

가축매몰지 오염지하수 정화를 위한 오염범위 및 양수량 평가

남경훈¹ · 이학윤¹ · 김건하² · 정교철^{1*}

¹안동대학교 지구환경과학과, ²한남대학교 건설시스템공학과

Estimation of Groundwater Contamination and Pumping Capacity for Purification in Animal Carcass Deposal Site

Koung-Hoon Nam¹, Hak-Yun Lee¹, Geonha Kim², and Gyo-Cheol Jeong^{1*}

¹Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

²Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

Received 2 February 2015; received in revised form 17 February 2015; accepted 15 March 2015

가축매몰지로부터 확산되는 침출수를 양수하여 정화하기 위해서는 시추공의 적절한 위치 및 개수 선정이 필요하다. 침출수 분포에 대한 간단하고 광역적 조사에 효율적으로 알려진 전기비저항탐사를 활용하여 지하수 오염범위, 유동방향 및 지질구조의 특성을 분석하였다. 경기도 이천시 가축매몰지 4개 Site의 전기비저항탐사 자료 해석결과, GL. - 8 m 이내에서 저비저항 이상대는 20~200 ohm-m로 나타났다. 침출수 정화를 위한 영향반경 및 양수량을 산출한 결과 Site 1부터 4까지 각각 영향반경은 12.9 m, 13.7 m, 10.1 m, 18.0 m로 산출되었으며 양수량은 2,040 m³, 479.8 m³, 1,492.3 m³, 691.9 m³로 추정되었다. Site 1부터 4까지 시추공을 각각 5개, 2개, 4개, 2개를 설치한다면 모든 범위의 오염지하수 양수 및 정화가 가능한 것으로 판단된다.

주요어: 가축매몰지, 침출수, 오염범위, 전기비저항탐사, 양수량

Purifying leachate discharged from animal carcass disposal sites requires decisions regarding the locations and numbers of boreholes. An electrical resistivity survey, known to be effective for investigating leachate distribution, was performed to evaluate the range extent of contamination due to local hydrological properties, such as groundwater flow direction, and geological structure. Results of the survey at four sites at a landfill near Icheon and Anseong, Gyeonggi Province, showed low-resistivity zones (20-200 ohm-m) at a depth of 8 m from the surface. Sites 1-4, which contain 5, 2, 4, and 2 boreholes, respectively, were estimated to have a contaminated groundwater acquisition capability of 12.9 m, 13.7 m, 10.1 m, and 18.0 m, and measured pumping capacity of 2,040 m³, 479.8 m³, 1,492.3 m³, and 691.9 m³, respectively.

Key words: animal carcass deposal site, leachate, range of contamination, electrical resistivity survey, pumping capacity

*Corresponding author: jeong@anu.ac.kr

© 2015, 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

2010년 11월 경상북도에서 발생한 구제역은 전라도와 제주도도 제외된 전국으로 확산되었으며, 확산을 억제하기 위하여 농림수산식품부령의 ‘가축전염병예방법’에 근거 가축 약 980만 마리가 살처분되어 매몰지 4,800 여 개소가 조성되었다(Kim and Jeon, 2014). 많은 개수의 매몰지가 매우 짧은 기간 내에 형성되는 과정에서 부실한 매몰처분 등의 문제점이 노출되었으며, 이에 따라 구제역 매몰지에서 많은 지반환경적인 문제가 발생할 것으로 예상된다. 가장 우려되는 부분은 구제역 매몰지로부터 침출수가 유출되어 주변 지반을 오염시키는 것이다(Park, 2011). 따라서, 긴급조치로 처분한 가축매몰지는 지하수와 토양관련 지반환경이 사전에 충분히 검토된 곳에 조성된 것이 아닌 경우가 많다. 이는 부패과정에서 발생하는 침출수와 오염물질의 영향으로 가축매몰지 주변의 토양 및 지하수 오염을 발생시키고 있으며 환경과 생태계에 심각한 영향을 미친다. 그러므로 매몰지에서 침출수가 지하수계로 유입되기 이전에 되도록 많은 양의 침출수를 뽑아내 처리하여 오염의 원인을 대부분 제거해야 한다. 침출수가 매몰지 하부로 유출된다고 하더라도 매몰지 인근에 지하수 관측시설을 설치해서 침출수 유출이 확인되는 대로 매몰지 인근에서 침출수로 오염된 지하수를 양수 처리하는 과정이 필요하다(Lee, 2011). 가축매몰지 관측정 설치에 관해서는 지하수유동 방향을 고려하여 5 m 이격 거리 내에 설치하도록 되어 있으나 이는 매몰지의 위치가 지형의 구배를 확인할 수 없는 경우 지하수유동방향을 판단하기 어렵다. 매몰지와 5 m 이격하도록 되어 있는 관측정의 위치는 적절하다고 판단되나 관측정 1개소만을 설치할 경우 하도(channel) 형태로 유출되는 침출수를 효과적으로 관측할 수 없다(Jun et al., 2013).

매몰지 정화 및 침출수에 의해 오염된 부지의 복원을 위해서는 대상 부지의 지질학적 특성, 침출수 오염정도, 주변 지하수 현황 등의 수리환경학적 특성, 그리고 매몰지의 규모에 대한 정밀조사가 선행되어야 한다(Ko et al., 2012). 하지만, 일반적인 지질조사 중 하나인 시추조사(drilling investigation)는 그 자체가 가지는 한계로 인하여 매몰지에 대한 전반적인 특성 파악이 힘들다. 전기비저항탐사(electrical resistivity survey)를 포함한 물리탐사법은 주변 환경에 변화를 주지 않기 때문에, 비파괴적이고 환경 친화적인 장점이 있다. 최근 들어 부각되고 있는 환경공학적인 문제의 해결이나 지하공간 활용을 위

한 기초 물리탐사를 위하여 그 응용성이 크게 증대되고 있다(Lowry and Shive, 1990). 전기비저항탐사는 한 쌍의 전류전극을 통하여 직류 전류 또는 저주파수 교류전류를 흘려보내어 다른 한 쌍의 전위전극에서 전위차를 측정함으로써 지하의 전기 비저항 분포를 파악하는 탐사법이다. 전기비저항탐사법은 지하수의 오염범위, 유동방향, 수리지질구조 및 지하공동을 분석하기 위해 적용된다. 국내에서 전기비저항탐사를 이용한 매립지내 침출수에 의한 주변 오염현황에 관한 연구는 GPR 탐사 및 시추조사를 통해 여러 연구자들에 의해 비교 연구된 바 있다(Kim and Shown, 1995; Kim et al., 1995; Lee and Kim, 1996; Song et al., 2003). 또한, Park and Ko (2011)와 Ko et al. (2012)은 가축매몰지에 대한 침출수 누출 탐지 및 매몰지 규모 등의 특성을 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 비교적 빠른 시간에 넓은 범위의 지하매질을 파악할 수 있는 전기비저항탐사를 사용하여 가축매몰지의 특성(침출수 오염범위, 유동방향)을 분석하였다. 또한 침출수 양수를 위한 양수량, 시추공 위치선별 및 개소수를 선정하였다.

연구방법

가축매몰지 연구지역의 특성

가축매몰지의 기본 현황으로 주소, 조성시기, 축종, 매몰두수 등을 조사하였고, 현장답사를 통해 지형과 지하수유동방향을 조사하였다. 지형은 3가지로 분류하였으며 지하수 유동방향을 예측하기 힘든 평지형, 경사도가 있는 산지형, 하천과 인접하여 침출수 발생 시 직접적인 하천 유입이 가능하다고 판단되는 하천형으로 구분하였다(Jun et al., 2013). 대상 가축매몰지 중 Site 1은 2010년 11월 발병한 구제역으로 인하여 폐사된 가축을 대상으로 2011년 01월 19일 조성되었다. 가축매몰지에 매몰된 두수와 축종은 돼지 3,989두 이다. 평탄한 지역에 가축매몰지가 조성되어 있지만 인근 하천과 약 40 m 이격되어 있어 하천에 영향을 미칠 것으로 판단된다. Site 2는 2011년 01월 10일 조성되었으며, 가축매몰지에 매몰된 가축의 총 두수는 226두, 축종은 한우, 젓소이며, 경사가 완만한 구릉지에 있는 산지형 가축매몰지이다. Site 3은 2011년 02월 10일 조성된 가축매몰지다. 축종은 돼지이며, 매몰된 가축 두수는 488두로, 비교적 가파른 경사지의 산지형 가축매몰지이다. Site 4는 2011년 1월 20일에 조성되었고, 매립된 축종은 돼지이며, 매



Fig. 1. Geological map of site 1 (KIGAM, 1974).

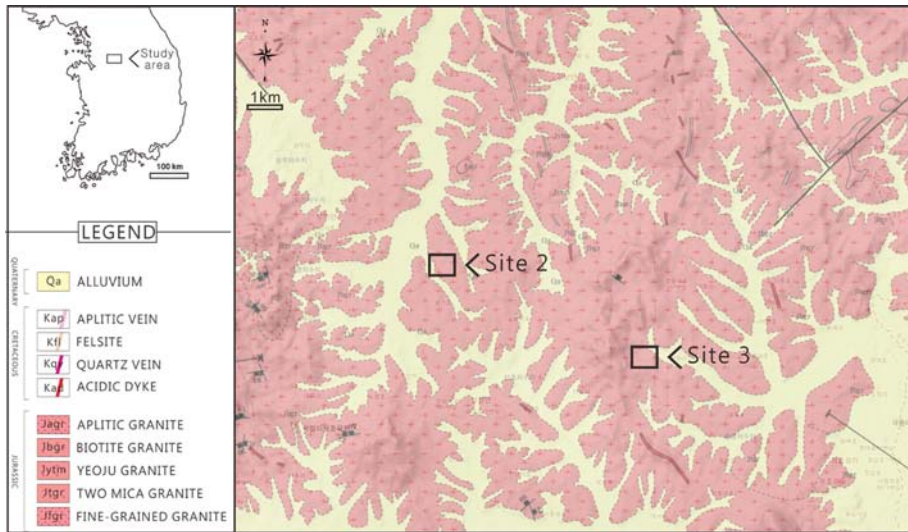


Fig. 2. Geological map of site 2 and 3 (KIGAM, 1974).

몰된 가축 두수는 4,203두, 지하수 유동방향을 예측하기 힘든 평지형 가축매몰지이다.

각 연구지역의 지질로써 Site 1, 2, 3은 흑운모화강암과 층적층이 발달해 있다. 흑운모화강암은 대체적으로 심한 풍화를 받아 신선한 노두를 발견하기 어려우며 낮은 지형을 이루고 있다(Fig. 1~2). 주로 담록색이나 유백색 암회색, 회록색, 회갈색을 띠며 주 구성광물은 석영, 장석, 흑운모 등이다. 간혹 녹니석이 소량 함유되고 이들은 중립질로서 입상 또는 등립상 조직을 나타낸다. 장석과 석영의 입자들이 함유될 경우 풍화가 잘되어 저구릉을 형성하며, 풍화잔류물은 우수에 의해 운반 퇴적

되어 주위에 넓은 층적층을 형성하기도 한다. 흑운모화강암은 절리의 발달이 매우 불량한 편이며 미약하게 불규칙적으로 나타난다(KIGAM, 1974). Site 4는 편마암상 각섬석 흑운모화강암이 발달되어 있다. 암상은 중-조립질이고 가리장석의 반정이 발달하여 반상 조직을 나타내며, 흑운모, 각섬석 등 유색광물의 평행배열로 현저한 엽리구조를 보인다(Fig. 3). 흔히 렌즈상의 엽기성 포획물을 함유하는데 대부분의 엽기성 포획물들은 수 cm에서 10 cm 내외이고 평행 배열되어 산점상으로 발달하고 있다. 편마암류와는 뚜렷한 접촉관계를 보이지만 접촉부 부근에서 유색광물의 함량이 증가하고 편마구조가

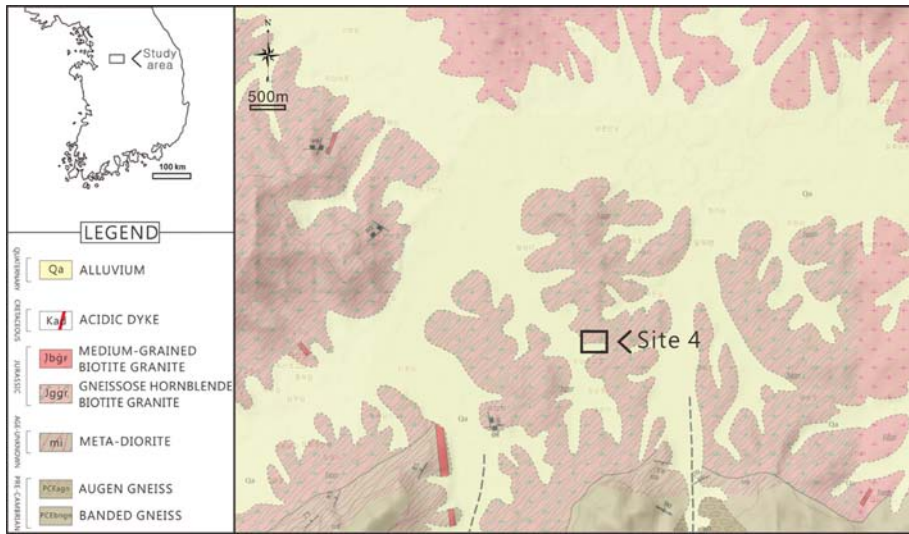


Fig. 3. Geological map of site 4 (KIGAM, 1989).

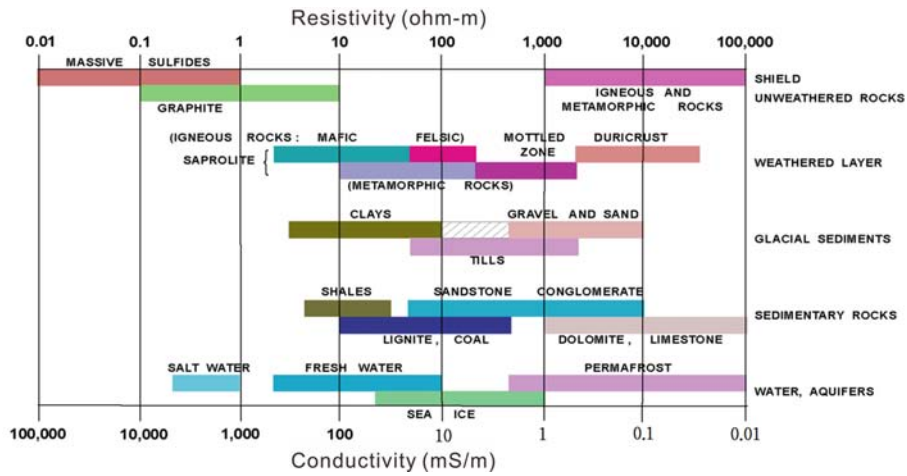


Fig. 4. Typical ranges of resistivity of earth materials (modified from Society of Exploration Geophysicists, 1987).

보다 현저해지는 경향을 보이기도 한다. 흑운모화강암과 접촉부에서는 편마구조가 미약하고 유색광물의 함량도 감소하여 흑운모화강암으로 이화되는 경향을 나타낸다 (KIGAM, 1989). 지반특성으로는 4개 Site 모두 실트질 모래와 입도분포가 양호한 모래가 혼재된 조립토를 나타내었다.

가축매몰지의 전기비저항탐사 방법

전기비저항탐사에서 주로 사용되는 전극배열은 쌍극자배열법, 단극(2점)배열법, 단극-쌍극자(3점)배열법, 웨너배열법 및 슬러퍼저배열법 등이 있다. 이는 지하 매질

에 존재하는 전기비저항 이상대(Fig. 4)에 의한 전위차를 측정하는 방법이다. 본 연구에서는 분해능이 가장 뛰어나고, 지질 및 지형학적 조건에 따라 기탐심도를 조절할 수 있는 쌍극자배열법을 사용하였다. 본 탐사에 사용된 장비는 ABEM사의 Terrameter SAS 4000을, 분석 소프트웨어는 DIPROWIN을 사용했다. 연구지역 가축매몰지의 오염지하수 범위를 파악하기 위해 지하수 유동 방향을 예상하여 매몰지에 격자형으로 측선을 설정하고 탐사를 실시하였다. 측선별로 역산하여 참 비저항 단면도를 구하고 울타리 도표로 표시하였다. 쌍극자배열법 측선은 연구지역 모두 가축 매립 위치를 중심으로 격자

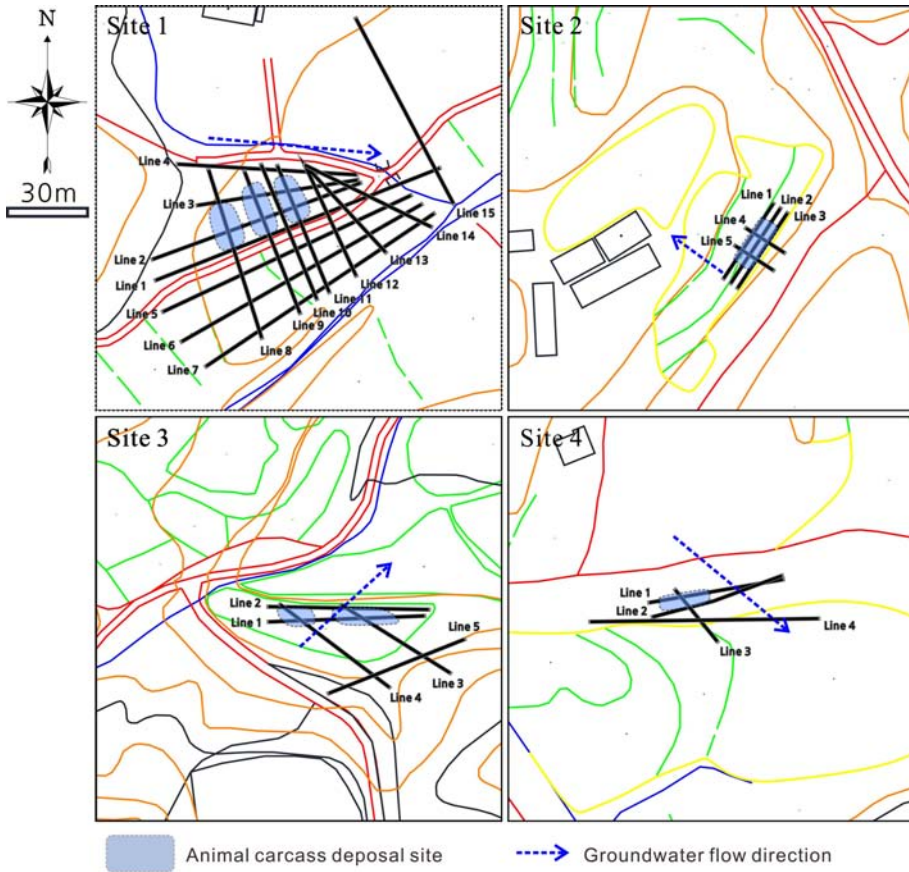


Fig. 5. Geophysical survey lines of topography in Icheon (site 1-3) and Anseong (site 4).

형으로 설정하였다. Site 1의 가축매몰지의 경우 15개의 측선을 실시하였다. Site 2, Site 3 가축매몰지의 경우 5개의 측선을 조사하였으며, Site 4 가축매몰지의 경우 4개의 측선을 실시하였다(Fig. 5). 전기비저항탐사 쌍극자배열법 조사 및 분석수량은 Table 1과 같다.

결과 및 토의

전기비저항탐사 결과

평탄한 지역인 Site 1 가축매몰지에서 쌍극자배열법 전기비저항탐사 시 15개 측선을 측정하였고 상대적인 전기비저항값을 분석한 결과 지하수 함양이 많거나 가축매몰지의 침출수 영향에 의한 것으로 추정되는 비저항 이상대는 200 ohm-m 이하, 일반적인 토사 및 풍화대로 추정되는 중비저항대는 약 200~1,000 ohm-m, 풍화대 또는 암반으로 추정되는 고비저항대는 약 1,000

ohm-m 이상으로 예측되었다. Line 1~Line 15 Fence (Fig. 6)에서 3개 매몰지를 직접 지나가는 측선은 Line 2, Line 3, Line 8~11이며, 이들 측선에서 매몰지가 위치하고 있는 구간은 200 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 분포하고 있는 것으로 분석되었으며, Line 12~Line 14에 위치하고 있는 매몰지 하류구간에도 저비저항 이상대가 넓게 분포하고 있는 것으로 나타났다. 매몰지 침출수에 의한 저비저항대로 판단한 200 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 조사지역 남측의 Line 5~6에서는 분포하지 않는 것으로 분석되어 인근 하천에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 하지만, Line 8~12의 분석자료에 의하면 매몰지 남측의 도로와 논 경계지역에 200 ohm-m 이하의 저비저항대가 일부 분포하고 있는 것으로 분석되었다. Line 15는 매몰지에서 동측으로 약 40 m 이격된 곳의 측선으로, 심도 약 5 m 이상에서는 200 ohm-m 이하의 저비저항대가 분포하지 않으나 전체

Table 1. Methods employed for the electrical resistivity survey of the study area.

Site 1					
Line No.	Survey line	Station space	Analysis line	Analysis extension	Analysis depth
Line 1	0~120 m	3 m	6~114 m	108 m	GL -15 m
Line 2	0~96 m	3 m	6~90 m	84 m	GL -15 m
Line 3	0~72 m	3 m	6~66 m	60 m	GL -15 m
Line 4	0~75 m	3 m	6~69 m	63 m	GL -15 m
Line 5	0~117 m	3 m	6~111 m	105 m	GL -15 m
Line 6	0~117 m	3 m	6~111 m	105 m	GL -15 m
Line 7	0~120 m	3 m	6~114 m	108 m	GL -15 m
Line 8	0~75 m	3 m	6~69 m	63 m	GL -15 m
Line 9	0~72 m	3 m	6~66 m	60 m	GL -15 m
Line 10	0~66 m	3 m	6~60 m	54 m	GL -15 m
Line 11	0~60 m	3 m	6~54 m	48 m	GL -15 m
Line 12	0~51 m	3 m	6~45 m	39 m	GL -15 m
Line 13	0~51 m	3 m	6~45 m	39 m	GL -15 m
Line 14	0~60 m	3 m	6~54 m	48 m	GL -15 m
Line 15	0~84 m	3 m	6~78 m	72 m	GL -15 m
Site 2					
Line No.	Survey line	Station space	Analysis line	Analysis extension	Analysis depth
Line 1	0~36 m	2 m	4~32 m	28 m	GL -10 m
Line 2	0~36 m	2 m	4~32 m	28 m	GL -10 m
Line 3	0~36 m	2 m	4~32 m	28 m	GL -10 m
Line 4	0~28 m	2 m	4~24 m	20 m	GL -10 m
Line 5	0~28 m	2 m	4~24 m	20 m	GL -10 m
Site 3					
Line No.	Survey line	Station space	Analysis line	Analysis extension	Analysis depth
Line 1	0~66 m	2 m	4~62 m	58 m	GL -10 m
Line 2	0~78 m	2 m	4~74 m	70 m	GL -10 m
Line 3	0~38 m	2 m	4~34 m	30 m	GL -10 m
Line 4	0~57 m	3 m	6~51 m	45 m	GL -15 m
Line 5	0~57 m	3 m	6~51 m	45 m	GL -15 m
Site 4					
Line No.	Survey line	Station space	Analysis line	Analysis extension	Analysis depth
Line 1	0~57 m	3 m	6~51 m	45 m	GL -15 m
Line 2	0~57 m	3 m	6~51 m	45 m	GL -15 m
Line 3	0~38 m	2 m	4~34 m	30 m	GL -10 m
Line 4	0~102 m	3 m	6~96 m	90 m	GL -15 m

적으로 약 200~600 ohm-m의 상대적으로 낮은 비저항이 분포하는 것으로 분석되었다. 이는 Line 14와 15 사이에 폭 30 cm, 깊이 20 cm의 소규모의 관개 배수로가 있지만 매몰지의 침출수 영향에 의한 지하수 유동에는 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 저비저항 이상대

를 분석한 결과 지하수의 유동방향은 남동동 방향으로 추정되었으며, 전체적으로 낮은 약 200~600 ohm-m 비저항대가 매몰지 침출수 영향에 의한 것으로 추정한다면 오염범위의 길이(length)는 약 120 m, 폭(width)은 약 25 m, 깊이(depth)는 약 4 m로 판단된다.

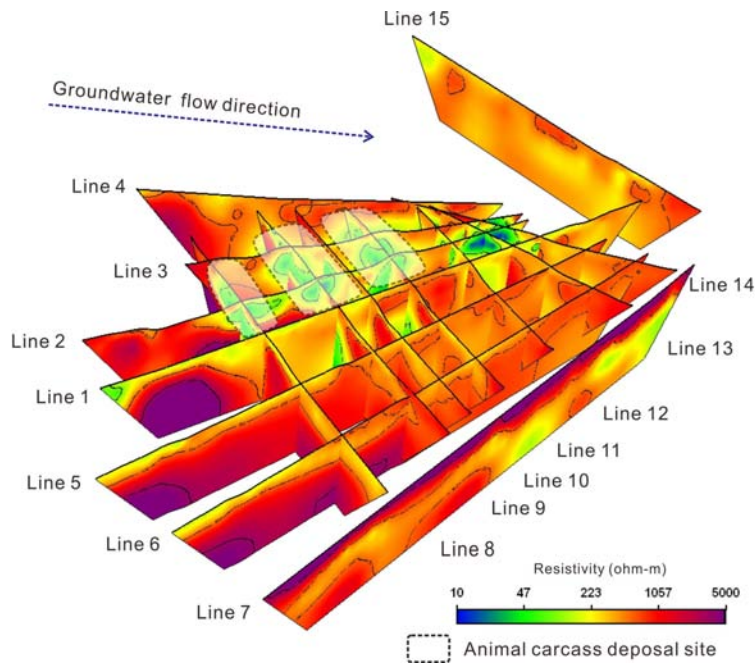


Fig. 6. Distribution of electrical resistivity along the line 1-15 at site 1.

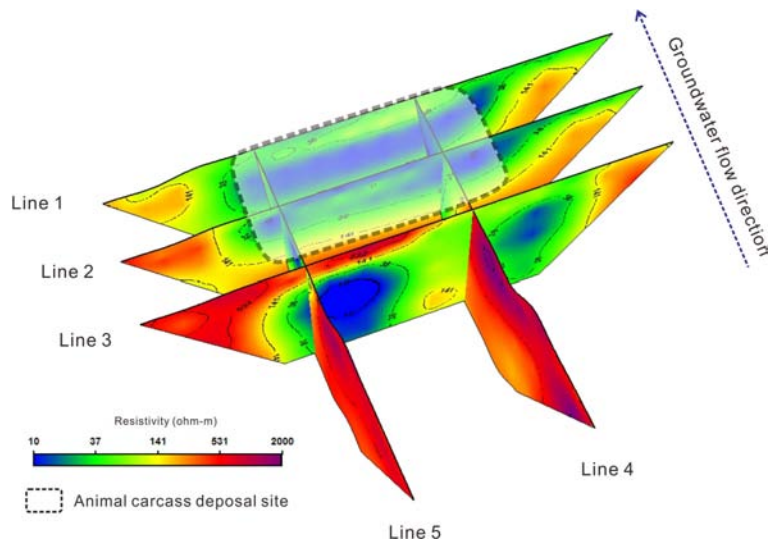


Fig. 7. Distribution of electrical resistivity along the line 1-5 at site 2.

경사 지역인 Site 2 가축매몰지에서 쌍극자배열법 전 기비저항탐사 결과 지하수 함양이 많거나 가축매몰지의 침출수 영향에 의한 것으로 추정되는 비저항 이상대는 40 ohm-m 이하, 일부 침출수 영향을 받은 토사 및 풍화대로 추정되는 중비저항대는 약 40~140 ohm-m, 일반

토사 및 풍화대로 추정되는 고비저항대는 약 140~550 ohm-m, 그리고 암반으로 추정되는 고비저항대는 약 550 ohm-m 이상으로 예측되었다. Line 1~Line 5 Fence (Fig. 7)에서 매몰지를 종방향으로 지나가는 축선은 Line 1, Line 2, Line 3이며, 횡방향으로 지나가는 축선은

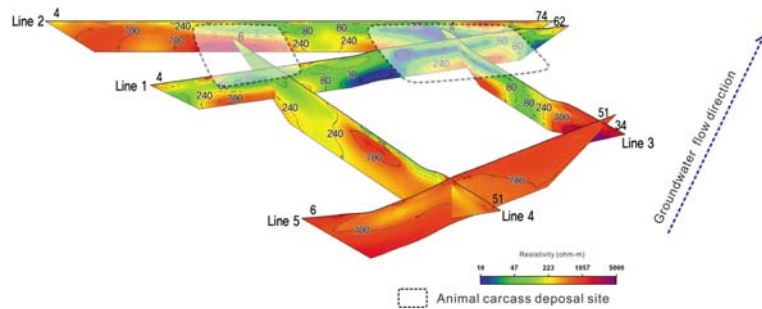


Fig. 8. Distribution of electrical resistivity along the line 1-5 at site 3.

Line 4, Line 5이다. 이들 축선에서 매몰지가 위치하고 있는 구간은 40 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 분포하고 있는 것으로 분석되었으며, Line 1이 위치하고 있는 매몰지 하부구간에 저비저항 이상대가 가장 넓고 깊게 분포하고 있는 것으로 나타났다. Line 1과 Line 2는 40 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 대체로 유사한 형태의 분포를 보이며 하류구간인 Line 1의 저비저항대가 더 깊게(GL. -7m) 나타나고 있다. Line 3의 저비저항대는 일부 구간에서 깊게(GL. -10m) 나타나고 있어 침출수의 영향이 풍화대 또는 암반의 절리를 따라 매몰지 하부까지 연장될 수도 있음을 보여주고 있다. 저비저항 이상대를 분석한 결과 지하수의 유동방향은 북서 방향으로 추정되었으며, 침출수 영향으로 오염된 범위는 길이는 약 28 m, 폭은 약 28 m, 깊이는 약 3.6 m로 나타났다.

경사 지역인 Site 3 가축매몰지에서 쌍극자배열법 전기비저항탐사 결과, 지하수 함양이 많거나 가축매몰지의 침출수 영향에 의한 것으로 추정되는 비저항 이상대는 80 ohm-m 이하, 일부 침출수 영향을 받은 토사 및 풍화대로 추정되는 중비저항대는 약 80~240 ohm-m, 일반 토사 및 풍화대로 추정되는 고비저항대는 약 240~700 ohm-m, 그리고 암반으로 추정되는 고비저항대는 약 700 ohm-m 이상으로 예측되었다. Line 1~Line 5 Fence (Fig. 8)에서 매몰지를 종방향으로 지나가는 축선은 Line 1, Line 2이며, 횡방향으로 지나가는 축선은 Line 3, Line 4, 매몰지 외곽축선은 Line 5이다. 이들 축선에서 매몰지가 위치하고 있는 구간은 80 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 분포하고 있는 것으로 분석되었으며, Line 1이 위치하고 있는 매몰지 하부구간에 저비저항 이상대가 가장 넓고 깊게 분포하고 있는 것으로 나타났다. Line 1과 Line 2는 80 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 대체로 유사한 형태의 분포를 보이나 Line 1과 Line

2의 깊은 심도에서의 저비저항대 분포는 서로 상이하게 나타나고 있다. Line 3과 Line 4는 240 ohm-m 이하의 저~중비저항대의 분포 양상이 유사하게 나타나고 있으며, Line 3는 80 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 매몰지 외부까지 연장되어 나타나고 있다. Line 5는 탐사 심도인 GL. -15 m까지 저~중비저항대가 분포하지 않아 매몰지의 영향을 받고 있지는 않은 것으로 판단되나, Line 3의 80 ohm-m 이하 저비저항대 분포구간이 매몰지 침출수의 영향이라고 가정한다면 그 연장선이 Line 5의 하부로 지나 갈 것으로 예측되므로, 추가적인 축선을 설치하여 비저항 이상대 분포를 확인해야 할 것으로 판단된다. 저비저항 이상대를 분석한 결과 지하수의 유동방향은 북북동 방향으로 추정되며, 침출수 영향으로 오염된 범위는 길이는 약 66 m, 폭은 약 35 m, 깊이는 3.9 m로 나타났다.

평탄한 지역인 Site 4 가축매몰지에서 쌍극자배열법 전기비저항탐사 결과, 지하수 함양이 많거나 가축매몰지의 침출수 영향에 의한 것으로 추정되는 비저항 이상대는 20 ohm-m 이하, 일부 침출수 영향을 받은 토사 및 풍화대로 추정되는 중비저항대는 약 20~90 ohm-m, 일반 토사 및 풍화대로 추정되는 고비저항대는 약 90~360 ohm-m, 그리고 암반으로 추정되는 고비저항대는 약 360 ohm-m 이상으로 예측되었다. Line 1 Line 4 Fence (Fig. 9)에서 매몰지를 종방향으로 지나가는 축선은 Line 1, Line 2이며, 횡방향으로 지나가는 축선은 Line 3, 매몰지 외곽축선은 Line 4이다. 이들 축선에서 매몰지가 위치하고 있는 구간은 20 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 분포하고 있는 것으로 분석되었으며, Line 1은 Line 2에 비해 약 5 ohm-m 이하의 매우 낮은 저비저항 분포 구간이 나타나고 있으며, Line 2는 Line 1에 비해 20 ohm-m 이하의 저비저항 이상대가 매몰지 외부까지 더 넓게 나타나고 있다. Line 3과 Line 4에서 20~90

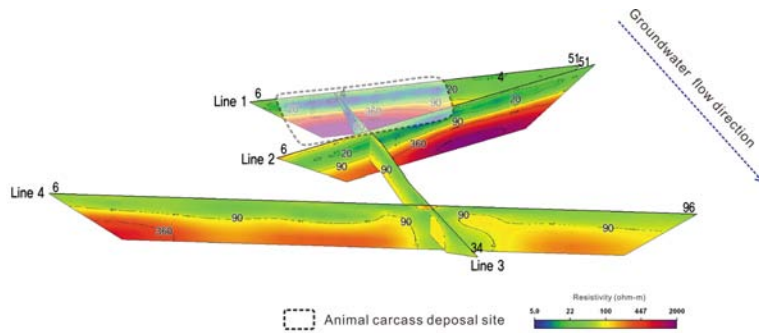


Fig. 9. Distribution of electrical resistivity along the line 1-5 at site 4.

ohm-m의 증비저항대 분포구간은 심도가 약 GL. -5~8 m 내외로 분포 양상이 유사하게 나타나고 있으며, Line 4에서 측선 위치 57~66 m 구간은 탐사심도 하부까지 증비저항대가 연장되어 나타나고 있다. Line 3과 Line 4의 증비저항대 분포구간은 매몰지 구간에 비해 상대적으로 높은 전기비저항 분포를 보이고 있으며 분포심도가 깊지 않으므로 매몰지 침출수 영향은 아닐 것으로 예측되나, 매몰지 하부에 분포하는 고비저항대는 암반구간으로 추정되므로 매몰지 침출수가 수직이동이 불가능할 경우 수평이동이 발생할 수 있고 이로 인해 Line 3과 Line 4 측선구간에서 증비저항대 분포구간이 나타날 수 있으므로 좀 더 정밀한 해석을 위해서는, 추가적인 측선을 설치하여 비저항 이상대 분포를 확인해야 할 것으로 판단된다. 저비저항 이상대를 분석한 결과 지하수의 유동방향은 남동 방향으로 추정되며, 침출수 영향으로 오염된 범위는 길이는 약 20 m, 폭은 약 55 m, 깊이는 3.7m로 나타났다.

연구지역 오염지하수 영향범위 추정 및 오염지하수 양수량

지하수위는 수위가 높은 곳으로부터 낮은 곳으로 이동하므로 양수에 의해 수위가 내려가면 주위로부터 우물을 향하는 동수경사가 발생하여 지하수는 우물 쪽으로 유입하게 된다(Fig. 10). 자유면 대수층에 대한 Thiem 식에서 유도하여 다음과 같이 r_0 (영향반경을 구할 수 있다(Fetter, 2001)). 전기비저항탐사 결과 값을 바탕으로 영향반경을 적용하여 오염지하수 양수를 위한 적절한 시추공 위치 및 개수, 지하수 양수량을 결정하였다.

식 (1)에서 Q , K , h_0 , h_w 는 각각 양수량, 수리전도도, 양수정으로부터 거리 r_0 에서의 포화두께, 양수정으로부터 거리 r_w 에서의 포화두께이다(Fetter, 2001).

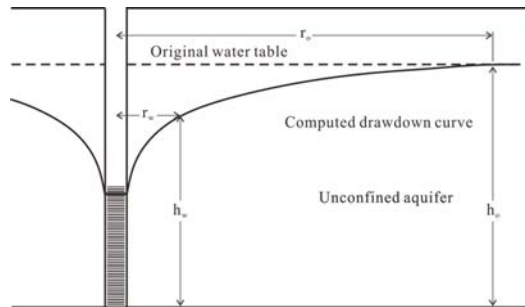


Fig. 10. Equilibrium drawdown in an unconfined aquifer.

$$Q = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{\ln(r_0/r_w)}$$

$$\ln(r_0/r_w) = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{Q}$$

$$\ln r_0 - \ln r_w = \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{Q}$$

$$\ln r_0 = \ln r_w + \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{Q}$$

$$\therefore r_0 = e^{\left\{ \ln r_w + \pi K \frac{h_0^2 - h_w^2}{Q} \right\}} \quad (1)$$

일반적으로 층적대수층에서는 시추공 깊이에 따라 영향반경이 시추공 깊이 보다 약간 넓게 산정된다. 연구 4개 지역 모두 전기비저항탐사 결과, 기반암과 지표까지의 심도가 깊지 않게 나타났으며, 지하수 영향반경을 넓게 산정할 수 없으므로, 범위에 따라 시추공 설치 개수가 다르게 계산되었다. 영향반경에 사용된 인자값은 Table 2와 같다.

전기비저항탐사 비저항 이상대의 값으로 오염범위를 산정하였다. 비저항 이상대의 수직단면으로 지하수위에 서 기반암까지의 깊이인 h_0 , 수위저하 된 깊이에서의 기

Table 2. Parameter values used in the Influence radius of the study area.

Site	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Effective porosity	Amount of contaminated ground water (m ³)	h_o (m)	h_w (m)	r_w (m)	Hydraulic conductivity (cm/sec)	Influence radius (m)
1	120	25	4	0.17	2,040	4	0.1	0.1	2.88E-03	12.9
2	28	28	3.6	0.17	479.8	3.6	0.1	0.1	2.88E-03	13.7
3	66	35	3.9	0.17	1,531.5	3.9	0.1	0.1	2.88E-03	10.1
4	55	20	3.7	0.17	691.9	3.7	0.1	0.1	2.88E-03	18.0

탄암까지 깊이인 h_w 를 산정하였다. r_w 는 관정 반경으로 0.1 m로 설정했으며, k_s 는 수리전도도로 연구지역에서 토양시료를 채취하여 입도분석한결과 2.88×10^{-3} cm/sec로 산출되었다.

Site 1에서 침출수로 오염된 것으로 판단된 면적은 약 3,000 m²로 나타났으며, 오염지하수량은 2,040 m³, 영향반경은 약 12.9m로 산출되었다. 따라서 5개의 시추공을 설치한다면 총 약 129 m 범위의 오염지하수를 포획 가능할 것으로 판단되며, 5개의 시추공으로 17일 동안 25 ton/day를 양수한다면 오염지하수 전체를 양수 할 수 있을 것으로 사료된다. Site 2에서 침출수로 오염된 것으로 판단된 면적은 약 784 m²로 나타났으며, 오염지하수량은 479.8 m³, 영향반경은 한 공당 약 13.7m로 산출되었다. 따라서 2개의 시추공을 설치한다면 총 약 54.8 m 범위의 오염지하수를 포획 가능할 것으로 판단되며, 2개의 시추공으로 12일 동안 20 ton/day를 양수한다면 오염지하수 전체를 양수 할 수 있을 것으로 사료된다. Site 3에서 침출수로 오염된 것으로 판단된 면적은 약 2,310 m²로 나타났으며, 오염지하수량은 1,531.5 m³, 영향반경은 한 공당 약 10.1m로 산출되었다. 따라서 4개의 시추공을 설치한다면 총 약 96 m 범위의 오염지하수를 포획 가능할 것으로 판단되며, 4개의 시추공으로 16일 동안 25 ton/day를 양수한다면 오염지하수 전체를 양수 할 수 있을 것으로 사료된다. Site 4에서 침출수로 오염된 것으로 판단된 면적은 약 1,100 m²로 나타났으며, 오염지하수량은 691.9 m³, 영향반경은 한 공당 약 18.0m로 산출되었다. 따라서 2개의 시추공을 설치한다면 총 약 72 m 범위의 오염지하수를 포획 가능할 것으로 판단되며, 2개의 시추공으로 18일 동안 20 ton/day를 양수한다면 오염지하수 전체를 양수 할 수 있을 것으로 사료된다.

결 론

가축매몰지에서의 지하수 오염범위, 유동 및 지반구

조의 특성을 파악하기 위해 전기비저항탐사를 활용하였다. 전기비저항탐사 결과 저비저항 이상대 값은 매몰지 위치와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 침출수 영향에 의한 것으로 판단되는 저비저항 이상대 값의 범위를 바탕으로 침출수 오염범위를 평가 하였으며, 양수를 위한 적절한 시추공 위치 및 개수, 지하수 양수량을 산출하였다. 연구결과 Site 1~Site 4 순으로 가축매몰지의 침출수 영향에 의한 것으로 추정되는 비저항 이상대는 각각 200 ohm-m 이하, 40 ohm-m 이하, 80 ohm-m 이하, 20 ohm-m 이하로 나타났다. 비저항 이상대의 값은 상대적인 것으로 갈수기 및 우기에 따른 수분함량의 변화와 지하 매질인 지질에 따라 비저항 이상대의 값은 다르게 산출된다. 이 비저항 이상대는 가축매몰지 위치와 일치하였으며, 비저항 이상대의 범위를 바탕으로 침출수 정화를 위한 영향반경 및 양수량을 산정하였다. Site 1 4 순으로 영향반경은 각 12.9 m, 13.7 m, 10.1 m, 18.0 m로 산출되었으며, 오염지하수량은 각 2,040 m³, 479.8 m³, 1,531.5 m³, 691.9 m³로 나타났다. 따라서 오염지하수 정화를 위한 시추공 개수는 5개, 2개, 4개, 2개를 설치한다면 오염범위의 지하수를 포획 가능할 것으로 판단된다. 따라서 Site 1에서 5개의 시추공으로 17일 동안 25 ton/day, Site 2에서 2개의 시추공으로 12일 동안 20 ton/day, Site 3에서 4개의 시추공으로 16일 동안 25 ton/day, Site 4에서 2개의 시추공으로 18일 동안 20 ton/day를 양수한다면 모든 범위의 오염지하수를 양수 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 전국적인 가축매몰지의 구체적인 지형지질지만 특성, 지하수 및 하천 특성을 조사하여 해당 지역의 토질의 종류, 수리전도도, 유효공극률, 단층 등의 데이터베이스를 구축한다면 보다 정확한 영향반경과 지하수 정화를 위한 시추공 개수를 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 현행법상 가축 매몰 후 3년 경과시간이 지나면 국가에서 지정·보호 할 수 있는 법적 효력을 상실해 가축매몰지에서 농작물을 재배하고 있는 실정이다. 사체가 완전히 썩지 않은 현 시점에서 긴급매몰지 및 부실 시공지의 경우 침출수가 더 확산

될 가능성이 높아 대책마련이 시급한 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 환경부 토양·지하수 오염방지 개발사업(과제번호, 2012000550005)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Fetter, C. W., 2001, Applied hydrogeology, Prentice-Hall Inc., 598p.
- Jun, S. M., Park, J. H., and Park, C. K., 2013, A study for the foot-and-mouth disease burial site monitoring well installation guideline, Korean Review of Crisis & Emergency Management, 9(11), 221-238 (in Korean).
- Kim, G. H. and Jeon, H. S., 2014, Enhanced stabilization of carcasses by retrofitting burial sites to bioreactor, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 36(10), 679-684 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. S., Lee, K. H., and Han, J. S., 1995, Electrical surveys for mapping leachate in Nanji-Do landfill site, The Journal of Engineering Geology, 5(3), 259-276 (in Korean with English abstract).
- Kim, K. W. and Shown, H. W., 1995, A geochemical and geophysical study on the environmental contamination in the vicinity of waste disposal site, The Journal of Nature Science, Paichai University, Korea, 8, 87-92 (in Korean with English abstract).
- 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, The Journal of Engineering Geology, 22(4), 409-416 (in Korean with English abstract).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 1974, 1:50,000 Geological map of the Icheon sheet, 10-11 (in Korean).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 1989, 1:50,000 Geological map of the Anseong sheet, 7-8 (in Korean).
- Lee, J. Y. and Kim, H. S., 1996, A study of geophysical surveys for the open waste dumping landfill (I), Journal of Korea Soil Environment Society, 1(1), 29-38 (in Korean).
- Lee, K. K., 2011, Foot and mouth disease, landfill leachate, and groundwater contamination, Geoenvironmental Engineering, 12(2), 6-17 (in Korean).
- Lowry, T. and Shive, P. N., 1990, An evaluation of Britton's method for the detection of subsurface cavities,

Geophysics, 55(5), 514-520.

- Park, J. B., 2011, Geoenvironmental approach for landfill of foot and mouth disease, Geoenvironmental Engineering, 12(2), 18-25 (in Korean).
- Park, S. G. and Ko, K. S., 2011, Application of resistivity survey to detect leachate of livestock burial site, 2011 Annual Meeting of the Korean Society of Earth and Exploration Geophysics (Expanded abstract), Daejeon, Oct. 6-7, 15-16 (in Korean).
- Song, S. H., Young, H. H., An, J. G., and Kim, K. P., 2003, Application of electrical and small-loop EM survey to the identification of the leachate at a waste landfill in Jeju Island, Geophysical Exploration, 6(3), 143-152 (in Korean with English abstract).

남경훈

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-7735
Fax: 054-822-5467
E-mail: namsoil@naver.com

이학윤

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-7735
Fax: 054-822-5467
E-mail: erebus90@naver.com

김건하

한남대학교 건설시스템공학과
309-791 대전광역시 대덕구 한남로 70
Tel: 042-629-7534
E-mail: kimgh@mail.hannam.ac.kr

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 경동로 1375(송천동)
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-822-5467
E-mail: jeong@anu.ac.kr