

가축매몰지 주변 관정의 지하수 수질 연구

김현구¹ · 박선화¹ · 황종연¹ · 김문수¹ · 조훈제¹ · 전상호¹ · 이강근² · 진성욱^{3,†}

¹국립환경과학원

²서울대학교 지구환경과학부

³전북대학교 지구환경과학과 & 지구환경시스템연구소

요 약

2011년부터 2015년까지 조성된 가축매몰지를 대상으로 매몰지 주변에 위치하는 지하수 이용 관정의 수질 조사를 실시하였으며, 조사관정 수질의 현황과 강수량과의 관계, 수질 유형 분석 및 토지 이용별 수질현황을 분석하였다. 검토 결과 질산성 질소 항목은 강수량과 통계적으로 유의미한 양의 상관관계를 보였으며, 이는 토지 이용과 수반되는 다양한 활동으로 발생하는 인위적인 지표 오염물질 등이 강수 등에 의해 지하로 유입되었을 개연성을 보여준다. 지하수 수질유형을 분류한 결과 Ca-(Cl+NO₃) 유형과 Ca-HCO₃ 유형의 비율이 가장 많이 나타났으며, 주요 토지이용별 지하수 수질현황과 강수량과의 관계를 검토한 결과는 질산성 질소의 경우 주거지역과 농업지역에서 산림지역보다 상대적으로 높은 상관관계를 보였다. 매몰지로부터 지하수 관정까지의 거리에 대한 농도 분포는 일정한 경향을 보이지 않았다. 이와 같은 결과들은 매몰지의 영향 보다는 관정 주변의 토지이용과 같은 환경특성에 의한 영향이 보다 중요할 수 있음을 시사한다. 연구 결과는 가축매몰지 주변 지하수 오염 관리방안 및 가축매몰지역 환경조사지침을 마련하는데 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어: 가축매몰지, 지하수, 관정, 질산성 질소, 암모니아성 질소

Hyunkoo Kim, Sunhwa Park, Jongyeon Hwang, Moonsu Kim, Hunje Jo, Sangho Jeon, Kang-Kun Lee and Sung-Wook Jeon, 2017, Groundwater qualities of wells around carcass burial areas. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 3, p. 433-446

ABSTRACT: We investigated the groundwater qualities of wells around carcass burial areas, which had been constructed between 2011 and 2015. We evaluated the statistical distribution and temporal trends of water quality parameters, their relationships with precipitation, the types of groundwater compositions, and the correlation between water qualities and land use. The results showed that nitrate-nitrogen had a statistically-significant positive correlation with precipitation, suggesting that anthropogenic contaminants above the ground surface would infiltrate into groundwater during precipitation. The groundwater at the study areas were mainly classified into Ca-(Cl+NO₃) and Ca-HCO₃ types. When the nitrate-nitrogen contamination was closely examined in view of land use, it was found to have a stronger correlation with precipitation in residential-agricultural areas than in forest areas. Notably, the concentrations of nitrate-nitrogen, ammonium-nitrogen, and chloride showed no obvious trends along the distance from burial areas to groundwater wells. All of the above results indicate that such environmental variables as land use may have a more prevailing impact on the water qualities around carcass burial areas. This study can be useful in designing the management plan and preparing environmental investigation manuals for the groundwater contamination that is suspected to result from carcass burial.

Key words: carcass burial area, groundwater, well, nitrate-nitrogen, ammonium-nitrogen

(Hyunkoo Kim, Sunhwa Park, Jongyeon Hwang, Moonsu Kim, Hunje Jo and Sangho Jeon, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; Kang-Kun Lee, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea; Sung-Wook Jeon, Dept. of Earth and Environmental Sciences & The Earth and Environmental Science System Research Center, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea)

[†] Corresponding author: +82-63-270-3429, E-mail: sjeen@jbnu.ac.kr

1. 서 론

조류 인플루엔자(avian influenza; AI) 및 구제역 발병으로 전국적으로 2010년 말에서 2011년에 약 4,800개소, 2014년 이후 약 200개소의 가축매몰지가 조성되어 주변 지하수 오염 등 2차 환경오염에 대한 우려가 증대되고 있다. 이 기간에 전국에 걸쳐 긴급하게 가축매몰지가 조성되었기 때문에 긴급 조성한 매몰지 중 일부는 입지 조건이 기준에 적합하지 않을 수 있으며, 조성과정에서 미비점이 있을 가능성이 있다. 따라서 매몰지 주변 지하수 이용관정에 대한 지속적인 조사와 체계적인 수질정보 축적이 필요하며 지속적인 모니터링을 통해 국가 차원의 환경관리 대책이 필요한 상황이다.

이전 국내 매몰지 주변지역 조사 및 연구 사례를 살펴보면, Choi *et al.* (2013)은 2011년 1월에 구제역 발생으로 구축된 가축매몰지 중 4개의 매몰지를 대상으로 매몰시간이 경과함에 따라 침출수의 특성이 어떻게 변하는가를 물리화학적, 분자미생물학적 방법을 이용하여 비교하였다. 그 결과 전기전도도(electrical conductivity; EC), 용존산소(dissolved oxygen; DO), HCO_3^- , 총유기탄소(total organic carbon; TOC), T-N과 SO_4^{2-} 의 함량이 초기보다 중기 침출수 자료에서 높게 나타나는 것을 확인하였으며, pH는 감소하는 형태로 나타남을 보여주었다. Kang and An (2013)은 구제역 매몰지에서 발생하는 유기물의 성상이 지하수, 호소수, 하천수 등 자연수에서 나타나는 유기물의 성상과 어떻게 다른지를 비교 연구하였으며, 침출수는 자연수와 전혀 다른 유기물의 거동을 나타낸다는 것을 발견하였다. Pakr *et al.* (2013)은 미생물 군집 분석을 통한 지속적인 모니터링이 병원성 미생물의 존재여부 및 적절한 매몰지 관리가 이루어지고 있는지를 평가할 수 있는 방안으로 활용될 수 있다는 것을 제시하였다. Cho (2014)는 살처분 가축을 단시간에 대량으로 매몰한 결과 부적절한 매몰지 선정과 지침 미준수 방수처리로 인해 침출수, 악취 및 병원성균 등으로 2차 환경오염이 발생하여 다양한 비매몰식 가축사체 처리방법이 강구되었지만 대부분의 가축사체 처리방법이 국내 축산환경에 적합하지 못하고 실용화가 어려울 뿐만 아니라 처리 후 부산물 생성으로 또 다른 환경오염 문제가 발생하였다고 보고하였다. 또한 Nam *et al.* (2015)은 지형과 지하수 유동

방향이 다른 3가지의 매몰지를 대상으로 하여 가축매몰지에서 확산되는 침출수의 정화를 위한 시추공의 위치 및 개수 선정을 제안하였다.

해외에서도 매몰지에 의한 지하수 오염현황을 파악하기 위해 연구 및 조사를 실시하였다. 미국의 아이오와주(Glanville, 1993, 2000)에서는 사체 부패 속도, 유출된 오염물질의 양과 종류, 지하수에 미치는 영향에 관한 연구를 위해 매몰지 두 곳을 관측하였고, 미국 델마버 반도(Ritter and Chirnside, 1995)에서는 죽은 새를 묻은 구덩이에 의한 지하수 수질 영향을 확인하기 위하여 조사를 실시하였다. 영국 에펜트(UK Environment Agency, 2001) 지역의 매몰지에서 2002년 8월 주요 검사 결과, 매몰지로부터 아래쪽에 있는 작은 하천의 용존 산소가 계속 감소하는 등 일부 환경적 문제가 잔존하는 것으로 확인되었다. 영국 스코틀랜드의 버크쇼 포레스트(Enviros Aspinwall, 2001, 2003)는 2001년 5월 악취 발생에 대한 민원으로 모니터링을 개시한 지역이다. 조사결과 약 3년이 지난 2004년에도 침출수가 고농도로 유지되고 있었다. Yuan *et al.* (2013)은 소 매몰지를 대상으로 가축매몰지 현장 구축이 잠재적 지하수 수질에 어떤 영향을 미치는지를 연구하였으며, 매몰지에서의 침출수 발생량, 농도 등의 경향을 파악하기 위해 소 매몰지를 대상으로 2년간 모니터링을 실시하였다. 한편 대만에서는 1997년 구제역으로 총 6144개의 농장에서 돼지 약 385만두가 살처분되었고 주요 처분 방식은 매몰방식이었다(약 285만두 매몰). 매몰 이후에 정기적인 지하수 수질 조사를 통해서 총박테리아수, 분변대장균, 살모넬라균, 아질산성 질소, 질산성 질소, 암모니아성 질소, 황산이온과 총용존고형물(total dissolved solid; TDS)와 같은 지시자들의 농도가 매몰 이후 시간에 따라 증가함을 관측하였다(Hseu and Chen, 2017).

매몰지 주변지역 관정 수질에 대한 국내외 사례를 검토한 결과, 국내의 경우 매몰지와 인접한 일부 경계부(5 m 이내) 관측정에서 침출수와 관련된 물질 등의 농도가 높은 것으로 확인되어 침출수의 영향이 의심된 사례가 있으며, 침출수 기원의 물질에 의한 지표수 및 지하수 영향 가능성이 제시된 사례가 있다. 국외에서는 사체 매몰 시 라이닝하지 않은 트렌치에서 발생한 침출수가 지하수에 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 매몰지 주변 지하수에서 질소에 의한 지하수 오염 가능성이 보고되어 질소 관련 물질에 의한 지

하수 영향에 중점을 두고 매몰지에 대한 장기적인 모니터링과 관리가 필요한 것으로 제시되었다(Ritter and Chirnside, 1995). 또한 전체적으로는 환경영향 또는 공공의 건강에 미치는 영향은 적지만, 부분적으로 피해가 발생할 가능성이 있어 수질영향 등의 가능성을 제시하기도 하였다(Enviros Aspinwall, 2001, 2003).

따라서 가축매몰지 주변 지하수의 수질실태를 파악하여 먹는물의 안전성을 확보하고, 시의성 있는 가축매몰지 주변 관정의 지하수 수질정보 제공을 통해 과학적인 정책 수립지원 및 관리지원체계를 강화하기 위한 연구가 필요하다고 생각된다. 본 연구의 목적은 매몰지 주변 관정의 수질조사 결과에 대한 통계분석과 매몰지 주변 침출수 영향 가능성 평가 등을 종합하여 가축매몰지 주변 지하수오염 관리방안 및 가축매몰지역 환경조사지침을 마련하는데 기여하는 것이다. 본 연구에서는 “가축매몰지역 환경관리지침(Ministry of Environment, 2010)”에 따라 2011년부터 2015년까지 조성된 가축매몰지를 대상으로 매몰지 주변에 위치하는 지하수 이용 관정의 수질조사를 실시하였으며, 조사관정 수질의 현황과 강수량과의 관계, 수질 유형 분석 및 토지 이용별 수질현황을 제시하였다. 나아가 현재의 수질조사 제도의 문제점 등을 분석하고 향후 매몰지 주변 지하수수질 조사 및 연구에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 조사대상 관정 선정

2010년 말부터 긴급 조성된 가축매몰지 주변지역에 대해 환경부와 지방자치단체는 ‘가축매몰지역 환경관리지침(Ministry of Environment, 2010)’에 따라 2011년 매몰지 주변 300 m 이내에 위치하는 지하수 이용 관정을 선정하여 조사하였다. 2011년 조사대상 관정 수는 2,500개이다. 2012년 조사대상 관정 선정 시에는 매몰지로부터의 이격거리가 300 m 이상인 관정 등 매몰지로 인한 영향 가능성이 낮은 관정은 조사대상에서 제외하는 반면, 과거 매몰지 주변지역 이용관정에 대한 지하수 수질조사가 실시되지 않은 관정을 추가로 조사대상으로 선정하였다. 2012년 조사대상 관정 수는 3,000개이다.

2013년 조사대상 관정은 2012년 하반기에 조사한

3,000개 관정 중 지방자치단체에서 조사하는 매몰지 주변지역의 조사관정은 중복조사를 고려하여 제외하였으며, 이설 완료된 매몰지에 대해서도 해당 조사관정을 제외하였다. 이러한 조사관정 조정을 통해 마련된 2013년도 조사대상 관정은 총 1,340개이다. 2014년에는 2013년 하반기에 조사한 관정과 지방자치단체 조사관정을 후보군으로 하여 ‘가축매몰지역 환경조사지침(Ministry of Environment, 2013)’에 따라 조사관정을 선정하였고, 2015년에는 2014년 하반기 조사관정 중 관련 지침에 따라 2년 연장이 필요한 매몰지 중 지방자치단체 미조사 매몰지와 신규로 조성된 매몰지 중 지방자치단체에서 미조사한 매몰지를 대상으로 조사관정을 선정하였다.

가장 최근인 2016년 조사대상 관정은 2010년 또는 2011년에 조성된 5년 이상 매몰지 중 ‘가축매몰지역 환경조사지침(Ministry of Environment, 2015)’에 따라 환경관리가 필요한 것으로 판단되는 매몰지와, 2014년 이후 고병원성 조류인플루엔자 및 구제역 발생으로 조성된 3년 미만의 매몰지 주변관정을 대상으로 선정하였다. 2016년에 2회의 반기조사와 5회의 2차조사를 수행하여 매몰지 주변지역 이용관정 1,151공의 지하수 수질조사 결과를 획득하였다. 본 연구에서는 2011년부터 2016년까지 총 14회에 걸쳐 분기 및 반기 조사를 실시한 23,422개 시료에 대한 결과를 종합 분석하였다.

2.2 조사 및 분석 방법

2.2.1 매몰지 및 이용관정 현황조사

지하수 수질조사 전 조사대상 지점의 현황에 대해 파악하였다. 우선 조사대상 가축매몰지의 주요 매몰축종, 매몰두수, 매몰일 등의 기본 현황 정보를 조사하였으며, 조사대상 주변 관정에 대해서는 매몰지로부터의 이격거리를 파악하고 관정의 위치(주소 및 UTM 좌표), 관정 제원을 조사하였다. 관정 제원표를 기준으로 음용여부와 생활용, 농업용(어업용 등 포함), 공업용(기타 용도 포함) 등의 관정 용도를 분류하였으며, 관정 제원표 등의 자료가 없는 경우에는 청취조사를 통해 이용관정의 용도와 심도 등을 확인하였다. 매몰지가 조성된 지역 주변은 대부분 축산이나 농업 활동이 활발하기 때문에 매몰지에 의한 영향 외에도 축사 및 퇴비처리시설이나 농사에 사용되는 비료 등의 오염원이 지하수 수질에 영향을 줄 가능성이 높다. 따

라서 조사대상 관정 주변에 위치하는 매몰지 이외의 기타오염원 유무에 대해서도 조사를 실시하였다.

2.2.2 현장 지하수 수질조사

지하수는 채취 전 현장수질측정 항목의 측정값이 안정될 때까지 양수(퍼징)하였다. 안정화된 후 지하수 시료는 기포가 발생하지 않도록 양수량을 조절하여 채취하였으며, 대기접촉에 의한 변질을 방지하기 위해 채수병(무균채수병 및 멸균병) 상부에 빈 공간(headspace)이 발생하지 않도록 주의하여 시료를 채취하였다. 시료채취와 병행하여 대기와의 접촉 및 온도 변화에 민감한 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 수온, 용존산소(DO), 산화환원전위(Eh), 총용존고형물(TDS)의 5개 항목은 안정화된 값을 현장기록지에 기록하였다. 시료의 운반 및 보관은 냉장상태(0~4℃)를 유지하여 변질을 방지하였으며, 오염도가 높을 것으로 예상되는 시료는 별도로 분류하여 보관, 운반하였다.

2.2.3 수질시료 분석

반기조사 시료의 분석항목은 총대장균군, 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 암모니아성 질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 염소이온(Cl)의 4개 항목이다. 위 4개 항목은 시료채취 시 확인된 음용여부를 기준으로 음용과 비음용(생활용, 농업용, 공업용)으로 분류하여 각각 먹는물공정시험기준(음용인 경우)과 수질오염공정시험기준(비음용인 경우)의 방법을 적용하여 분석하였다. 질산성 질소, 암모니아성 질소, 염소 이온은 각각 이온크로마토그래피, 자외선/가시선 분광법, 이온크로마토그래피로 분석하였으며, 검출한계는 각각 0.1, 0.01, 0.4 mg/L이다. 2016년 2차 조사의 분석항목은 반기조사 분석항목(총대장균군, 질산성 질소, 암모니아성 질소, 염소이온)에 K, Na, Ca, Mg, HCO_3^- , $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, SO_4^{2-} , T-N, TOC의 9개 항목을 추가한 총 13개 항목이나, 본 논문에서는 반기조사와 공통항목인 질산성 질소, 암모니아성 질소, 염소이온의 결과에 대해서만 논하고자 한다. 그 중에서도 특히 매몰지 영향에 대한 시사점이면서 가장 대표적인 농촌 지하수 오염물질인 질산성 질소에 초점을 맞추었다. 총대장균군 항목도 공통 조사 항목이지만, 음용관정의 경우 분석결과가 검출 또는 불검출로 표기되어 전체를 수치화하는 데 어려움이 있어 제외하였다.

2.3 통계분석 및 수질유형 분류

수집된 수질조사 결과에 대해서 조사시기별, 조사항목별, 그리고 지역별 최소값, 중앙값, 최대값, 평균값, 표준편차 등의 기본통계량 분석을 실시하였다. 기본통계량 분석 결과는 시기별, 항목별, 지역별 수질변화 경향성을 판단하는 데 활용하였다.

수질유형은 파이퍼도(Piper diagram)에 도식화하여 지하수의 수질특성에 따라 4가지 유형으로 분류하였다. 축산분뇨 등과 같은 인위적 오염의 영향으로 NO_3 가 검출될 가능성이 있으므로, 본 연구에서는 Cl, SO_4 와 함께 NO_3 도 함께 고려하여 영역을 분류하였다. 각 영역은 양이온을 Na과 K가 우세한 Na 유형, Ca과 Mg가 우세한 Ca 유형으로 표현하였으며, 음이온은 HCO_3 가 우세한 HCO_3 유형과 SO_4 , Cl, NO_3 이 우세한 Cl 유형으로 표현하였다. 이들 유형을 고려하여 본 연구에서는 수질 유형을 Ca-(Cl+ NO_3), Ca- HCO_3 , Na-Cl, Na- HCO_3 총 4가지로 구분하였다. 일반적으로 오염되지 않은 천부지하수는 Ca- HCO_3 유형을 보이며, 농업활동이나 생활하수 등의 인위적인 오염원에 영향을 받아 Ca-(Cl+ NO_3) 유형을 보이게 된다. Ca- HCO_3 유형의 천부지하수는 지하수 유동경로가 길어짐에 따라 지질매체와 반응하여 Na- HCO_3 유형으로 바뀌게 된다. Na-Cl 유형은 주로 해수의 영향을 받아 나타난다. 그러나 이러한 수질유형별 특징은 일반적인 수리지구화학적 조건에서 나타나는 것으로 다양한 환경조건에 의해 수질유형과 수질유형별 특징이 다소 다르게 나타날 가능성이 있다. 본 연구에서는 대량의 자료를 일반화하여 평가하는데 목적을 두고 수질 유형을 평가하였으며, 수리지구화학적 조건에 큰 차이가 없는 것으로 가정하였다.

2.4 토지이용과 지하수 수질현황 비교분석

매몰지로 인한 수질 영향뿐만 아니라 조사관정의 수질은 비료시비, 축산시설 등의 토지이용에 의한 영향을 받을 수 있으므로 조사관정 주변지역의 토지이용과 수질현황도 비교·분석하였다. 조사관정 주변지역의 토지이용현황은 환경부 공간정보 DB인 토지피복지도를 이용하였다. 토지피복지도는 지표면의 현황을 가장 잘 반영하기 때문에 지표면의 투수율에 의한 비점오염원 부하량 산정, 비오름 지도작성에 의한 도시계획, 환경영향평가 등에 폭넓게 활용되고 있다. 토지피복 분류는 대표적인 토지이용 7개 항목으로 대

분류되며, 중분류는 22개, 세분류는 41개 항목으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 주거지역(농축산지역의 시가화·건조지역), 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지 및 수역으로 분류되어 있는 대분류 항목을 이용하였으며, 조사관정 주변의 주요 토지이용과 조사결과를 비교·분석하여 지하수 수질 현황을 분석하였다. 이 때 조사관정 중심으로 반경 100 m 내의 토지이용 면적을 검토하여, 가장 큰 비율을 보이는 항목을 주요 토지 이용으로 결정하였다.

3. 연구 결과

2011년~2016년 분기 및 반기 조사결과를 이용하여 시기별 지하수 수질현황, 시기별 지하수 수질유형 변화, 토지이용별 수질현황을 검토하였다. 또한 질산성 질소가 고농도로 검출된 지역에 대해 매몰지와의 이격거리별 농도변화를 검토하였다.

3.1 시기별 지하수 수질현황과 강수량과의 관계

매몰지 주변 지하수 이용관정의 수질현황에 대해 최소값, 중앙값, 최대값, 평균, 표준편차 등 기본 통계분석을 통해서 검토한 결과 수질은 조사 시기에 따라 불규칙하게 변화하였다. 이러한 변화는 매몰지의 영향이 일부 반영된 것일 수 있지만, 농촌지역의 농경활동 변화와 함께 기타 환경인자의 영향도 있을 것으로 예상된다. 지하수 수질이 인위적인(지표) 오염원에 의한 영향을 받은 경우, 지표 오염물질 등은 강수 등에 의해 지하로 유입될 가능성이 크므로, 강

수량과 수질 농도현황은 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. Lee *et al.* (2009)과 Ki *et al.* (2015)이 농촌 지역에서 강수량에 따라 지하수내 오염물질의 용출량이 증가하는 것으로 보고한 바 있으므로, 본 연구에서도 수질 현황에 영향을 줄 것으로 예상되는 기타 환경인자 중 강수량과의 관계에 대해 검토하였다(그림 1).

2011년 분석결과를 살펴보면, 강수량이 증가하는 6~7월에 질산성 질소 농도가 함께 증가하며, 강수량이 감소하는 7~9월에는 질산성 질소 농도도 함께 감소하는 경향을 보인다. 이와 같이 강수량이 증가하는 시점에 질산성 질소 농도도 증가하는 경향을 보이는 시기는 2012년 7월~9월, 2013년 8월~10월, 2014년 5월~8월, 2015년 5월~6월, 8월~9월, 2016년 8월~9월 에도 확인할 수 있다(그림 1).

강수량이 증가하는 시점에 질산성 질소의 농도 증가가 확인되는 시기는 7월~9월, 5월~6월 등 연도별, 월별로 차이는 있으나 대체로 1년 중 강우가 집중되는 시기라는 공통점을 가진다. 집중 강수량의 기준을 250 mm로 설정하여 250 mm 이상인 조사시기와 그렇지 않은 시기로 구분한 후 각각 조사관정이 50개소 이상인 시기를 그룹화 하여 강수량과의 관계를 분석하였다. 분석 결과, 강수량이 250 mm 이상인 그룹은 질산성 질소 농도와 강수량이 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났으며, 상관계수(R^2)가 0.70으로 통계적으로 유의미한 상관성을 보인다(그림 2). 이는 지하수의 질산성 질소가 토지이용으로 수반되는 비료 시비 및 퇴비사용 등 다양한 활동으로 발생하는 인위적인 지표 오염물질 등이 강수 등에 의해 지하로 유

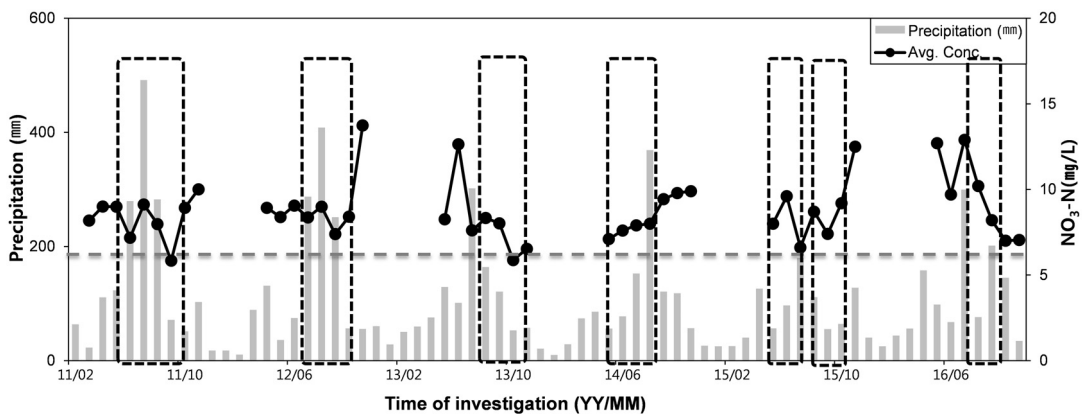


Fig. 1. Temporal trends of NO₃-N (average concentration) vs. precipitation.

입되었을 개연성을 보여준다. 다만, 2012년 11월 등 강수량이 비교적 적은 시기에 질산성 질소 농도가 높게 검출되는 현상은 관정 주변으로 제한된 국지적인 지역 특성과 재배작물 특성 등에 따른 비료시비 시기 등의 환경 요소들이 복합적으로 작용하여 나타난 결과일 가능성이 있으므로, 추가적인 조사가 필요하다. 또한 대수층 상부 지층의 투수율이 낮을 경우 강우 효과가 지연될 수 있는데(Ki *et al.*, 2015), 본 연구에서 전체 관정에 대한 효과는 두드러지지 않는다(그림 1).

암모니아성 질소는 강수량과 관계없이 농도 증가가 불규칙적이거나, 일부 강수량이 250 mm 이상으로 증가하는 시점에 농도가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 강우와 함께 지하로 유입된 산소가 암모니아성 질소를 질산성 질소로 산화시켜 암모니아성 질소의 농도를 감소시키고, 질산성 질소 농도를 증가시킨 원인일 수 있다(Böhlke *et al.*, 2006). 실제 강수가 집중된 2011년 7월, 2012년 7월에 질산성 질소 농도는 증가하지만, 암모니아성 질소 농도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 강수량-암모니아성 질소-질산성 질소와의 관계를 입증하는 일부 결과이며, 암모니아성 질소 농도는 2011년~2016년 11월까지 조사를 실시한 총 28,628개 시료 중 80.2%에 해당하는

22,963개에서 불검출로 처리되어 변화경향 파악에 불확실성이 존재한다. 염소이온 농도는 강수량의 변화와 관계없이 불규칙적인 경향을 보이며, 강우가 250 mm 이상으로 집중되는 시기에 양 또는 음의 상관성을 보여주지 않았다.

3.2 지하수 수질유형

지하수의 수질특성을 파악하기 위해 파이퍼도(Piper diagram)를 이용하여 수질유형을 분류하였다(그림 3; 2016년 6월 2차조사의 예). 2011년부터 2016년까지 1단계 매몰지 또는 암모니아성 질소와 염소이온이 동반 검출되어 조사를 실시한 관정은 총 5,206개소로서 전체 조사 대상에 대한 수질유형 분류결과 Ca-(Cl+NO₃) 유형이 3,335개소(64.2%)로 가장 많았으며, Ca-HCO₃ 유형이 1,569개소(30.2%)로 뒤를 이었다. Na-Cl 유형은 221개소(4.3%), Na-HCO₃ 유형은 71개소(1.4%)로 분류되어 Na-Cl과 Na-HCO₃ 유형이 차지하는 비중은 매우 작았다.

시기별로 살펴보면, 총 31회의 조사 시기 중 19회(61.3%)의 조사 시기에 Ca-(Cl+NO₃) 유형이 51.4%~100.0%로, Ca-HCO₃, Na-Cl, Na-HCO₃ 유형보다 우세하게 나타났다. 2011년 9월, 11월, 2013년 7월,

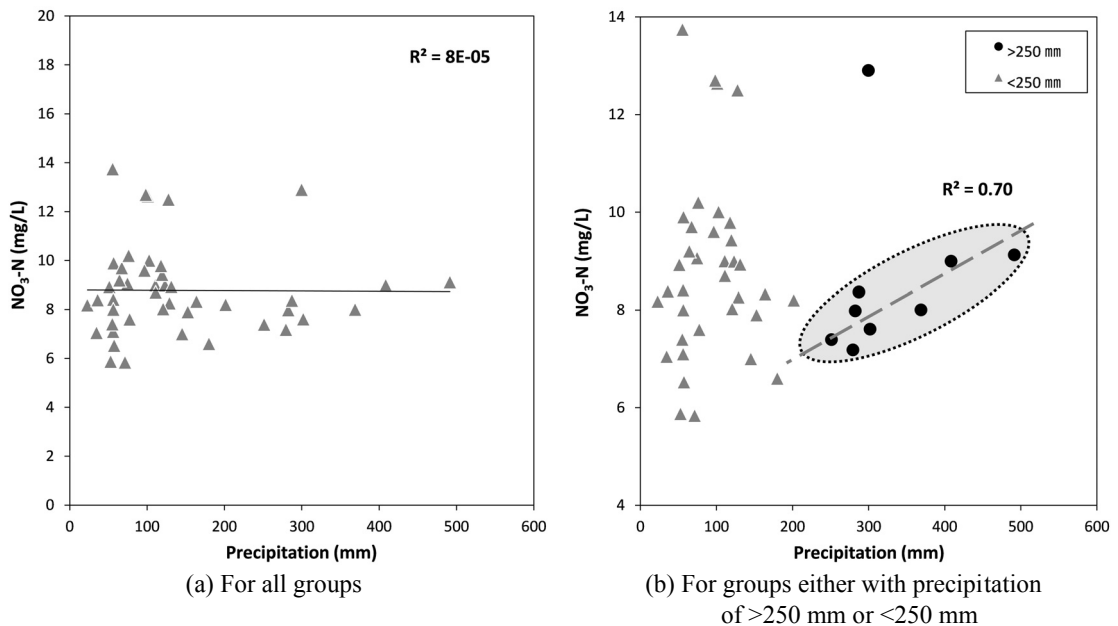


Fig. 2. Relationship between NO₃-N (average concentration) and precipitation: (a) for all groups and (b) for groups either with precipitation of >250 mm or <250 mm.

2014년 6월, 11월, 2015년 7월, 9월, 10월, 11월, 2016년 9월, 10월에 해당하는 11회(35.5%)의 조사 시기에는 Ca-HCO₃ 유형이 49.0%~72.7%의 범위로 우세하게 나타났다. Na-Cl, Na-HCO₃ 유형은 각각 0.6%~14.3%, 0.3%~10.0% 범위로, Ca-(Cl+NO₃) 유형이나 Ca-HCO₃ 유형에 비해 작은 비율을 차지하였다.

위의 4가지 수질유형 중 가장 우세한 Ca-(Cl+NO₃) 유형과 Ca-HCO₃ 유형은 서로 증가 및 감소 시기가 대체적으로 반대로 나타나는 형태를 보였다. 수질유형의 변화는 상호 연관성이 있는 것으로 추정되어 강수량과의 관계를 살펴보았다(그림 4). 조사대상 관정수가 50개 이상인 시기 중 2011년~2013년, 2015년의 Ca-(Cl+NO₃) 유형은 해당 년도의 5월과 6월에 높은 비율을 보이거나, 자연상태의 천부지하수 유형으로

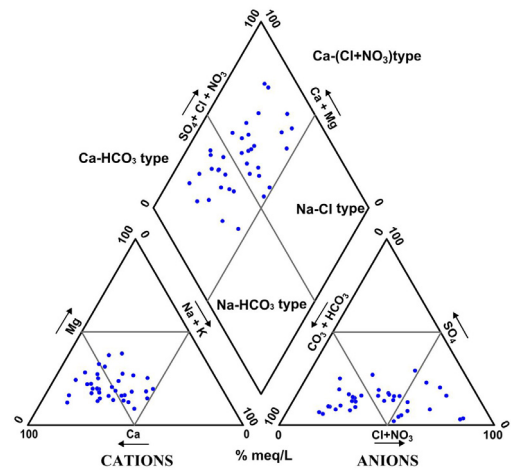
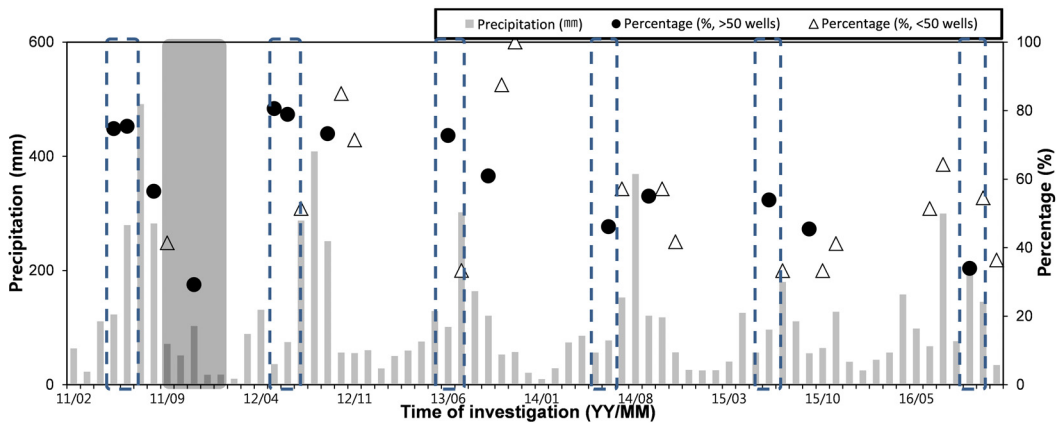
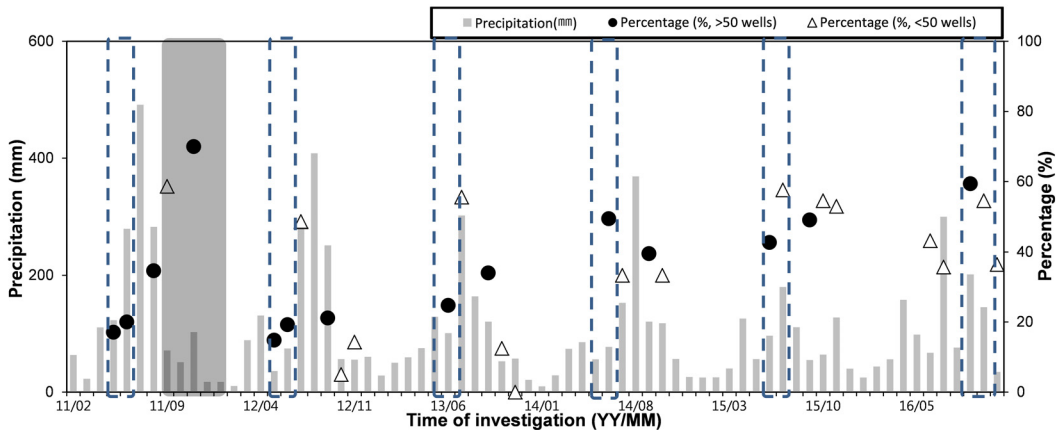


Fig. 3. An example of Piper diagram for representing groundwater types (June, 2016).



(a) Ca-(Cl+NO₃) type



(b) Ca-HCO₃ type

Fig. 4. Temporal changes in proportion of groundwater types and precipitation: (a) Ca-(Cl+NO₃) type and (b) Ca-HCO₃ type.

추정되는 Ca-HCO₃ 유형은 5월과 6월에 상대적으로 낮은 비율로 나타났다. 특정시기에 Ca-(Cl+NO₃) 유형이 높게 나타나는 것은 해당시기의 특정 활동이 지하수 수질에 영향을 주는 것을 시사한다.

Kang *et al.* (2001)과 Lee *et al.* (2008)은 축분 또는 비료시비가 활발한 4월과 5월에 질산성 질소 등이 높은 농도를 보이는 것으로 보고한 바 있어, 비료시비가 활발한 시기와 강수량이 증가하는 시기가 일치하는 5월과 6월에 Ca-(Cl+NO₃) 유형이 높은 비율을 보이는 현상은 축분 또는 비료시비의 영향과 강수의 영향이 반영된 결과로 판단된다. 반대로, 2011년 8월과 11월 등 강수량이 감소하는 시기에는 Ca-

(Cl+NO₃) 유형의 비율은 감소하는 경향을 보였다.

본 연구에서도 강수량이 집중되는 시기에 축산 또는 비료시비 등으로 축적된 지표 오염물질 등이 강수를 따라 대수층으로 유입되는 현상 등에 의해 Ca-(Cl+NO₃) 유형의 비율이 높게 나타난 결과로 판단되며, 매몰지 주변지역의 지하수 수질은 농경활동으로 인한 비료시비, 축산활동 등에 의한 축분 등이 강수의 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 본 평가 결과는 전체 조사관정의 수질유형의 비율로 실시되어 조사관정 각각의 매몰지 영향여부 평가에는 한계가 있을 수 있다.

한편, 농촌 지역 지하수에서 질산성 질소와 염소

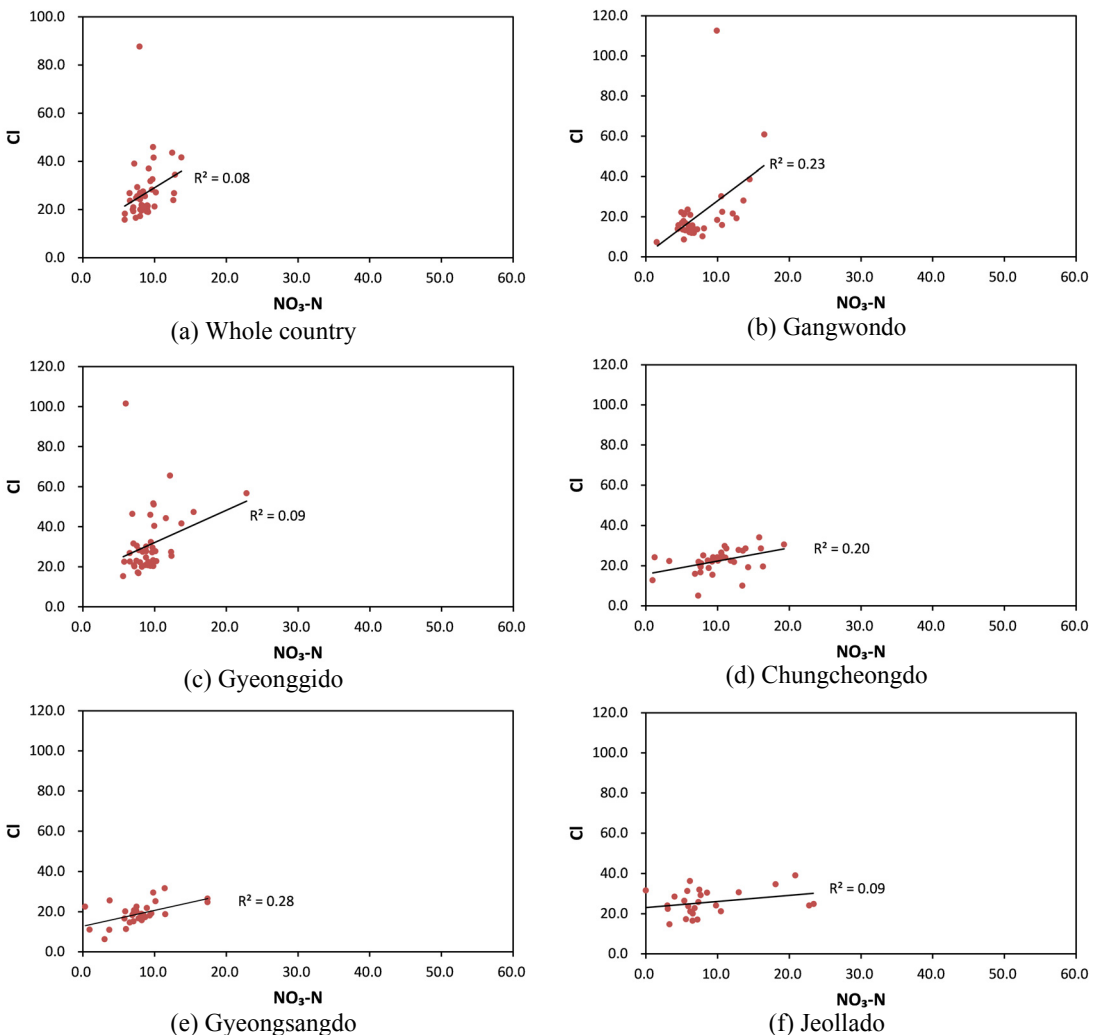


Fig. 5. Correlation between NO₃-N and chloride concentrations: (a) whole country, (b) Gangwondo, (c) Gyeonggido, (d) Chungcheongdo, (e) Gyeongsangdo, and (f) Jeollado.

이온 농도가 같은 오염원으로부터 유래했을 경우 상관성을 보여주므로(Ki *et al.*, 2015), 본 연구에서의 조사 지역별 질산성 질소와 염소 이온과의 상관관계를 도시해 보았다(그림 5). 결과는 미약하지만 어느 정도의 상관관계를 보여줌으로써 두 물질이 같은 오염원으로부터 기원했을 수 있음을 나타내고 있다.

3.3 토지이용별 수질현황

2011년부터 2016년까지 총 14회에 걸쳐 분기 및 반기 조사를 실시한 23,422개 시료의 주변지역 주요 토지이용을 분석한 결과는 표 1과 같다. 토지이용 형태 중 농업지역이 70.9%(16,604개소)로 가장 높은 비율을 보이며, 그 다음으로 산림지역이 14.0%(3,271개소), 주거지역이 13.0%(3,048개소)의 순이다. 초지,

나지, 습지 및 수역은 각각 1.4%(321개소), 0.7%(166), 0.0%(8개소), 0.0%(4개소)로 전체의 2.1%로 매우 작은 비율을 차지한다. 위 분석 결과로 볼 때, 조사대상 관정의 주요 토지이용형태는 농업지역, 산림지역, 주거지역임을 알 수 있다.

23,422개 조사관정의 토지이용 형태에 따라 토지 이용별 질산성 질소, 암모니아성 질소, 염소이온의 지하수 수질현황을 비교 분석하였으며, 각 항목의 지하수 수질현황은 그림 6와 같다. 주요 토지이용별 지하수 수질현황을 중앙값을 이용하여 비교해보면, 질산성 질소는 주거지역과 농업지역에서 산림지역보다 상대적으로 높은 값을 보이며, 염소이온도 질산성 질소와 마찬가지로 주거지역과 농업지역에서 높다. 암모니아성 질소는 토지이용별 중앙값의 차이가 미미

Table 1. Number of wells investigated between 2011 and 2016, classified in terms of main land use in the nearby areas.

Year	Residential area ¹	Agricultural area ²	Forest area	Grass land	Wetland	Barren ground	Water area	Total
2011	1,543	6,852	1,446	102	4	51	2	10,000
2012	804	4,281	815	63	2	35		6,000
2013	306	1,893	415	40	2	22	2	2,680
2014	195	1,526	268	35		12		2,036
2015	122	1,366	182	22		8		1,700
2016	78	686	145	59		38		1,006
Total	3,048	16,604	3,271	321	8	166	4	23,422

¹Residential area: urbanized area within the agro-livestock area and dry area

²Agricultural area: farmland, ranch, fish farm, etc

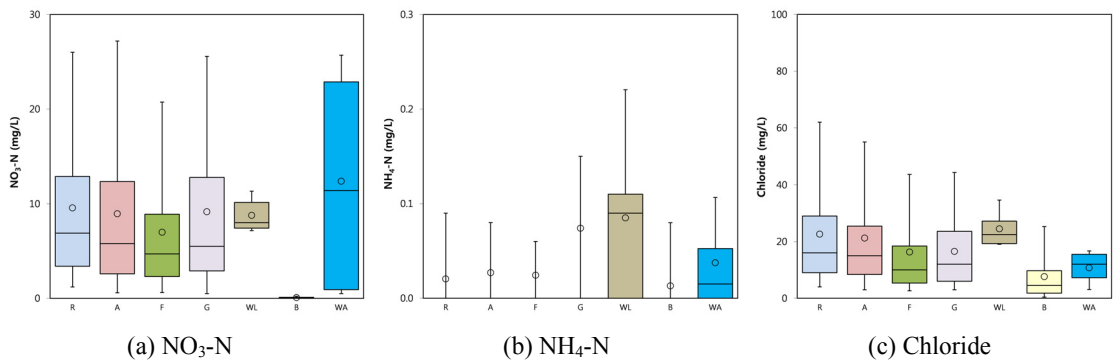


Fig. 6. Groundwater qualities of the investigated wells classified in terms of main land use in the nearby areas: (a) NO₃-N, (b) NH₄-N, and (c) chloride. The values indicated in the box plot represent 5% quantile, 25% quantile, median, 75% quantile, and 95% quantile, respectively, while open circles represent the average values. Note that R, A, F, G, WL, B, and WA represent residential area, agricultural area, forest area, grass land, wetland, barren ground, and water area, respectively.

하다. 주거지역과 농업지역에서 질산성 질소와 염소 이온이 다른 토지이용 형태보다 높은 농도를 보인 것은 주거지에서 발생하는 생활오염물질, 비료시비 등의 농경활동, 가축사육 및 분뇨 적치 등의 축산활동 등의 영향을 받은 것으로 판단된다. 즉, 매몰지에 의한 영향보다는 토지이용으로 발생하는 다양한 활동에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단할 수 있다. 이는 농촌 지역 지하수의 질산성 질소 농도가 토지이용과 밀접한 관련이 있다는 기존의 연구와도 비슷한 결과이다(Koh *et al.*, 2009; Ki *et al.*, 2015).

지하수 수질 농도가 강우가 집중되는 시기에 주거지역과 농업지역에서 상관성이 높게 나타날 것으로 예상되어 토지이용을 크게 주거농업(주거 및 농업)과 산림 등(산림, 초지, 습지, 나지, 수역) 지역으로 나누어 강수량과의 상관관계를 검토하였고, 주거농업 지역과 산림 등 지역의 질산성 질소 농도와 강수량과의 관계는 각각 그림 7과 그림 8에 나타나 있다.

전체 조사 시기를 볼 때, 주거농업 지역의 질산성 질소 농도는 강수량과 상관성을 보이지는 않는다. 그러나 조사대상 관정이 50개소 이상인 시기만 분류하여 강수량과의 상관성 분석을 수행한 결과, 강수량이 250 mm 이상으로 강우가 집중된 시기에 상관계수

(R^2)가 0.62로 통계학적으로 양의 상관성을 가지는 것으로 분석되었다(그림 7). 산림 등 지역에서의 조사 시기 전체 결과를 볼 때, 질산성 질소 농도는 강수량과 상관성을 보이지는 않는다. 다만, 주거농업지역과 마찬가지로 조사 대상 관정이 50개소 이상인 기간만을 분리하여 강수량이 250 mm 이상인 시기와의 상관성 분석을 수행하면 상관계수(R^2)가 0.79로 통계학적으로 양의 상관성을 가지는 것으로 분석되었다(그림 8). 강우 집중시기에 전체 조사시기보다 상관성이 높은 것은 강우 집중시기에 지하수내 지표물질 유입 현상이 지배적으로 일어난 결과로 판단된다. 강우가 집중되는 시기 외에는 지하수 수질에 영향을 주는 다양한 관개, 생활용수 사용 등의 다양한 인위적 활동이 혼재되었을 가능성이 있다.

전체 조사 시기를 볼 때, 주거농업 지역과 산림 등 지역에서 암모니아성 질소 농도는 강수량과 상관성을 보이지 않았다. 암모니아성 질소는 대부분(80.2%)의 시료에서 불검출되어 강우와 명확한 상관성을 보이지 않은 것으로 판단된다. 염소이온도 주거농업 지역과 산림 등 지역 모두 강수량과 상관성을 보이지 않았다. 염소이온은 보전성 등 항목의 특성, 다양한 기원 등에 의해 강우와 연관성이 약하게 나타났을

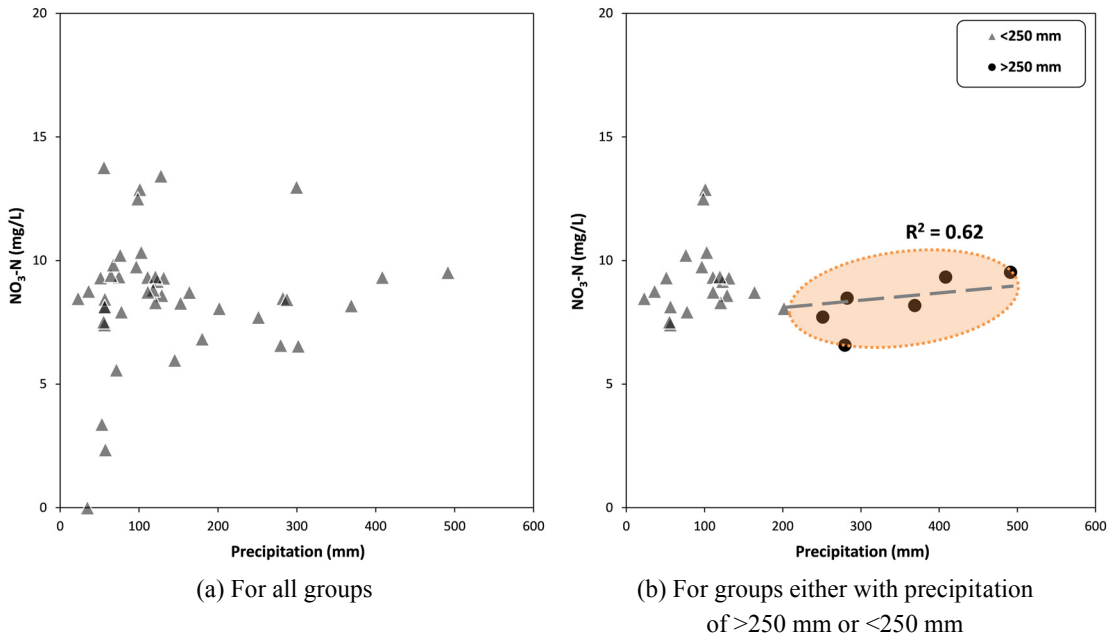


Fig. 7. Relationship between $\text{NO}_3\text{-N}$ (average concentration) and precipitation in residential-agricultural area: (a) for all groups and (b) for groups either with precipitation of >250 mm or <250 mm.

가능성이 있다.

3.4 매몰지와의 이격거리별 농도변화

매몰지에서 침출수의 유출이 발생하여 주변의 지하수 이용관정에 영향을 준다면 매몰지로부터 가까운 관정부터 그 영향이 먼저 관측이 되고 더 멀리 이격된 관정에서는 침출수의 영향이 관측되는 시점이 늦어질 것으로 판단된다. 즉, 매몰지로부터의 거리가 가까운 관정에서 농도가 높고, 멀리 떨어진 관정에서는 낮은 농도로 관측될 것이다. 따라서 고농도로 검출되는 지점에 대한 원인을 분석하기 위해 조사 관정과 매몰지와의 거리에 따른 농도 분포를 검토하였다. 조사 지점이 비교적 고정적인 분기 및 반기조사 결과를 바탕으로 조사관정의 매몰지로부터 조사 대상 관정까지의 거리를 50 m 단위로 분리하고, 거리별 질산성 질소, 암모니아성 질소, 염소이온에 대한 수질 농도를 비교하였다(그림 9).

질산성 질소의 농도 평균값과 중앙값을 살펴보면, 매몰지로부터의 이격거리가 50 m 이하에서 150 m로 증가함에 따라 농도는 감소한다. 150 m~200 m에서는 다시 증가한 후 250 m에서 다소 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보인다. 암모니아성질소의 평

균농도는 이격거리 증가에 따른 변화 경향을 보이지 않으며, 염소이온은 이격거리가 멀어질수록 농도가 감소하는 경향을 보였으나, 감소량은 최대 2.9 mg/L로 미미하다.

위 결과를 볼 때 매몰지로부터 지하수 관정까지의 거리가 증가함에 따라 농도가 감소하는 일정한 경향을 보이지 않으므로, 지하수 관정에서의 고농도 검출은 매몰지의 영향 보다는 관정 주변의 토지이용과 같은 환경특성에 의한 영향일 가능성이 크다. 다만 질산성 질소와 염소이온의 평균농도가 50 m 이하 그룹에서 가장 높은 값을 보여 매몰지의 영향을 의심할 수 있으나, 매몰지가 대부분 축산 농가 내에 위치한다는 것을 고려하면, 축산시설의 영향도 배제할 수 없다. 이러한 결과는 앞서 검토한 강수량과 토지이용의 연관성과 동일한 결과로, 지하수의 수질이 주변 토지이용에 영향을 받아 나타난 결과로 판단된다.

4. 결론 및 향후 연구

조류 인플루엔자 및 구제역 발병으로 전국적으로 조성된 가축매몰지로 인해 주변 지하수 오염 등 2차 환경오염에 대한 우려로 국가차원의 환경관리 대책

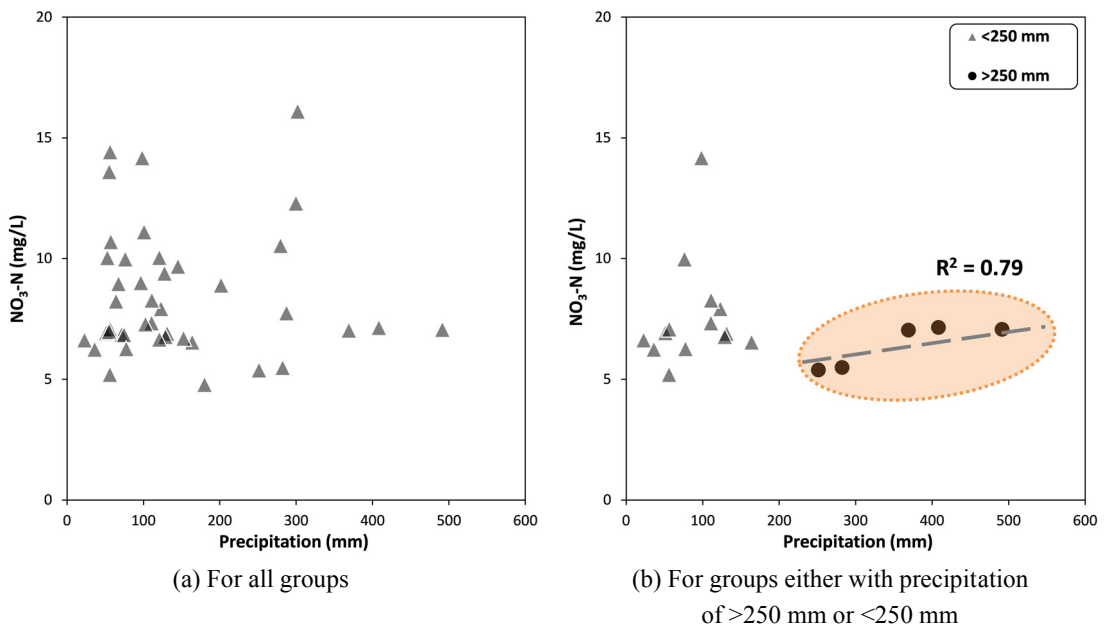


Fig. 8. Relationship between NO₃-N (average concentration) and precipitation in forest area: (a) for all groups and (b) for groups either with precipitation of >250 mm or <250 mm.

이 요구되는 상황이다. 이에 본 연구에서는 2011년부터 2016년까지 수행한 분기 및 반기 조사 결과를 종합하여 조사시기별 수질현황, 수질유형, 토지이용현황 등을 파악하고 강수량과의 상관성을 검토하였다. 또한 관정과 매몰지와의 이격거리별 농도변화를 검토하였다.

지하수 수질현황과 강수량과의 관계를 검토한 결

과, 질산성 질소 항목은 강수량이 250 mm 이상으로 증가하는 시점에 질산성 질소의 농도 증가가 통계적으로 유의미한 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 암모니아성 질소와 염소이온은 강수량이 증가하는 일부 시점에 농도가 감소하는 경향을 일부 보이나, 대체로 강수량의 변화와 상관없이 농도 증가가 불규칙적이었다. 질산성 질소의 경우 주변 토지이용으

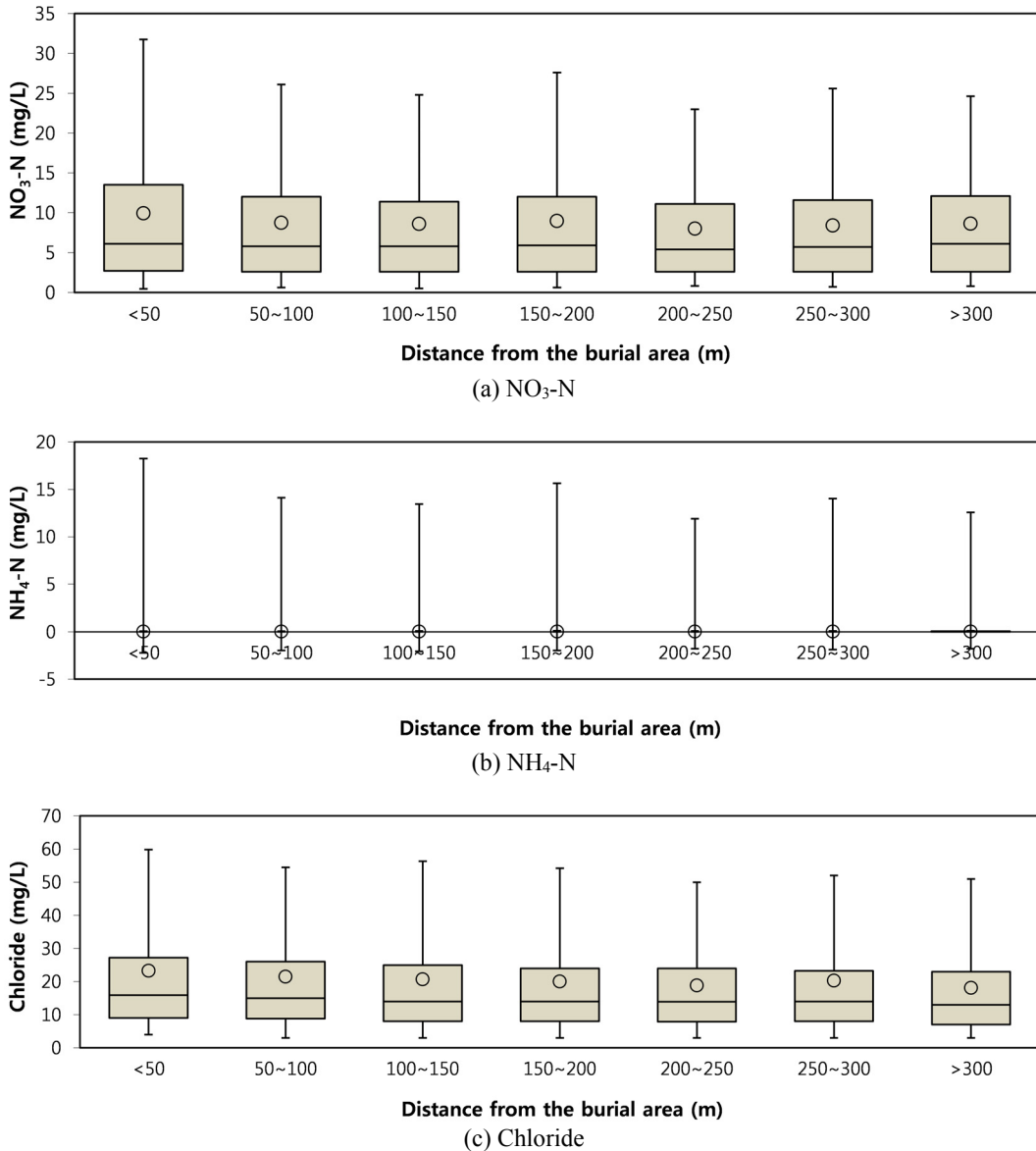


Fig. 9. Concentrations of (a) NO₃-N, (b) NH₄-N, and (c) chloride, classified in terms of distance between burial area and the investigated wells. The values indicated in the box plot represent 5% quantile, 25% quantile, median, 75% quantile, and 95% quantile, respectively, while open circles represent the average values.

로 수반되는 비료 시비 및 퇴비사용 등 다양한 활동으로 발생하는 인위적인 지표 오염물질 등이 강수 등에 의해 지하로 유입되었을 개연성을 보여주나, 관정 주변으로 제한된 국지적인 지역 특성과 재배작물 특성 등에 따른 비료시비 시기 등의 환경 요소들이 복합적으로 작용하여 나타난 결과일 가능성이 있다.

지하수 수질유형을 분류한 결과 Ca-(Cl+NO₃) 유형과 Ca-HCO₃ 유형의 비율이 가장 많이 나타났다. 이를 강수량과 비교하였을 때는 지표 오염의 영향을 지지하는 Ca-(Cl+NO₃) 유형의 비율이 비료시비 시기와 유사한 조사시기에 높은 비율을 보이고, 강수량이 감소하는 기간에 비율이 감소하는 경향을 보였다. Ca-(Cl+NO₃) 유형과 Ca-HCO₃ 유형의 경향을 고려할 경우, 매몰지 주변지역의 지하수 수질은 강우 또는 농경활동, 비료시비 등에 영향을 받은 것으로 판단된다.

주요 토지이용별 지하수 수질현황과 강수량과의 관계를 검토한 결과는 질산성 질소는 주거지역과 농업지역에서 산림지역보다 상대적으로 높은 값을 보였으며, 염소이온도 질산성 질소와 마찬가지로 주거지역과 농업지역에서 높았다. 암모니아성 질소는 토지이용별 중앙값의 차이가 미미하였다. 주거지역과 농업지역에서 질산성 질소와 염소이온이 다른 토지이용 형태보다 높은 농도를 보인 것은 주거지에서 발생하는 생활오염물질, 비료시비 등의 농경활동, 가축 사육 및 분뇨 적치 등의 축산활동 등의 영향을 받은 것으로 판단된다.

질산성 질소가 고농도로 검출된 지역에 대해 매몰지와 이격거리별 농도변화를 검토하였으며, 주변 현황 자료를 검토하여 원인을 분석하였다. 매몰지로부터 지하수 관정까지의 거리가 증가함에 따라 농도가 감소하는 일정한 경향을 보이지 않으므로, 지하수 관정에서의 고농도 검출은 매몰지의 영향 보다는 관정 주변의 토지이용과 같은 환경특성에 의한 영향일 가능성이 크다.

현행 매몰지 주변지역 조사 대상 관정은 매몰지 필지 및 이와 경계한 인접 필지 내에 위치한 관정(최근거리)과 상수원 이용 하천 등에 인접하거나 주민이 집단적으로 거주하는 지역에 위치한 지하수 관정을 우선 고려하여 선정한다. 이들 항목은 가장 중요한 항목이나, 여기에 중요한 매몰지의 조성·관리 현황이나, 침출수 현황, 수질 모니터링 결과 등이 반영

되지 않고, 주변 이용관정의 경우에도 제원이나 관리 현황 등이 고려 대상에서 종종 제외되고 있다. 따라서 지속관리 및 조사 제의 매몰지를 선정하기 위한 점수체계화(scoring system) 등 보다 효율적인 관리방안 검토가 필요하다. 또한 매몰지로부터 이용관정으로의 침출수의 이동과 암모니아성 질소/ 질산성 질소의 변환 과정 및 대수층 물질로의 흡착 등 구체적인 반응기작에 관한 연구도 향후 필요한 과제가 될 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2016년 국립환경과학원의 “가축매몰지 주변 관정수질 조사 및 분석” 사업으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Böhlke, J.K., Smith, R.L. and Miller, D.N., 2006, Ammonium transport and reaction in contaminated groundwater: Application of isotope tracers and isotopic fractionation studies. *Water Resources Research*, 42, W05411, doi:10.1029/2005WR004349.
- Cho, J.-S., 2014, A Strategy of Building an Environment-Friendly Disposal System for Animal Carcass. SunChon Natinal University, 150 p.
- 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 bacteria of leachate from animal carcass disposal on the disposal lapse time. *Economic and Environmental Geology*, 46, 345-350 (in Korean with English abstract).
- Enviros Aspinwall, 2001, Birkshaw Forest Lockerbie - Groundwater Monitoring Briefing 3 (No. SC0690011C).
- Enviros Aspinwall, 2003, Birkshaw Forest, Lockerbie: Quarterly Monitoring Report no. 2.
- Glanville, T.D., 1993, Groundwater impacts of on farm livestock burial. *Iowa Groundwater Quarterly*, 4, 21-22.
- Glanville, T.D., 2000, Impact of livestock burial on shallow groundwater quality. Paper presented at ASAE Mid-Central Meeting, St. Joseph, Missouri (No. MC00-116).
- Hseu, Z.Y. and Chen, Z.S., 2017, Experiences of mass pig carcass disposal related to groundwater quality monitoring in Taiwan. *Sustainability*, 9, 46, doi:10.3390/su9010046.
- Kang, M. and An, Y., 2013, Behavior of refractory organic matter in leachate from landfill contaminated by foot-and-mouth disease. *The Journal of Engineering Geology*,

- 23, 427-434 (in Korean with English abstract).
- Kang, Y.-J., Seo, Y.-J., Lee, D.-H., Choi, C.-L., Park, M. and Choi, J., 2001, The effect of rice farming on the shallow ground water quality. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 20, 262-268 (in Korean with English abstract).
- Ki, M.G., Koh, D.C., Yoon, H. and Kim, H.S., 2015, Temporal variability of nitrate concentration in groundwater affected by intensive agricultural activities in a rural area of Hongseong, South Korea. *Environmental Earth Sciences*, 74, 6147-6161.
- Koh, D.C., Kim, E.Y., Ryu, J.S. and Ko, K.S., 2009, Factors controlling groundwater chemistry in an agricultural area with complex topographic and land-use patterns in mid-western South Korea. *Hydrological Processes*, 23, 2915-2928.
- Lee, E.J., Woo, N.C., Lee, B.-S. and Kim, Y.-B., 2008, Variation in nitrate contamination of shallow groundwater in a farmland in Gyeonggi-do, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 41, 393-403 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-H., Hamm, S.-Y., Kim, K.S., Cheong, J.-Y., Ryu, S.M., Kim, D.-H. and Kim, H.J., 2009, Evaluation of groundwater quality using factor analyses and agrochemicals in an agricultural area. *Economic and Environmental Geology*, 42, 217-234 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment, 2010, Environmental Investigation Guidelines for Carcass Burial Area.
- Ministry of Environment, 2013, Environmental Investigation Guidelines for Carcass Burial Area.
- Ministry of Environment, 2015, Environmental Investigation Guidelines for Carcass Burial Area.
- Nam, K.H., Lee, H.Y., Kim, G.H. and Jeong, G.C., 2015, Estimation of groundwater contamination and pumping capacity for purification in animal carcass disposal site. *The Journal of Engineering Geology*, 25, 45-55 (in Korean with English abstract).
- Park, J.-A., Choi, N.-C. and Kim, S.-B., 2013, Analysis of microbial communities in animal carcass disposal soils. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35, 503-508 (in Korean with English abstract).
- Ritter, W.F. and Chirnside, A.E.M., 1995, Impact of dead bird disposal pits on ground-water quality on the Delmarva Peninsula. *Bioresource Technology*, 53, 105-111.
- UK Environment Agency, 2001, Summary of the Water Quality Monitoring Undertaken at the Epynt Burial and Burn Sites from 1st April to 31st August 2001.
- Yuan, Q., Snow, D.D. and Bartelt-Hunt, S.L., 2013, Potential water quality impacts originating from land burial of cattle carcasses. *Science of the Total Environment*, 456, 246-253.

Received : April 17, 2017
 Revised : May 11, 2017
 Accepted : May 12, 2017