하지 않도록 주의하여 채수하였다. 또한, 지하수 시료 채취시, 일정시간 지하수를 양수한 뒤 수온 등이 안정화된 후 채수하였으며, 0~4°C의 냉장상태로 보관 및 운반하였다. 특히 오염도가 높을 것으로 예상되는 샘플의 경우 별도로 분류하여 운반하였다.

지하수 시료채취 전, pH, DO (dissolved oxygen), ORP (oxidation reduction potential), EC (electrical conductivity), 그리고 수온 등에 대하여 YSI-556 현장 실험장비를 이용하였다. 현장 수질 측정값의 안정화 여부는 미국지질조사소(USGS, 1981)의 자료를 기준으로 판단하였다. 분석에 이용된 9개 지하수의 분석결과는 Table 2에 나타내었다.

주요 양이온과 음이온은 각각 유도결합플라즈마 원자 방출광도계(ICP-OES)와 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였으며 주요 오염원인 질산성질소, 암모니아성질소, 그리고 염소이온은 먹는물공정시험기준과 수질 오염공정시험기준에 따라 이온크로마토그래피(850 professional IC, Metrohm)와 자외선/가시광선 분광법(US/8453, Agilent Technologies)으로 분석하였다. 주요 오염원에 대한 분석결과는 Table 3에 나타내었다.

연구 결과 및 고찰

수소이온농도(pH)

가축매몰지 주변 60 m 이내에 위치한 지하수 관정 중 1/4분기 분석 결과에서 질산성질소가 높은 관정 9개 관정(A-2, A-13, A-17, B-3, B-6, B-9, C-1, C-22, C-28)에 대한 pH 조사 결과, Fig. 2(a)에서와 같이 대부분 5.38~7.40 내외의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 0~20 m 이내에 위치한 관정에서는 계절적 변화가 거의 나타나지 않았으며, 21~40 m에 위치한 관정의 pH값은 5.38~6.71의 범위로 조사되었다. 41~60 m 이내의 관정은 5.38~6.38의 범위를 보이고 있었으며 시간이 지남에 따라 미약하게 상승하는 것으로 조사되었다.

용존산소농도(Dissolved oxygen)

유기오염물질의 침투가 발생하게 되면 미생물에 의한 활발한 분해작업을 통해 용존 산소의 소비로 대부분의 지하수 환경은 호기성 상태(aerobic condition)에서 혐기성 상태(anaerobic condition)로 변하게 된다(Bjerg et al., 1995). 조사된 가축매몰지 인접 관정에서의 지하수내 용

Table 2. Seasonal variations in the geochemical parameters of groundwater at selected monitoring wells.

Well	^a Dist. (m)	Site	pH (-)				DO (mg/L)				EC (μ S/cm)				ORP (mV)			
			Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011	Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011	Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011	Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011
A-2	10	Yangju	5.47	6.52	5.63	5.94	3.28	2.24	2.59	4.70	428	390	232	618	195	194	320	396
A-13	20	Kimpo	6.40	6.91	6.79	6.64	5.72	3.45	7.80	4.20	334	230	356	209	128	6	238	341
A-17	20	Ansung	5.89	7.28	7.40	7.29	8.32	8.55	8.20	7.90	309	168	150	152	166	44	354	113
B-3	29	Pyeongtaek	5.58	5.94	6.71	6.13	6.29	6.23	4.60	5.00	318	320	135	320	178	156	231	372
B-6	30	Ansung	5.43	5.38	6.40	5.92	7.15	5.14	6.00	5.10	329	327	269	268	10	29	266	133
B-9	35	Ansung	6.42	5.46	6.10	6.02	9.17	8.64	7.70	6.23	239	456	426	467	63	96	284	146
C-1	42	Pyeongtaek	5.38	5.43	5.58	5.46	5.53	5.42	3.20	5.40	617	690	360	452	239	239	205	404
C-22	50	Pyeongtaek	5.49	5.52	5.41	6.20	8.98	8.98	9.02	7.30	703	604	665	454	126	164	236	167
C-28	53	Icheon	6.38	6.11	5.79	5.49	7.64	6.05	6.50	7.40	380	341	350	314	355	325	314	293
Maximum			6.42	7.28	7.40	7.29	9.17	8.98	9.02	7.90	703	690	665	618	355	325	354	404
Minimum			5.38	5.38	5.41	5.46	3.28	2.24	2.59	4.20	239	168	135	152	10	6	205	113
Average			5.83	6.08	6.20	6.12	6.90	6.08	6.18	5.91	407	392	327	362	162	139	272	263

^aDist.: distance from the carcass burials (m).**Table 3.** Seasonal variations in the concentrations of groundwater contaminants at selected monitoring wells.

Well	^a Dist. (m)	Site	NO ₃ -N (mg/L)				NH ₃ -N (mg/L)				Cl ⁻ (mg/L)			
			Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011	Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011	Feb. 2011	May 2011	July 2011	Oct. 2011
A-2	10	Yangju	48.40	54.29	47.73	76.14	0.00	0.00	0.00	0.00	29.90	37.47	31.02	44.41
A-13	20	Kimpo	22.90	4.33	8.54	5.51	0.00	0.00	0.00	0.00	29.40	23.87	30.81	27.61
A-17	20	Ansung	16.40	3.20	2.30	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00	19.00	10.00	7.00	9.00
B-3	29	Pyeongtaek	22.50	21.99	19.57	24.12	0.00	0.00	0.06	0.00	20.60	30.37	16.48	19.35
B-6	30	Ansung	25.60	23.60	20.80	20.60	0.07	0.00	0.00	0.02	17.60	18.00	15.00	14.00
B-9	35	Ansung	23.80	30.00	30.00	31.80	0.01	0.00	0.00	0.00	26.00	30.00	24.00	25.00
C-1	42	Pyeongtaek	51.70	52.93	50.31	31.23	0.00	0.00	0.00	0.00	66.50	67.35	66.49	50.01
C-22	50	Pyeongtaek	50.10	48.80	47.20	46.80	0.01	0.00	0.00	0.02	45.00	48.00	46.00	45.00
C-28	53	Icheon	26.80	24.60	19.70	23.50	0.11	0.00	0.00	0.00	20.00	19.00	17.00	21.00
Maximum			51.70	54.29	50.31	76.14	0.11	0.00	0.06	0.02	66.50	67.35	66.49	50.01
Minimum			16.40	3.20	2.30	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00	17.00	10.00	7.00	9.00
Average			32.02	29.30	27.35	29.26	0.02	0.00	0.01	0.00	30.38	31.56	28.20	28.37

^aDist.: distance from the carcass burials (m).

존 산소의 경우 2.24~9.17 mg/L의 범위로 수소 혐기성 상태의 관정이 나타나는 것으로 조사되었지만 대부분 호기성 상태의 지하수 환경을 지시하였다(Fig. 2(b)). A-13 관정과 같이 혐기성 환경이 인지된 일부 관정의 경우

계절적인 영향에 의해 시기별로 호기성 상태로 나타나는 것으로 조사되었으며, 가축매몰지 침출수로 인한 혐기성 상태의 형성은 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 조사되었다. 분석된 A 관정(A-2, A-13, A-17)에서의 지하

Fig. 2. Seasonal variations of the physico-chemical parameters.

수내 용존산소의 농도는 2.24~8.55 mg/L, B 관정(B-3, B-6, B-9)은 4.60~9.17 mg/L, C 관정(C-1, C-22, C-28)은 3.20~9.02 mg/L의 농도 분포를 보였다.

산화환원전위(Oxidation reduction potential)

지하수 내 용존산소의 변화와 마찬가지로 산화환원전위(oxidation reduction potential)의 경우, 유기오염물질이 침투하게 되면 미생물의 활발한 분해작용으로 인하여 산화환경(oxidation condition)에서 환원환경(reduction condition)으로 변하게 된다(Bjerg et al., 1995). 조사 관정 지하수의 산화환원전위는 6.00~404 μS/cm로 대부분 산화환경에 접해있음을 지시하였으며, 계절적/시간적으로 환원환경에 있던 일부 관정들은 점차 산화환경으로 변화되는 것으로 나타났다(Fig. 2c). A, B, C 관정에서의 산화환원전위 범위는 각각 6.00~396 μS/cm, 9.56~372 μS/cm, 125.80~404 μS/cm로 가축매몰지로부터의 거리에 따른 차이가 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

전기전도도(Electrical conductivity)

가축매몰지로부터 침출수가 발생하게 되면 질산성질소, 암모니아성질소, 그리고 염소 이온 등의 증가로 인

하여 지하수 내 전기전도도(electrical conductivity)값은 큰 폭으로 증가하게 된다(Bjerg et al., 1995). 모니터링 결과, 전기전도도는 135.4~703.0 mV의 범위를 보이는 것으로 나타났지만 가축매몰지로부터 근접한 관정에서도 전기전도도는 시간의 경과에 따라 거의 변화를 보이지 않는 것으로 조사되었다(Fig. 2(d)). A, B, C 관정에서의 전기전도도 값은 각각 150.3~618 mV, 135.4~467 mV, 314~703 mV의 범위로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. C-1과 C-22 관측점의 경우, 초기 높은 전기전도도 값의 분포로 인하여 침출수에 의한 영향인 것으로 의심되었지만, 앞서 언급한 지하수 내 오염 지시 인자인 pH, DO, ORP 값의 변화와 일치하지 않는 경향성을 보이는 것으로 보아 가축매몰지의 침출수가 아닌 다른 원인에 의한 영향으로 판단된다. C-22 관정의 경우, 가축매몰지의 침출수에 의한 영향이기 보다는 C-22 관정이 위치한 주변 다른 오염원의 영향에 의해 높은 전기전도도 값을 보이는 것으로 판단되며, 이러한 전기전도도 값의 경향과 관련하여 아래에 자세히 분석하였다.

질산성질소

질산성질소는 염소이온 및 암모니아성질소와 더불어

Fig. 3. Seasonal variations of contaminant concentrations in the groundwater.

가축매몰지 침출수에 의한 영향 가능성이 있는 물질로 알려져 있다(Jung and Lee, 2007). 선별된 모니터링 관정에서의 질산성질소의 농도는 대부분 30 mg/L 이하의 농도를 보이는 것으로 나타났다. 선별된 9개 관정에서의 질산성질소 농도는 2.3 ~ 76.14 mg/L 범위로 나타났으며 특히 2월 분석된 A-2, C-1, C-22 모니터링 관정에서의 농도는 각각 48.40 mg/L, 51.70 mg/L, 50.10 mg/L로 매우 높은 농도를 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 3(a)). 20 m 이내에 위치한 A-2 모니터링 관정의 질산성질소 농도는 2011년 2월, 5월, 7월에 각각 48.40 mg/L, 54.29 mg/L, 47.73 mg/L를 보인 후 2011년 10월 76.14 mg/L로 급격한 농도 증가를 보이는 것으로 조사되었다. 그러나 침출수에 의한 영향으로 나타날 수 있는 염소이온 및 암모니아성질소는 해당 시기 중에 큰 변화가 관찰되지 않는 것으로 조사되었다. 또한 42 m 거리에 위치한 C-1 모니터링 관정의 경우, 지속적으로 높은 질산성질소 농도가 관찰되었지만, 염소이온과 암모니아성질소 농도의 뚜렷한 증가 추세는 나타나지 않았다. A, B, C 모니터링 관정에서의 질산성질소 농도는 각각 2.30 ~ 76.14 mg/L, 19.57 ~ 32.80 mg/L, 19.70 ~ 52.93 mg/L의 범위로 농도의 변화가 나타나지

않는 것으로 분석되었다. 이는 계절적/시간적 경과에 따른 농도 변화가 없는 질산성질소의 주된 원인이 주변의 다른 오염원(축산분뇨 및 비료 등)의 영향인 것으로 보이며 또한 염소이온과 암모니아성질소 농도 변화에서도 이를 잘 나타내주고 있는 것으로 분석되었다.

염소이온

가축매몰지 침출수의 대표적인 오염인자로 알려진 염소이온의 경우, 20 m 이내에 위치한 모니터링 관정에서의 농도는 7.00 ~ 44.41 mg/L로 조사되었으며 시간 및 계절적 영향에 따른 농도 변화는 매우 미미한 것으로 조사되었다(Fig. 3(b)). 21 ~ 40 m와 41 ~ 60 m에 위치하는 관정들의 농도는 각각 14.00 ~ 30.37 mg/L와 17.00 ~ 67.35 mg/L 범위를 보였으며, 마찬가지로 대부분의 관정에서 계절적 농도 변화는 보이지 않는 것으로 조사되었다. 가축매몰지로부터 42 m 이내에 위치하는 C-1 관정의 경우, 2011년 2월, 5월, 7월의 농도는 각각 66.50 mg/L, 67.35 mg/L, 66.49 mg/L로 고농도의 염소이온 농도 분포를 보였지만 10월 농도는 50.01 mg/L로 상대적으로 감소된 것으로 나타났다. 이는 가축매몰지에 기인한 침출수에 의한 것이라기보다 닭과 오리 등을 키우는

계사(poultry house)와 같은 관정 주변의 별도 오염원에 의한 것을 나타내주고 있는 것으로 보인다(Kim and Woo, 2003). 또한 전기전도도, DO, pH 등과 질산성질소, 암모니아성질소와 비교해 볼 때, 가축매몰지 침출수에 의한 영향은 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다. 60 m 이내에 위치한 C-22 관정 역시 높은 염소이온 농도를 보였으나, 시간에 따른 농도 변화가 거의 나타나지 않았으며 현장수질측정과 질산성질소, 암모니아성질소 농도 변화와 비교해 볼 때 역시 다른 오염원의 영향인 것으로 판단된다.

암모니아성질소

지하수 내 질산성질소 및 염소이온과 더불어 가축매몰지 침출수 영향을 나타내는 대표적인 오염물질의 하나로 알려진 암모니아성질소의 경우, 대부분의 모니터링 관정에서 검출한계(0.01 mg/L) 이하의 농도를 보이는 것으로 조사되었다. 선별된 9개 모니터링 관측정에서의 암

모니아성질소 농도는 0~0.11 mg/L의 범위로 조사되었으며 특히 가축매몰지와 가장 가까운 곳에 위치한 20 m 이내에 위치한 모니터링 관정에서의 농도는 대부분 검출 한계 이하의 농도를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3(c)). 40 m 이내에 위치한 B-6 관측정과 60 m 이내에 위치한 C-28 관정의 경우, 앞선 오염원들과 같이 별도의 오염원에 의한 농도 증가에 기인한 것으로 보인다.

매몰지로부터 이격 거리에 따른 오염물질의 농도 변화

가축매몰지 침출수의 대표적인 오염물질로 알려진 질산성질소, 염소이온, 암모니아성질소 농도에 대하여 매몰지로부터 관정까지의 거리에 따라 농도 변화 특성을 분석하였다. 질산성질소의 경우, 거리에 따라 대부분 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났으며, 오히려 매몰지로부터 상대적으로 멀리 떨어져 있는 모니터링 관정에서 비교적 높은 질산성질소 농도를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 4(a)). 매몰지로부터 가까운 곳에 위치한 관정

Fig. 4. Variations of contaminant concentrations with the distance from the carcass burial site.

Fig. 5. Variation characteristics of $\text{NO}_3\text{-N}$ and chloride contaminants in groundwater with elapsed time nearby the carcass burial sites.

들의 농도는 대부분 시간에 따라 의미 있는 큰 변화를 보이지 않아 매몰지 침출수의 영향보다는 축산단지 또는 농업을 위한 비료 등에서 발생된 기타 오염원에 의한 영향으로 보여진다. 염소이온 농도의 경우, 질산성질소와 마찬가지로 가축매몰지 근처에 위치한 관정에서의 시간에 따른 농도 변화는 거의 나타나지 않는 것으로 나타났으며 오히려 가축매몰지와 거리가 40 m 이상 떨어져 있는 일부 관정에서 비교적 높은 농도를 보였다 (Fig. 4(b)). 암모니아성질소의 경우, 대부분의 관정에서 매우 낮은 농도의 분포를 보이는 것으로 조사되었으며 2011년 7월 관측된 최대 5.84 mg/L 농도는 현장수질측정 자료 및 질산성질소, 염소이온 농도 등과 비교하여 볼 때 축산단지 등에서 배출된 오염원에 의해 지하수 함양시 유입된 것으로 보여진다(Fig. 4(c)).

오염물질의 계절적 변화 특성 분석

가축매몰지 주변 지하수 내 대표적인 오염물질인 질산성질소와 염소이온의 계절적 변화 특성을 분석하였다. 오염물질들의 계절별/시간 경과별 변화를 관찰하기 위하여 전분기 분석된 오염물질 농도 자료와 비교하여 거동 특성을 분석하였다. Fig. 5(a)에서 나타낸 것과 같이 전

분기 농도와 비교 분석에 있어서 추세선이 자연저감 방향으로 기울어지게 되면 강우에 의한 희석 또는 토착 미생물에 의한 분해의 영향으로 판단할 수 있다. 반대로 추세선이 농도 증가 방향으로 기울어진다면 추가적인 오염원의 유입으로 인하여 지하수 내 오염물의 농도가 증가한 것으로 판단할 수 있다.

2011년 2월과 5월 질산성질소의 농도 비교 결과, 결정계수의 값이 0.85로 매우 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났으며 추가적인 오염원의 유입과 저감이 거의 비슷한 수준으로 유지되고 있다는 것을 지시하는 것으로 보인다(Fig. 5(a)). 2011년 5월과 7월 비교 결과, 결정계수 값이 0.87로서 앞선 결과와 매우 유사한 결과로 나타났으며 오염원의 유입과 함께 계절적 영향에 따른 강우의 지하수 함양 그리고 이에 따른 희석에 의해 질산성질소 농도가 유지되고 있는 것으로 보여진다(Fig. 5(b)). 2011년 7월과 10월의 질산성질소 농도 비교 결과, 결정계수 값은 0.72로 앞선 결과에 비해 비교적 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났지만, 10월 질산성질소 농도는 7월에 비해 시간경과에 따른 농도의 증감이 거의 나타나지 않는 것으로 분석되었다(Fig. 5(c)).

염소 이온의 경우, 질산성질소 농도와 매우 유사한 형

태의 농도 분포를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 5(d)). 2011년 2월 농도와 비교된 5월의 염소이온 농도는 결정 계수가 0.81로써 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 또한 2011년 5월과 7월의 농도 비교 결과, 결정 계수가 0.65로 앞선 결과보다 비교적 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났지만 7월의 경우 계절적 영향에 따라 5월에 비해 염소이온 농도가 약간 상승된 것으로 조사되었다(Fig. 5(e)). 2011월 7월과 비교한 10월의 농도는 결정계수가 0.79로써 질산성질소와 마찬가지로 높은 상관관계를 보이는 것으로 조사되었으며 7월에 비해 전반적인 염소이온의 농도가 증가한 것으로 나타났다(Fig. 5(f)).

질산성질소와 염소이온의 계절적/시간적 거동 특성 분석 결과, 각각의 오염물질들은 가축매몰지에서 비롯된 오염물질이 아닌 기존의 광범위한 농축산 기원 오염물질들의 지속적인 유입뿐만 아니라 강우에 의한 희석 그리고 토착미생물에 의한 분해에 의해 거의 비슷한 수준으로 유지되고 있는 것으로 보인다.

결론 및 토의

경기도에 설치된 가축매몰지로 인한 주변 지하수로의 영향분석과 오염물질들의 거동 특성을 파악하기 위하여 계절별로 총 1,500여개의 현장 수질 분석과 실내 수질 분석을 실시하였다. 분석 결과 중 가축매몰지 근처에 위치한 84개 모니터링 관정을 선별하여 계절별 오염물질들의 거동 특성 및 원인을 분석한 주요 결과는 다음과 같다.

가축매몰지와 가까이에 위치한 관정에서의 현장수질 측정 결과, pH의 경우 5.38~7.40 범위를 보이는 것으로 조사되었으며, 계절적 영향에 의한 변화는 보이지 않는 것으로 조사되었다. 지하수 내 용존산소는 일부 관정에서 혐기성 상태의 낮은 농도로 나타나는 것으로 조사되었지만, 대부분은 호기성 상태인 것으로 나타났다. 전기전도도와 산화환원전위 역시 시간 경과와 더불어 높은 농도의 오염원 유입의 영향은 보이지 않는 것으로 조사되었다.

대표적인 오염물질인 질산성질소, 염소이온, 그리고 암모니아성질소는 소수의 모니터링 관정에서 높은 농도로 나타나고 계절적 영향에 의해 농도의 증가 경향을 보이는 것으로 나타났지만, 개별 오염물질이 특징적으로 나타나는 관정이 서로 달랐으며, 오염 지시인자인 현장 측정치(pH, DO, ORP, EC)들과 비교하여 볼 때 유의한

상관성은 보이지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 현상들은 지하수 오염원이 가축매몰지 침출수에 의한 것이라고 보다는 관정 주변의 축산분뇨 등과 같은 기타 오염원에 의한 영향임을 지시하는 것으로 판단된다.

가축매몰지로부터의 이격 거리에 따른 오염물질의 계절적 분포 특성을 분석한 결과, 20 m 이내에 위치한 관정들보다는 40 m 및 60 m 이내에 위치한 관정에서 오히려 오염물질들의 계절적 농도 변화가 나타나는 것으로 조사되었다. 가축매몰지 침출수의 대표적인 오염물로 알려진 질산성질소와 염소이온의 계절별 농도 변화 특성을 고찰한 결과, 기존 오염원들의 지하수 환경 유입과 더불어 계절적 강우에 의한 희석 그리고 토착미생물에 의한 분해가 비슷한 수준으로 유지되고 있는 것으로 보인다.

가축매몰지 부근 모니터링 관정에서의 오염물질의 계절별 거동 특성과 오염 지시인자들의 계절별 분석 결과는, 대부분의 모니터링 관정에서의 오염 현상은 가축매몰지 침출수 영향 보다는 관정 부근에 존재하는 기존의 오염에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 이러한 오염에 대한 지속적인 모니터링 및 처리, 정화 대책이 필요한 것으로 판단된다.

References

- Bae, Y. C., Yoon, S. S., Kang, K. I., Roh, I. S., Kim H. J., So, B. J., Park J. W., Jean, Y. H., and Kang, M. I., 2004, Clinical signs and pathologic lesions of foot and mouth disease in pigs, Korea. *Journal of Veterinary Clinics* 21, 172-176.
- Bjerg, P. L., Ruge, K., Pedersen, J. K., and Christensen, T. H., 1995, Distribution of redox-sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill, *Environmental Science and Technology*, 29(5), 1387-1394.
- Central disaster and safety countermeasures headquarters, 2011, Comprehensive management measures of carcass burial sites (in Korean).
- Fonstad, T. A., 2004, Transport and Fate of Nitrogen from Earthen Manure Storage Effluent Seepage, Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Jung, G. J. and Lee, J. Y., 2007, A study on the characteristics of landfill gas and leachate in Nanjido after constructed final cover system. *Journal of Korea Society of Waste Management*, 24, 744-751 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. T. and Woo, N. C., 2003, Nitrate contamination of shallow groundwater in an agricultural area having intensive livestock facilities. *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 8(1), 57-67 (in Korean with English abstract).
- Lee, K. K., 2011, A foot and mouth disease, leachate from

- the burial sites and the pollution of groundwater, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 12(2), 6-17 (in Korean).
- Ministry of Environment, 2010, Environmental management index of the livestock burial areas (in Korean).
- Pratt, D. L., 2009, Environmental impact of livestock mortalities burial, M.S. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, pp. 45.
- University of Seoul Industry-Academic Cooperation Foundation, 2008, Final report about management plans of environmental pollution through the burial livestock (in Korean).
- USGS, 1981, Guidelines for collection and field analysis of groundwater samples for selected unstable constituents.

김현구

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-7924
E-mail: khk228@korea.kr

박선화

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-8365
E-mail: parksu@korea.kr

김문수

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-7907
E-mail: hyd009@korea.kr

김혜진

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-7911
E-mail: hyejink@korea.kr

이민경

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-7925
E-mail: mk0607@korea.kr

이경미

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-8362
E-mail: km356@korea.kr

김소현

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-8366
E-mail: zlathgus@korea.kr

양재하

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-7909
E-mail: wjhyang@korea.kr

김태승

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel. 032) 560-8360
E-mail: tskim99@korea.kr