

매립지 침출수 유출 현장조사와 지하수 오염 확산방지 방안에 관한 연구

권형표¹ · 김동진² · 이명재¹ · 천정용¹ · 신선호¹ · 차용훈¹ · 김정우^{1,‡}

¹(주)지오그린21

²강원대학교 환경연구소

Field investigation to conceptualize landfill leachate outflow path and a study on the prevention of the dispersion of contaminated groundwater

Hyung Pyo Kwon¹ · Dongjin Kim² · Myeong Jae Yi¹ · Jeong Yong Cheon¹ · Seon Ho Shin¹ ·
Yong Hoon Cha¹ · Jeongwoo Kim^{1,‡}

¹GeoGreen21 Co., Ltd., Seoul 08376, Republic of Korea

²Institute of Environmental Research, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

요 약

매립지는 급속한 산업발전으로 필수 시설이지만, 매립장 침출수가 유출되면 그 피해는 엄청나기 때문에 매립장 관리가 중요하다. 매립장에서 발생한 피해를 최소화하기 위해서는 다양한 분야의 현장조사와 접근 방법이 고려되어야 한다. 본 연구는 매립장에서 유출된 침출수에 대해 효과적으로 대처 방안을 마련하기 위해서 수리 지질학적 측면에서 고찰하였다. 매립지 주변에서 유출이 의심되는 17개 지점에서 수질 조사 및 전기비저항탐사, 지질조사, 순간수위변화시험 등 다양한 현장조사를 실시했다. 지하수위 분포, 오염물질 농도 및 Ca-(Cl+NO₃)과 Na-Cl의 수질유형이 나타나는 범위를 함께 살펴보면 침출수 유출범위를 보다 명확하게 특정할 수 있었다. 유출이 의심되는 구간을 중심으로 전기비저항탐사를 수행하여, 침출수 유출지점 3개소와 유출 심도를 과학적으로 파악하였다. 현장조사 결과와 매립지 시설 구조를 바탕으로 침출수 유출 경로를 개념화하였고, 매립지 시설 중 지하수배제시설의 노후화가 유출경로가 될 수 있음을 제시하였다. 지하수 오염 확산을 제어할 수 있는 여러가지 경우에 대해서 지하수 모델링을 수행한 결과, 차수벽 설치 후 지하수의 흐름을 유도하기 위해 30 m³/day 양수정을 가동하면 오염 확산이 가장 효과적으로 제어되었다. 매립지 침출수 유출 현장에서 차수벽 설치와 양수 시설을 복합적으로 운영하면 지하수 오염확산 제어에 최대 효과를 기대할 수 있다.

주요어: 매립지, 유출, 지하수, 오염, 지하수 흐름

ABSTRACT: Landfill sites are essential facilities due to rapid industrial development, but if leachate from landfills is spilled, the damage is enormous, so management of landfills is important. Various field surveys and approaches should be considered to minimize damage from landfill sites. The hydrogeological investigation was conducted in order to effectively prepare a countermeasure against leachate leaked from landfill in this study. Groundwater and surface water quality were measured at a total of 17 points around the landfill where leakage was suspected. Field surveys such as electrical resistivity surveys, geological surveys and slug tests were conducted to identify the hydrogeological characteristics. As a result of examining the distribution of groundwater level and pollutant concentration, it was confirmed that leachate spilled to the outside from the landfill. Moreover, considering the appearance of water quality types Ca-(Cl+NO₃) and Na-Cl and the contamination extent, it was possible to specify the influence range of leachate more clearly. Electrical resistivity survey was conducted around the section where leakage was suspected, and three leachate outflow points were designated. Based on the results of the field survey, the concept of leachate outflow process was presented. The deterioration of the groundwater exclusion facility became an outflow path of leachate. From the groundwater flow and contaminant transport modeling, a management plan through groundwater flow control was presented at this research site. From the modeling results, it was proved

[‡]Corresponding author: +82-2-6330-2500, E-mail: wjddnkim@geogreen21.com

to be an effective method because the spread of pollution is controlled when a 30 m³/day pumping well is operated to induce the flow of groundwater after installing the barrier. In order to control the flow of groundwater and prevent the diffusion of the leachate, the maximum effect can be expected if the barrier installation and pumping facility are operated in a hybrid manner.

Key words: landfill, leakage, groundwater, contamination, flow

1. 서론

매립지내 침출수는 장기간에 걸쳐 서서히 분해되고 매립 폐기물의 종류와 성상에 따라 다양한 유해 물질이 함유될 수 있다(Figueroa, 1993; Salem *et al.*, 2008). 이러한 침출수는 외부로 유출 및 확산되면서 주변지하수를 오염시킬 수 있다(Bjerg *et al.*, 1995). 외국의 경우 매립지에서 발생한 침출수에 의해 주변지하수를 오염시키는 연구사례는 어렵지 않게 찾아볼 수 있다(Armeth *et al.*, 1989; Kumar and Alappat, 2005; Akinbile and Yusoff, 2011). 우리나라 매립지의 경우 방치되어 침출수 관리에 적극적이지 못한 매립지가 많은 것으로 보고되고 있으며 매립지에서 침출수로 인한 지하수의 수질변화 및 그 영향을 평가하는 현장위주 연구가 부족하다(Park *et al.*, 2007).

한편 침출수 차단방법으로는 grout curtain, slurry wall, sheet pile, permeable reactive barrier 및 grouting 등이 있다(Lee *et al.*, 2011). 이러한 차수방법으로는 주로 침출수의 유출이 발생하지 않는 매립지에서 예방차원에서 적용가능 할 수 있다. 그 뿐만 아니라 매립지 주변에 차수벽을 설치하여 오염물질의 확산을 물리적으로 차단하는 기술이 현장적용을 통해 그 신뢰성이 입증되었지만(Hwang, 1998), 차수벽의 내부의 수위를 조절하는 등 차수벽 주변의 지하수와 내부의 수위를 고려한 차단효과를 검토해야 침출수 외부 유출에 대해서 효과적으로 대처할 수 있다(Lee *et al.*, 2002). 수리지질학적 차원에서 고려하면 침출수로 인해 주변 지하수가 오염된 매립지에서는 차수벽 설치뿐만 아니라 지하수위 조절과 연계한 확산 방지와 정화방안이 필요하다. 본 연구에서는 매립장 주변 지하수의 오염특성과 수리지질학적 특성을 파악하고, 그 결과를 토대로 유출된 침출수를 차단하기 위해 물리적으로 설치하는 차수벽 공법의 한계점을 고찰해 보고, 수리지질학적 측면에서 효과적인 차단방안을 제시하였다. 이를 위하여 수질, 물리탐사, 현장수리시험, 지질조사 등 다양한 현장조사를

수행하였다.

2. 연구지역 개요 및 연구방법

2.1 현장개요

연구대상 매립지는 ○○시에 위치하는 매립면적 17,762 m² 매립용량 259,458 m³의 매립지로서, 2006년에 매립을 시작하여 2012년에는 매립용량의 92%를 채우고 매립시설 일부가 붕괴되면서 운영이 중단된 상태이다. 매립장 바닥 깊이는 약 25 m이고, 침출수위는 매립장 바닥에서 평균 20 m 높이까지 형성된 상태이다. 붕괴 사고 이후로 매립지 관리 소홀로 인해 침출수 유출이 우려되었으며, 그 동안 크고 작은 주변 지하수 오염에 대한 이슈가 제기되었다. 특히, 매립지 하류 농경 지역에 거주하는 주민과 환경단체에서 주변 하천 및 지하수까지 오염이 확산되었다고 주장하는 등 민원이 많이 발생하는 지역이다. 매립지는 주변이 산지로 둘러싸인 분지에 조성되었으며, 매립지의 서남쪽에는 산업단지 우수관로와 연결된 소화천이 흐르고 있으며 북서방향으로 산업단지, 남동방향으로 골프장이 위치하고 있다(그림 1).

본 매립지 지질은 선캠브리아기 박달형 변성암을 기저로 그 상부를 조선누층군의 대석회암층군이 부정합으로 피복하고 있다. 대석회암층군 상부는 부정합으로 주로 천매암과 녹니석 편암으로 구성된 오르도비스기의 서창리층과 이들을 관입한 주라기 화강암류가 넓게 분포한다(Kim *et al.*, 1967).

2.2 연구방법

침출수 유출이 지하수 수질에 미치는 영향을 모니터링하기 위해 매립지 관련 시설(OH-1~OH-6)을 수질조사 지점으로 활용하고 지하수 흐름방향 및 침출수 유출 경로 등을 고려하여 신규 관측정(NH-1~NH-7)도 설치하였다(그림 2). OH-1~OH-3은 매립지 조성 당시 같이 만든 지하수 감시정이고, OH-4(내부 침출수), OH-5(지하수 배제정), OH-6(침출수

저류조)은 매립지 내부시설로서 침출수 원수와 가까운 특성을 나타내는 지점으로 볼 수 있다. OH-1 ~ OH-6 외 조사 관측정들은 상부 1.5 m 무공관과 하부 유공관으로 구성되어 있으며 천부 관측정과 심

부 관측정으로 구분할 수 있다. 천부 관측정(NH-1 ~ NH-3, NH-4-1, NH-4-2)의 심도는 약 25 m 이내로서 충적층과 풍화대 구간을 대상으로 설치되어 있다. 그 외 관측정 NH-4-2, NH-5-2, NH-6, NH-7는

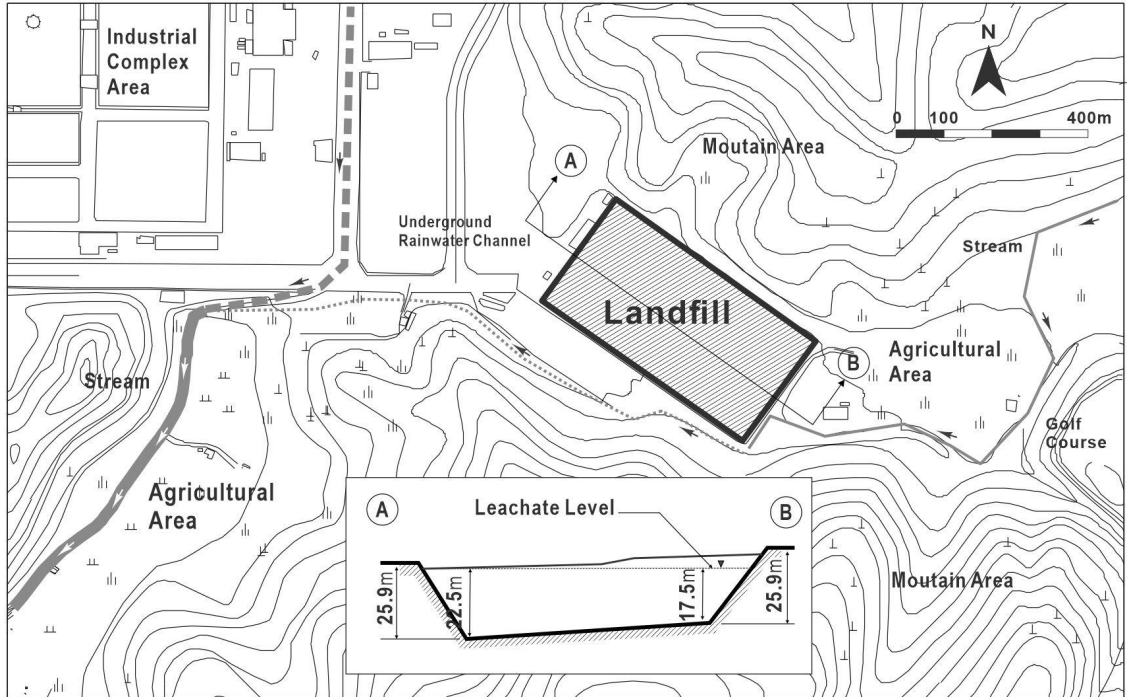


Fig. 1. Topograph of the studied landfill.

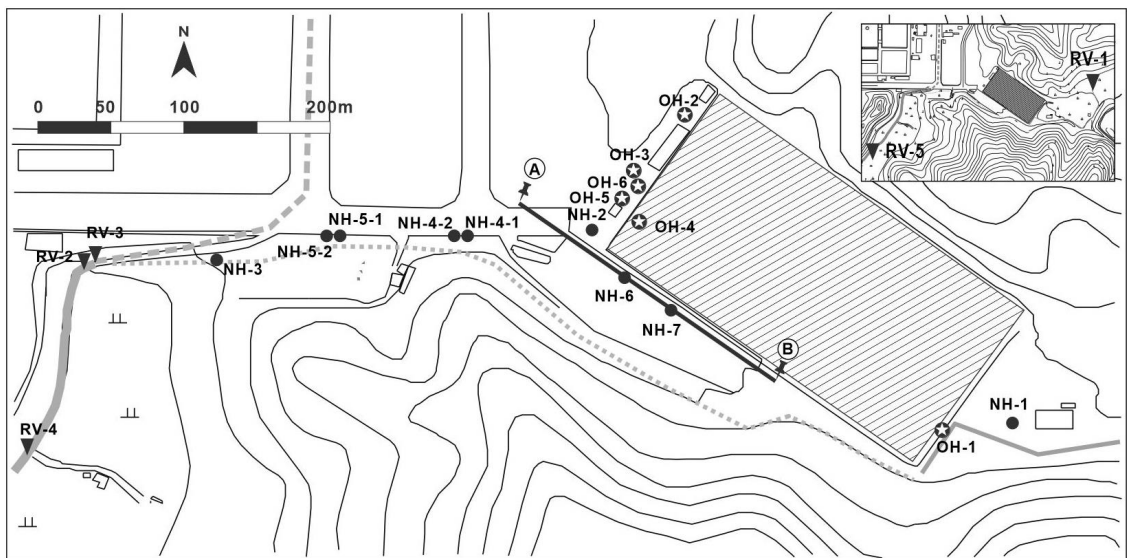


Fig. 2. Locations of groundwater monitoring wells and sampling stations around the studied landfill.

심도 50 m이다. NH-4-2 및 NH-5-2는 시추조사공을 관측정으로 활용한 지점이고, NH-6, NH-7 관측정은 지구물리탐사인 토모그래피 조사에 활용한 지점이다.

매립지 주변지역의 침출수 영향을 연구하기 위하여 지하수 및 하천수 수질시료를 2015년 6월, 7월, 10월에 약 1개월 주기로 총 3회 시료를 채취하여 분석하였다.

지하수 시료는 지하수 관측정(NH-1~NH-7) 및 매립지 관련 시설(OH-1~OH-4) 뿐만 아니라 주변 지하수개발이용시설 2개소를 포함하여 분석하였다. 베일러를 이용하여 지하수 시료를 채취하였으며, 채취 전 충분한 퍼징(purging)을 통해 지하수질의 안정을 확인한 다음 후 채수하였다. 퍼징과 시료채취시 일회용 베일러를 사용하고, 재사용하는 장비에 대해서는 사용 전 세척을 실시하여 교차오염을 방지하였다. 채취된 시료는 대기 접촉에 민감한 항목인 온도(Temp.), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP), 용존산소량(DO)을 현장에서 휴대용 측정기를 이용하여 직접 측정하였다. 특히, 전기전도도 및 수온의 경우, 관측정내 수직적 수질변화를 관측하였다. 채취된 시료는 분석항목에 따라 전처리 후 시료의 교환이나 기포가 발생하지 않도록 주의하여 별도의 용기에 담았다. 양이온의 분석을 위한 시료는 0.45 μm 공극의 필터를 사용하여 여과 처리 후 농질산을 주입하여 pH가 2 이하가 되도록 전처리를 하였으며, 음이온 분석용 시료는 현장에서 여과 후 시료병 상부의 빈공간(headspace)이 발생하지 않도록 채취하였다.

하천수 시료는 5지점으로 지하수 조사시기와 동일하게 총 3회 채취 분석하였다. 매립지로부터 북동방향으로(상류) 약 380 m 이격된 배경농도지점(RV-1), 매립지 하류지점(RV-2), 산업단지 우수배출지점(RV-3)과 순차적으로 하류방향으로 이격된 RV-4, RV-5 지점에서 수질시료를 채취하였다(그림 2).

매립지 지층의 구성상태 및 기반암의 압중과 압밀 변화 등을 파악하기 위하여 총 2개소(NH-4-2, NH-5-2)에서 76 mm 구경으로 심도 50 m까지 시추조사를 실시하였다. 매립지 지층 단면을 개념화하기 위하여 시추조사 결과와 함께 매립지 조성당시 지질조사 자료와 관측정 착정시 육안으로 확인된 현장자료를 활용하였다.

관측정의 수질분석을 통해 침출수 유출 의심지점의 파악이 가능하지만, 차수시설의 수직적 손상위치와 범위를 파악하는데 한계가 있어, 전기비저항탐사를 수행하였다. 전기비저항탐사에서 획득한 연속적인 물성분포 자료로 침출수의 오염범위와 차수시설의 손상부위를 추정하였다. 침출수 유출 의심지점을 중심으로 1개 측선(그림 2, ㉠-㉢)으로 조사하였다. 그리고 일부 구간에서는 정밀하게 유출구간을 규명하기 위하여 관측정(NH-6, NH-7)을 활용한 전기비저항 토모그래피 탐사를 수행하였다. 전기비저항 토모그래피 탐사는 전극을 시추공 내에 설치하여 정밀한 전기비저항 영상을 획득하는 탐사법으로 분해능이 가장 높은 방법으로 알려져 있다(Yi *et al.*, 2002).

본 연구 대상지역의 공간적인 지하수위 분포를 파악하기 위하여 모든 관측 지점을 대상으로 동시간대에 수동 수위측정기를 통해 관측하였다. 관측된 지하수위는 수준측량 결과를 반영하여 해발고도로 환산하여 지하수위 분포와 지하수 흐름 방향을 검토하였다. 공간적인 수리전도도를 확인하기 위하여 총 11개소에서 순간수위변화시험을 수행하였다.

오염 지하수의 확산방지와 정화 측면에서 향후 지하수 거동을 모의하여 매립지 관리 방안을 검토하였다. 지하수 및 오염물질 거동 모의는 수치해석 프로그램인 Visual MODFLOW을 이용하였다. 모의 영역은 서측 소하천, 북측, 남측 및 동측은 산능선을 경계로 2,500 × 2,250 m로 설정하고 외곽지역은 가로, 세로 10 m로 매립지를 중심은 가로, 세로 2.5 ~ 5.0 m로 세분 격자망을 구성하였다. 모의 영역 경계는 서측 소하천을 비롯한 지류를 하천경계(river boundary), 동측의 산능선을 지하수 분수령으로 고려하여 불투수 경계(no flow boundary)로 설정하였다. 연구 주변 지역 관측정 NH-1~7, OH-1~3에서 조사된 지하수위 자료를 이용하여 Root Mean Square가 0.471 m, Normalized RMS는 3.157%가 되도록 모형보정을 마쳤다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 및 현장특성 결과

지하수위는 월별로 측정하였고, 지하수위 분포는 유사하였기 때문에 10월에 측정된 지하수위를 해발고도로 환산하여 그림 3에 도시하였다. 그림 3과 같

이 지하수 흐름은 북동방향에서 남서방향으로 흐르는 것으로 확인되었다. 매립장 시설 경계내에서 최상류와 하류에 위치한 관측정(NH-1과 NH-2)의 지하수위 차이는 약 10 m (수두경사 약 0.03) 이상이고, 매립장 시설 외부 하류지역(NH2와 NH3)의 지하수위 차이는 약 5 m (수두경사 0.015) 내외로서 매립장 외부 주변의 수두경사가 작아지기 때문에 지하수 흐름속도와 침출수 확산속도가 상대적으로 느려지는 것으로 해석된다.

순간수위변화시험 해석은 상용프로그램인 AQTE SOLV (v.4.50)를 이용하였다. 해석시 자유면 대수층 결과를 해석하는 모델로 Bouwer-Rice 직선법(Bouwer and Rice, 1976)과 피압대수층에 적합한 모델로는 Cooper-Bredehoeft-papadopulos 특성곡선법(Cooper *et al.*, 1967)을 적용하여 해석하였다. 층적층 구간에 설치한 관측정(OH-1, OH-3, NH-1, NH-2, NH-3, NH-4-1, NH-5-1) 주변 수리전도도는 $1.49 \times 10^{-4} \sim 5.66 \times 10^{-3}$ cm/sec 범위에서 나타나며, 평균 수리전도도는 3.35×10^{-4} cm/sec로 산정되어 조사대상지역 대수층은 전반적으로 투수성이 양호하였다. 특히, 매립장 침출수 유출 발생 의심지역 주변에 위치한 NH-2 관측정의 양수시험 자료에서 투수량계수는 $1.97 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이며, 수리전도도는 1.03×10^{-3} cm/sec로 나타났다. 따라서 매립장 침출수 유출이 의심되는 매립장의 직하류 지역 주변은 투수성이 좋아

침출수의 유출경로인 것으로 판단된다. 반면에 암반 심도 50 m까지 착정한 관측정(NH-4-2, NH-5-2, NH-6, NH-7)의 수리전도도는 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 특히, 매립장 측면부에 위치한 암반 관측정 NH-6, NH-7은 불투수성 매질에 가까운 수리전도도를 나타내고 있다. 침출수가 암반지하수까지 오염이 확산되기 어렵다는 것을 나타내고 있다.

현장수질측정항목(pH, EC, ORP, DO, 수온)과 이온물질(10개 항목), 질소계(4개 항목), 금속류(10개 항목), 농약류(2개 항목), 탄화수소류(12개 항목), 기타(8개 항목) 등 총 49개 항목을 3회에 걸쳐 분석한 결과 수질 농도 분포현황은 시기별 큰 차이없이 유사하게 나타났으며, 매립장과 인접한 지점에서 농도가 높게 검출되었다. 전기전도도, 염소이온, 암모니아성질소, 시안, 페놀, BOD, COD 항목이 높게 검출되어 매립장 침출수 오염범위를 알 수 있는 수질 분포형태로 나타났다. 그 외 나머지 항목은 대부분 불검출되었다. 주요 오염물질의 수질 분석결과를 표 1에 정리하였다. 그림 4와 같이 농도 분포를 살펴보면 매립장에서 침출수가 유출되었다는 사실과 그 확산범위를 확인할 수 있다. 그 중에서 염소이온은 매립지 침출수 및 산업폐수, 생활하수 등에서 다양한 오염원에서 배출되는 물질로서 지하수 오염의 주요 관심물질이다. 염소이온의 경우, 매립지 상류부 배경농도 지점인 NH-1, OH-1은 각각 21 mg/L, 322

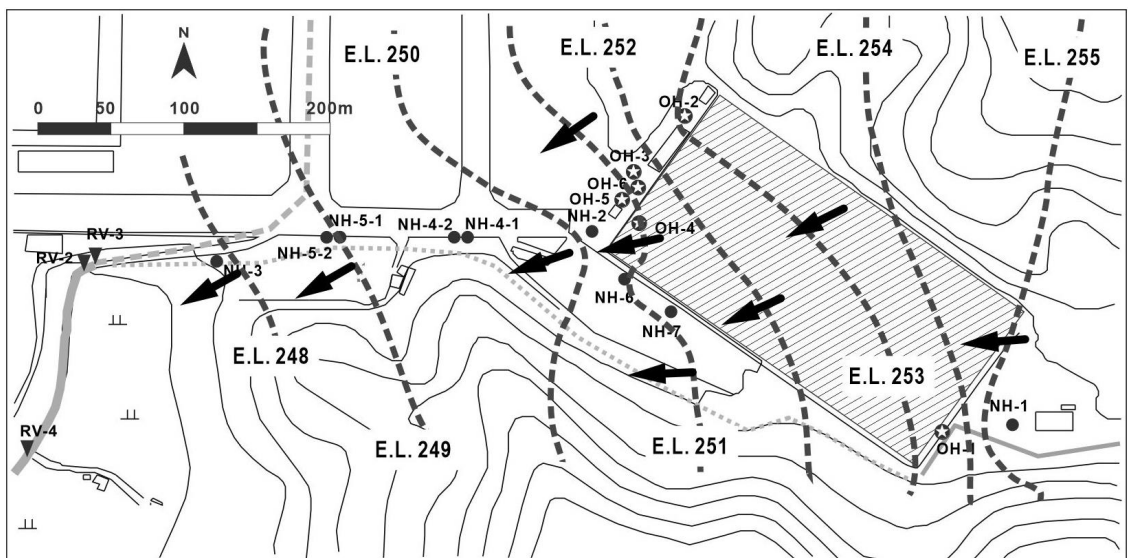


Fig. 3. Distribution of groundwater level and direction of groundwater flow around the studied landfill.

Table 1. Summary of water quality analysis results.

Point	No. Sampling	NH ₄ -N	CN	Phenol	BOD	COD _(Mn)	Cl ⁻	Point	No. Sampling	NH ₄ -N	CN	Phenol	BOD	COD _(Mn)	Cl ⁻
OH-1	1st	5.13	ND	ND	3.5	3.3	713	NH-5-1	1st	26.00	ND	ND	5.2	4.8	106
	2nd	0.75	ND	0.015	2.6	2.8	1,118		2nd	0.05	ND	0.005	2.3	4.8	429
	3rd	13.84	ND	0.053	0.5	3.2	322		3rd	ND	ND	ND	0.5	3.0	243
OH-2	1st	ND	0.010	ND	2.1	14.7	1,692	NH-5-2	1st	27.00	ND	0.006	7.4	1.8	125
	2nd	579.73	0.390	1.543	250.8	290.0	44,948		2nd	ND	ND	ND	1.9	3.6	130
	3rd	118.88	0.010	0.328	206.4	80.0	9,221		3rd	ND	ND	ND	1.3	3.0	300
OH-3	1st	3,791.00	0.400	2.483	441.6	453.3	38,489	NH-6	1st	×	×	×	×	×	×
	2nd	785.83	0.420	3.144	480.0	450.0	68,765		2nd	28.08	0.260	0.027	126.0	153.3	22,062
	3rd	633.42	0.390	2.762	711.0	490.0	49,911		3rd	14.03	0.130	0.700	36.6	144.0	19,175
OH-4	1st	893.00	0.350	1.009	243.0	380.0	23,465	NH-7	1st	×	×	×	×	×	×
	2nd	588.69	0.530	1.100	381.0	346.6	42,798		2nd	381.72	0.490	2.151	449.4	326.6	41,760
	3rd	625.81	0.250	1.616	239.0	306.6	31,960		3rd	520.78	0.280	2.198	360.0	400.0	45,585
OH-5	1st	1,102.00	0.320	2.169	336.0	300.0	29,846	SH-2	1st	3.90	ND	ND	0.8	0.8	14
	2nd	507.31	0.480	2.612	340.0	360.0	53,069		2nd	0.08	ND	0.008	1.4	1.0	53
	3rd	563.49	0.180	1.386	373.0	290.0	39,440		3rd	0.08	ND	ND	0.3	0.8	12
OH-6	1st	3,356.00	0.460	0.202	351.0	380.0	35,498	SH-3	1st	1.30	ND	ND	0.8	0.4	8
	2nd	1,124.63	0.770	0.042	350.0	370.0	57,558		2nd	ND	ND	ND	1.5	0.6	8
	3rd	851.60	0.440	0.034	456.0	370.0	61,288		3rd	0.08	ND	ND	0.1	4.4	9
NH-1	1st	10.00	ND	0.020	26.4	37.3	411	RV-1	1st	8.00	ND	ND	12.0	4.4	17
	2nd	ND	ND	ND	21.0	10.0	19		2nd	0.07	ND	0.005	3.3	6.2	36
	3rd	0.18	ND	ND	2.2	11.6	21		3rd	0.18	ND	ND	0.6	2.2	47
NH-2	1st	1,121.00	0.320	2.909	412.5	540.0	29,834	RV-2	1st	63.00	ND	ND	24.6	25.3	3,650
	2nd	799.60	0.440	4.021	547.0	540.0	58,989		2nd	3.22	ND	ND	5.9	11.3	684
	3rd	606.56	0.130	2.533	394.0	440.0	43,007		3rd	36.89	ND	ND	3.0	18.8	3,221
NH-3	1st	21.75	ND	0.058	16.4	40.0	1,433	RV-3	1st	10.00	ND	ND	3.4	3.0	64
	2nd	0.07	ND	ND	20.5	28.0	1,649		2nd	0.22	ND	ND	3.6	7.0	25
	3rd	ND	ND	ND	4.5	29.0	1,520		3rd	9.82	ND	ND	13.8	11.0	880
NH-4-1	1st	35.00	ND	0.018	15.6	12.0	193	RV-4	1st	56.00	ND	ND	4.4	6.7	585
	2nd	10.06	ND	0.009	15.0	18.5	482		2nd	0.07	ND	ND	3.3	5.2	34
	3rd	7.42	ND	ND	0.9	5.7	290		3rd	3.74	ND	ND	14.7	10.8	494
NH-4-2	1st	21.00	ND	0.178	8.3	9.6	200	RV-5	1st	41.00	ND	ND	10.7	6.0	273
	2nd	0.28	ND	0.010	6.5	6.0	405		2nd	0.06	ND	ND	2.6	4.8	55
	3rd	0.15	ND	ND	0.7	8.4	624		3rd	1.03	ND	ND	15.5	10.6	205

mg/L로 검출되는 반면, 매립지 내부 시설인 OH-4, OH-5, OH-6은 각각 31,960 mg/L, 39,440 mg/L, 61,288 mg/L로 높은 농도를 나타내었다. 매립지와 인접한 지점 OH-2, OH-3, NH-2, NH-6, NH-7에서 각각 9,221 mg/L, 49,911 mg/L, 43,007 mg/L, 19,175 mg/L, 45,585 mg/L 검출되어 매립지내 침출수와 유사한 오염도를 나타내고 있다(그림 4). 따라서, 매립지와 인접한 OH-2, OH-3, NH-2, NH-6, NH-7 지점들은 매립지의 직접적인 영향을 받는 유출지역으로 볼 수 있다. 그 외 중간부 및 최하류부의 관측지점은 점차적으로 농도가 낮아진다. 그러나 그 농도분포가 공간적으로 연속적이지 않고 중간부 지점인 지하수와 지표수 지점 NH-3, RV-2에서 1,520 mg/L, 3,221 mg/L로 상승하였다가 감소하는 형태를 나타낸다. 이것은 매립지의 침출수가 최하류부까지 확산된 것이 아니라 NH-3, RV-2 주변에서 새로운 오염원의 유입이 있는 것으로 해석할 수 있다. 실제로 RV-2 지점은 산업단지 우수관로가 합류되는 지점으로 또 다른 오염물질이 유입된다고 할 수 있다. 이렇게 염소이온의 농도분포처럼 매립지 내부 또는 인접지역에서 고농도로 나타나는 다른 오염물질(전기전도도 등)의 분포도와 거의 일치하기 때문에 침출수의 확산범위는 매립지와 인접한 지역 및 일부 중간부(NH-4 주변)까지이며 침출수와 다른 오염원이 하천수 RV-2 지점에 합류되어 확산되었다는 것을 뒷받침한다고

할 수 있다.

주이온들의 파이프로드를 통해 해석한 결과 연구지역의 수질유형은 크게 Ca-(Cl+NO₃)인 Group1과 Na-Cl인 Group2로 구분된다(그림 5). 총 3회 수질 유형의 변화를 보면 매립지 내부 시설 및 인접한 지점들은 연속적으로 Na-Cl인 Group2로 나타나는 반면에 중간지점 또는 최하류부에 위치한 지점들은 Group2 → Group1 → Group2로 변화하였다. 2회차 시료채취는 7월에 수행되었으며, 당시 비가 129 mm 내리는 등 강우량이 많았던 시기이다. 7월에 수행되었던 수질시료에서는 중간부 지점 NH-4 하류 방향으로 Ca-(Cl+NO₃)인 Group1 유형으로 나타나는 것이다. 이 결과 또한 매립지 최하류지점인 NH-3와 RV-2(하천수)에서는 매립지 침출수와는 다른 오염원이 유입된다고 볼 수가 있다.

따라서 매립지에서 시작해서 하류방향에 위치한 OH-2, OH-3, NH-2, NH-4-1 관측점이 위치한 지점까지 침출수 영향을 받는 지역으로 판단된다. 그 이하 최하류 방향으로 또 다른 오염원으로 영향으로 염소이온 등 오염되었는 것으로 판단된다. 연구대상 주변 청취조사에 따르면 RV-2와 NH-3의 주변 지역에는 과거에 농경지, 축사, 양어장 등이 위치하는 등 생활하수와 같은 다양한 염소 오염원이 존재하였던 것으로 확인되었고, 이 지역은 기타 다른 오염원의 영향을 받고 있는 지역으로 판단된다.

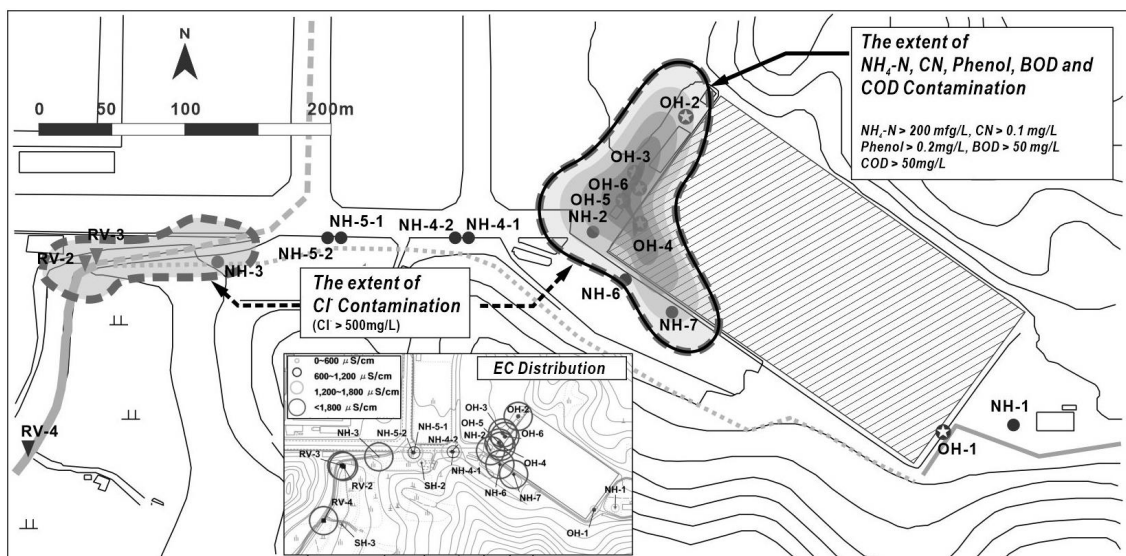


Fig. 4. Distribution of groundwater quality (Cl, NH₄-N, CN, Phenol, BOD, COD and EC) around the studied landfill.

3.2 유출지점 및 유출시기 분석

지하 암반 또는 토양의 전기비저항에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 매질내 공극수의 함양과 이온

농도이기 때문에 전기비저항 탐사결과를 전기전도도와 연계하여 해석한다면 침출수의 유출 위치를 분석할 수가 있다(Lee and Lee, 2009). 그리고 암석 간

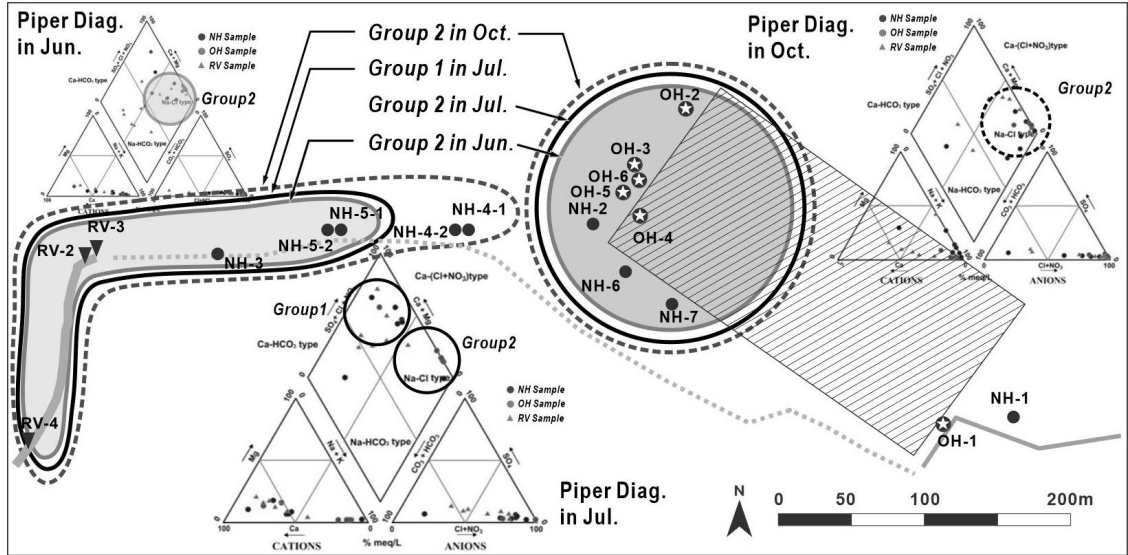
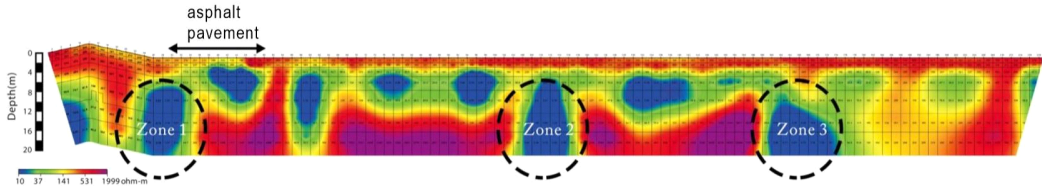
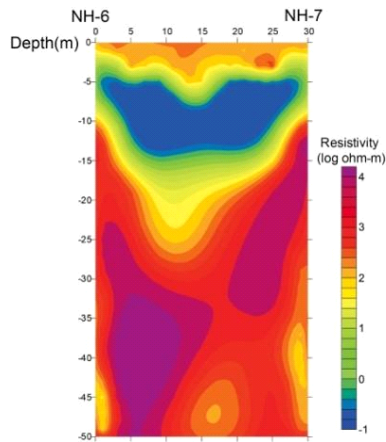


Fig. 5. Piper Diagram of water quality type around the studied landfill.



(a) The inversion result of the 2D electrical resistivity survey



(b) Resistivity distribution obtained from the inversion of the electrical resistivity tomography data

Fig. 6. The resistivity distribution around the landfill.

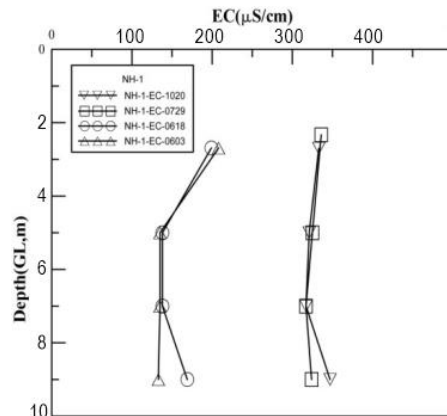
극수의 전기비저항 관계를 연구한 Park (2004), Park *et al.* (2009) 및 Lee *et al.* (2016)의 결과를 토대로 침출수의 영향범위를 5 ohm-m를 기준으로 해석하였다.

본 연구에서 탐사한 측선은 그림 2와 같으며, 그 탐사 결과 해석은 선행된 연구결과를 참고하였다 (Lee *et al.*, 2016). 상부 토양과 기반암 사이에 분포하는 지층의 전기비저항은 대략 0.2~50 ohm-m 정도로 상당히 낮은 값으로 매립장 침출수의 전기전도도를 고려하였을 때, 유출된 침출수에 의해 오염된 것으로 판단된다. 특히 그림 6a에서 도시된 5 ohm-m 이하 지역은 침출수 유출지점으로 판단되며, 수직적 오염구간으로 추정되는 지역을 Zone-1, Zone 2, Zone-3으로 도시하였다. 이 지역은 5 ohm-m 이하의 전기비저항이 약 20 m 깊은 심도까지 연장되어 나타나고 있다. 특히, zone 1은 매립장 침출수 수집, 지하수 배제시설 등이 모여 있는 직하류 지역으로서 침출수 주요 유출경로 추정된다.

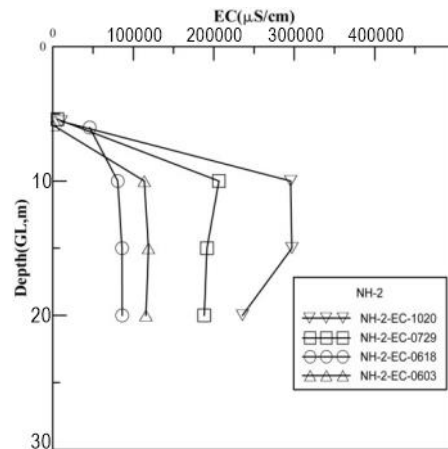
침출수 유출의 수직적 연장성을 확인하기 위해서 Zone-2 주변에서 토모그래피 탐사를 수행한 결과(그림 6b)에서 10 ohm-m 이하의 낮은 전기비저항 영역인 심도 약 4~17 m 구간을 매립장 측면에서 발생한 침출수 유출 지점으로 해석된다(Lee *et al.*, 2016).

토모그래피 탐사결과에서 침출수 유출 구간과 더불어 침출수의 수직적 확산 정보를 더 설명하기 위하여 전기전도도의 수직검층을 수행하였다(그림 7). 수직검층 대상관정은 상류에 위치하고 비오염지역인 NH-1 관측정, Zone-1 주변 지역의 NH-2 관측정, Zone-2 주변지역에 위치한 NH-6 관측정을 대상으로 수행하였다. 수직검층 방법은 전기전도도 측정기를 관측정 내부 상부에서 하부로 방향으로 내려면서 2~5 m 간격으로 측정하였다. 측정결과, NH-1에서는 전기전도도가 심도에 따라 거의 변화가 없거나, 약간 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 오염지역은 NH-2, NH-6 관측정에서는 약 10 m 지점에서 급격히 상승한 것으로 확인할 수 있다. NH-6 관측정의 전기전도도 값을 자세히 살펴보면 심도 10 m에서 상승한 전기전도도는 심도 약 15 m 주변에서 소폭 감소하였으나 비교적 높은 값을 유지하다가 50 m 암반층 구간에서 급격히 감소하였다.

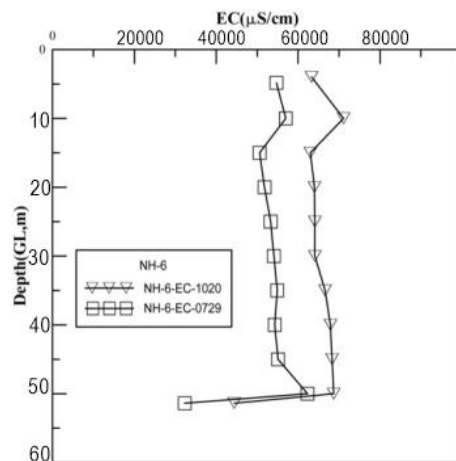
매립장 침출수 수집, 지하수 배제시설 등이 모여 있는 직하류 지역(Zone1)과 매립장 측면부(Zone2,



(a) Vertical inspection of E.C. in NH-1



(b) Vertical inspection of E.C. in NH-2



(c) Vertical inspection of E.C. in NH-6

Fig. 7. Vertical inspection results of electrical conductivity in monitoring wells.

Zone3)에서 침출수가 유출되었고, 유출된 침출수는 투수성이 상대적으로 큰 층적층 및 풍화대 구간을 따라 확산한 것으로 해석된다. 심도가 깊은 암반층으로 갈수록 침출수의 영향이 작아진다는 것을 알 수가 있다.

그림 8은 매립장 내부 OH-4의 침출수 수위의 변화를 별도로 나타낸 그림이다. 침출수 수위가 집중 강우 시기 7월에 상승하다가 다시 하강하는 추세를 보여준다. 그리고, 비교적 큰 강우 이벤트가 발생한 시기에는 수위가 급상승하는 것을 보여주고 있다. 강우가 발생하면 직접적으로 매립지 내부로 침투하여 침출수를 형성시키는 것으로 판단된다. 그리고 높아진 침출수위는 강우 종료후에 다시 하강한다는 것은 매립장 내부에서 많이 생성된 침출수가 외부로 바로 유출된다는 것으로 시사한다.

3.3 유출경로 개념화

본 연구의 최종 목표는 오염 지하수의 확산을 억제하고 주변 지하수를 정화 방안을 마련하는 것이다. 그 목표를 위해서, 앞서 보여준 수질분석, 지질 분포 및 수리지질특성 등 현장조사 결과와 더불어 매립지 내부 시설 구조도를 토대로 침출수 유출 경로를 개념화하였다. 침출수 유출은 매립지 시설 중 하부에 위치한 OH-5 지역(NH-2 관측정과 인접)이 가장 큰 유출지점이고 관측정 NH-6 주변지역도 유출지점으로 판단된다. OH-5 지점은 지하수 배제정 시설로서 매립지 조성당시 매립지 주변의 지하수위

를 낮추기 위한 시설이다. 매립지 경계 바닥을 따라 유공관을 깔고, 최종적으로 하류에서 지하수를 수집 하도록 설계되어 있다. 지하수 배제정에 연결된 유공관의 설치 형태는 그림 9a와 같다. 그림 9b는 차수막 시트의 훼손으로 인해서 유출된 침출수가 지하수 배제시설의 유공관에 모이는 과정을 보여주고 있다. NH-6 주변지역 등 차수막의 훼손으로 유출된 침출수는 매립지 사면을 따라 하부로 이동하고 유공관을 따라 지하수 배제정(OH-5)에 도달하게 된다. 이번 조사에서 NH-6만 차수막의 훼손이 우려되는 지점으로 조사되었지만, 차수막이 훼손된 지점은 이 뿐만 아니라 더 많이 존재할 수 있다. 따라서, 매립지 사방으로 차수막이 훼손되어 유출된 침출수는 지하수 배제정으로 모이게 되는 구조이다. 그런데, 이 지하수 배제정(OH-5, 일반적으로 맨홀 형식)이 노후되어 훼손되어 있다면, 지하수와 함께 모인 침출수는 외부로 쉽게 유출될 수 있다(그림 9c). 매립지의 구조적인 안정을 위해 가동되는 지하수 배제시설이 오히려 침출수 오염확산의 경로가 되는 것이다. 따라서 지하수 배제정의 훼손 여부가 그림 9의 개념과 일치 여부를 판단할 수 있으므로, 지하수 배제정의 훼손여부를 확인하였다. 그 확인 방법으로 지하수 배제정 내부에 자동수위 기록계를 설치하고 지하수를 양수하여 지하수위 회복되는 형태를 관측하였다. 지하수 배제정(OH-5)에서 양수 후 관측한 결과, 초기수위까지 빠르게 회복되는 것으로 관측되었으며, 콘크리트 구조물인 지하수 배제정(OH-5) 안으로 상

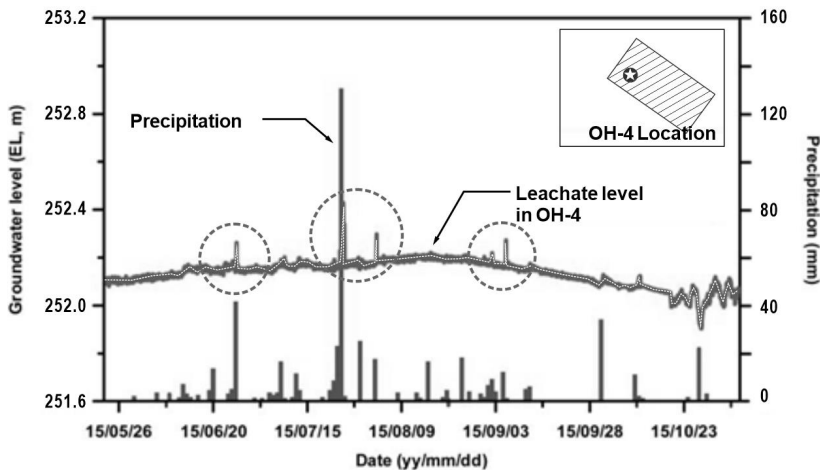


Fig. 8. Changes in leachate level and precipitation in the landfill during the study period.

당히 빠르게 주변 지하수가 유입되는 것으로 육안으로 확인되었다. 이것은 지하수 배제정이 훼손되어 주변 지하수와 연결되어 있음을 나타낸다. 지하수 배제정과 인접하여 침출수 저류조(OH-6)가 위치한다. 침출수 저류조(OH-6)도 높은 수질오염 농도를 나타내는 지점으로서 이 시설도 훼손되어 있다면 또 다른 침출수 유출을 유발하는 주요 시설이 될 수 있다. 그러나, 지하수 배제정에 적용한 조사 방식과 동일한 방법으로 내부 침출수를 수거 후 수위변화를 관측한 결과 침출수 저류조의 수위는 회복되지 않고 수위가 일정하게 유지되고 있어 침출수 저류조의 훼손은 없는 것으로 판단된다.

손은 없는 것으로 판단된다.

3.4 매립지 및 지하수 오염 확산 방지 방안 고찰

이미 유출된 침출수에 의한 지하수 오염 확산이 발생되고 있고, 계속 흘러나올 수 있는 침출수 유출에 대한 방지 대책이 필요하다. 오염 지하수의 확산 방지와 정화 측면에서 향후 지하수 거동을 모의하여 매립지 관리 방안을 연구하였다.

향후 매립지 관리를 위해서 매립지의 안정화도 필요하지만 유출된 오염지하수의 제거와 확산방지를 위한 관리가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 수리지질학적 측면에서 오염지하수 제거와 확산방지에 중점을 두고 관리방안을 연구하였다. 확산방지를 위한 시설로 물리적 억제, 수리적 억제, 화학적 억제 방법이 있을 수 있다. 물리적 억제는 지하수 흐름을 불투수성 재료로 차단하는 것으로 Sheet piling 공법이나 CIP (Cast in Place pile) 공법이 대표적인 방법이라고 할 수 있다. 수리적 억제방법은 지중내 오염지하수를 양수하여 수위를 조절하면서 확산을 억제하는 방법이다. 화학적 억제 방법은 투수성 반응벽체가 대표적인 사례로서 오염물질이 벽체를 통과하면서 농도를 저감하는 방법이다. 물리적 억제는 오염물질을 제거하기 보다는 오염확산을 지연시키는 방법이고, 지하수의 수직적 흐름을 고려한다면 완전한 차단은 불가하다. 그리고 투수성 반응벽체는 본 연구지역이 기반암이 일찍 출현하고 유출 경로가 넓고 깊기 때문에 적용하는 것은 한계가 있을 것으로 판단된다.

따라서 물리적 억제방법과 수리적 억제를 동시에 적용한 방안을 연구하였다. 차수벽의 시공위치와 양수량의 변화 등 다양한 경우에 대해서 수행한 지하수 유동 및 오염물질 거동 모델링 결과는 아래와 같다.

매립장 적절한 조치없이 방치한 경우로 오염원으로부터 오염물질이 지속적으로 유출되는 조건으로 모의하였으며 오염물질의 초기 주입 농도는 100 mg/L로 입력하여 100 mg/L의 1%에 해당하는 1 mg/L를 기준으로 오염범위를 도시하여 오염물질 최대 확산 범위를 나타내었다. 오염물질의 최대 확산 가능성으로 모의를 수행하기 위하여 오염물질의 농도를 저감시킬 수 있는 흡착과 치환, 생분해 등의 반응기작은 고려하지 않았다.

우선, 물리적 억제만을 적용한 케이스로서, 오염

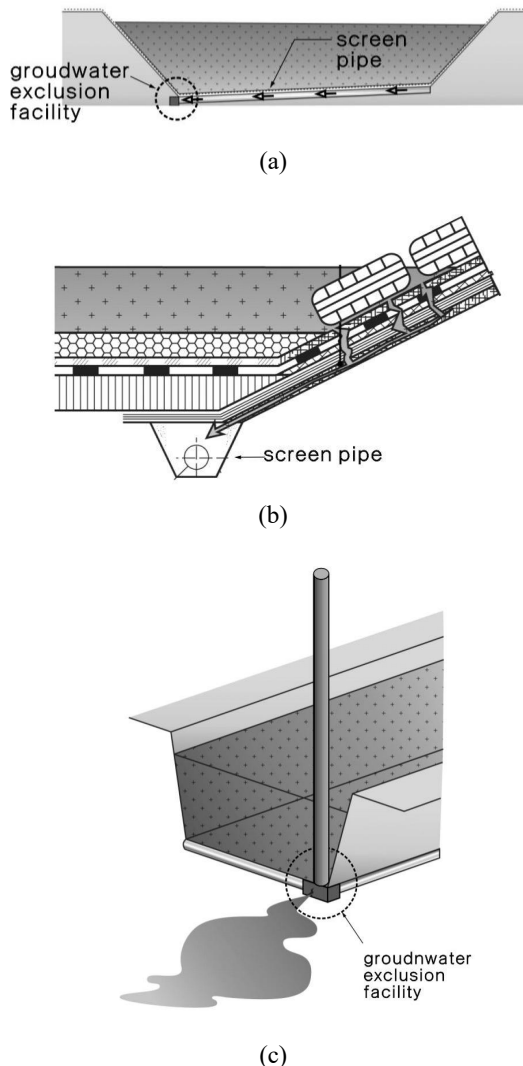


Fig. 9. Conceptual plot of leachate outflow path around landfill.

물질 예상누출경로 정면부에 길이 100 m, 측면부에 90 m, 심도 40 m의 차수벽 설치에 따른 확산범위 여부를 시간경과에 따라 모의하였다(그림 10). 단, 현재 오염된 지하수는 제거하고 차수벽을 설치한다는 케이스이다. 모의결과 지하수의 수평적인 흐름을 막는 차수벽으로 인해 일시적인 확산방지 효과는 있지만 시간이 경과함에 따라 차수벽 하부로 오염물질이 이동하여 기 유출된 오염물질이 재확산 되는 것으로 예측되었다. 따라서 오염확산방지 공법으로 차수벽 단일 시공은 지양해야 할 것으로 판단된다.

두 번째 케이스는 오염물질 예상누출경로 정면부

에 길이 100 m, 측면부에 90 m, 심도 40 m의 차수벽을 설치하고 유출 침출수 및 주변 지하수의 흐름을 하류방향으로 유도하여 단공 양수(10·20·30 m³/day)에 따른 오염물질의 확산범위 여부를 시간에 따라 모의한 것이다. 양수정 사양은 굴착심도 30 m, 굴착구경 150 mm, 수량 2공(1HP/예비공 포함)이며, 양수정 운영은 지하수위강하를 고려하여 24시간 운영하는 것으로 설정하였다.

그림 11은 10년 경과후 오염물질 확산 형태를 나타내고 있다. 예측결과 양수량이 10~20 m³/day의 경우 확산방지 효과는 있지만 시간이 경과함에 따라

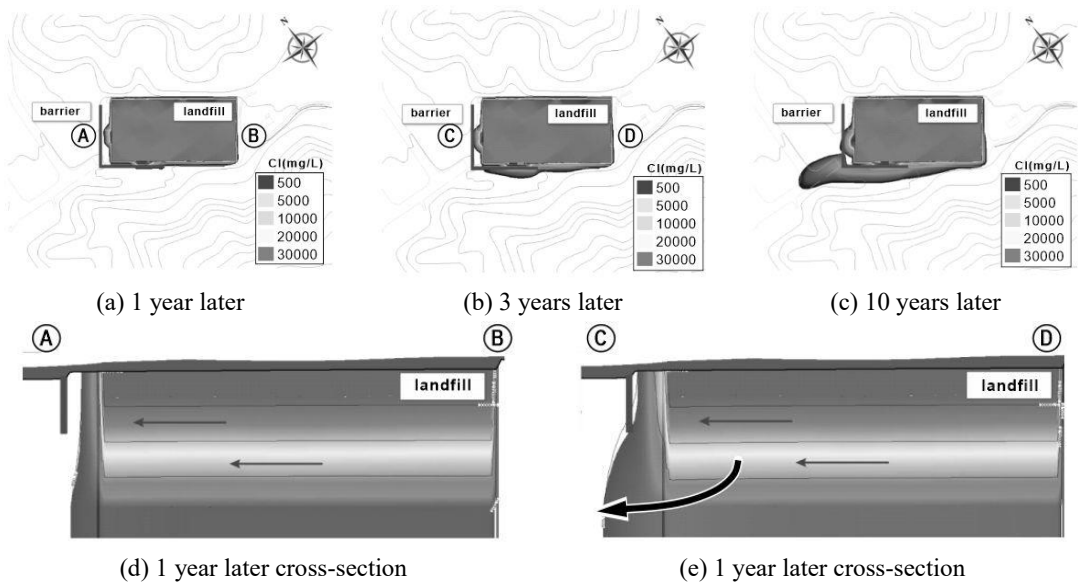


Fig. 10. The results of groundwater modeling in Case 1 of the Management Plan : Case of installation of barrier walls for physical barrier (length 90 to 100 m, depth 40 m).

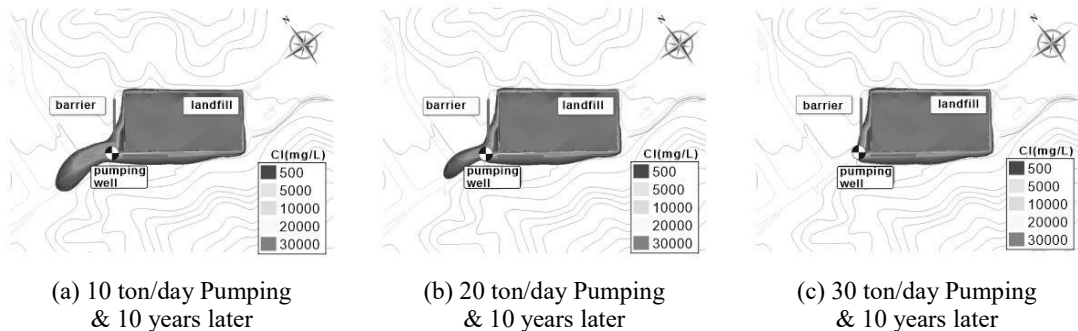


Fig. 11. The results of groundwater modeling in Case 2 of the Management Plan : Controlling groundwater flow through pumping water with a physical barrier.

기 유출된 오염물질이 양수정을 통과하여 확산이 계속 진행되는 것으로 나타났다. 하지만, 양수량이 30 m³/day의 경우 오염확산이 억제되는 것으로 나타났다.

기반암에 매립장이 조성되어 있고 주변 대수층이 충적층과 암반층으로 구성된 지역에서는 오염의 확산을 제어하기 위해서는 차수벽과 같은 물리적 억제만으로 그 효과는 한계가 있을 것으로 판단된다. 초기에는 수평적 흐름을 제어할 수 있지만 상류에서 주변지하수가 계속 유입되고 그 흐름이 유지된다면 지하수는 또 다른 경로를 찾아 유동할 수 있다. 차수벽 하부로 흘러나가는 수직적 흐름이 발생하기 때문에 시간에 지남에 따라 오염의 확산이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 funnel & gate 개념(Courcelles, 2015; Zhang, 2020)을 응용하여 차수벽으로 오염물질의 거동 경로를 특정 방향으로 유도한 다음 집중된 오염물질을 양수처리하는 것을 병행하는 것이 수리지질학적으로 합리적인 관리방안으로 판단된다. 이때 지하수 흐름을 유도하는 퍼널은 자연 상태의 지하수 흐름방향과 오염범위를 고려해서 위치와 규모가 결정되어야 한다. 물리적 차단을 유도하는 퍼널만으로는 지하수 흐름을 완전히 차단하기에는 한계가 있으므로 의도한 대로 지하수 흐름을 가속화하기 위해서 수리지질학적 고찰이 필요하다. 즉, 양수와 같이 배수장치 위치를 결정하고, 적정 용량을 설치한다면, 지하수 흐름 제어 및 확산 방지 최대 효과를 기대할 수 있다.

4. 결론

유출이 의심되는 매립장 주변에서 총 17개 지점에서 지하수 및 지표수 수질을 측정하고 수리지질학적 특성 파악을 위한 현장조사를 수행하였다. 지하수위 분포 및 오염물질 농도 분포 결과를 검토해보면, 침출수가 외부로 유출되었음을 확인하였고, 수질 유형과 함께 농도 분포를 살펴보면 더 명확한 유출 범위를 지정할 수 있었다. 유출이 의심되는 구간을 중심으로 전기비저항 탐사를 실시하여 침출수 유출 지점을 3개 지정하였다. 그리고 그 지점 주변에서, 토모그래피 탐사와 전기전도도 수직적 검층을 통해 4~17 m 구간에서 유출되는 사실을 과학적으로 제시하였다.

상기 현장 조사결과 토대로 침출수 유출과정을

개념도를 제시하였다. 차수시설은 침출수의 유출을 막기 위하여 시공하지만, 매립지 시공 또는 운영과정에서 손상받거나 변형된다면 차수능력이 저하되어 침출수의 유출경로가 될 수 있다. 특히, 지하수 배제시설의 노후화 훼손은 주변 지하수와 함께 모인 침출수의 또 다른 유출경로가 된 것으로 추정된다.

오염의 확산을 제어하기 위해서는 차수벽과 같은 물리적 억제 방법은 초기에는 수평적 흐름을 제어할 수 있지만 상류에서 주변지하수가 계속 유입되고 그 흐름이 유지된다면 차수벽 하부로 흘러나가는 수직적 흐름이 발생하기 때문에 한계가 있음을 모델링 결과로 확인하였다. 본 연구부지에서 수리지질학적 관점에서 지하수 흐름제어를 통한 관리방안을 제시하였다. 차수벽을 설치하고 지하수의 흐름을 하류방향으로 유도하기 위하여 양수정을 같이 병행하여 운영할 경우 오염확산이 억제되는 것으로 나타났다. 지하수 흐름 제어 및 오염 확산 방지를 위해서 차수벽 설치와 양수장치를 조합하여 운영한다면 최대효과를 기대할 수 있다.

우리나라는 급속한 산업 발전과 경제성장으로 인해 가정 및 사업장에서 배출되는 폐기물이 증가하고 있다. 이 폐기물들은 주로 매립에 의해 처리되고 있으며 매립장의 운영 및 관리상의 문제점, 특히 침출수의 유출과 처리의 어려움이 가장 큰 문제로 부각되고 있다. 본 연구가 매립장 침출수가 유출되었을 때 침출수 확산 방지 대책에 대한 의사 결정에 참고가 되길 바란다.

감사의 글

본 원고는 한국환경산업기술원 “지중 확산제어 시설의 설계 시공 및 운영관리 기술개발: 20210024 70005”과제의 지원을 받아 연구되었습니다.

REFERENCES

- Akinbile, C.O. and Yusoff, M.S., 2011, Environmental Impact of Leachate Pollution on Groundwater Supplies in Akure, Nigeria. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2, 81-86.
- Armeth, J.D., Milde, G., Kerndorff, H. and Schleyer, R., 1989, Waste deposit influences on groundwater quality as a tool for waste type and site selection for final storage

- quality. *The Landfill, Lecture Notes in Earth Sciences*, 20, <https://doi.org/10.1007/BFb0011276>.
- Bjerg, P.L., Rügge, K., Pedersen, J.K. and Christensen, T.H., 1995, Distribution of redox-sensitive groundwater quality parameters downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environmental Science & Technology*, 29, 1387-1394.
- Bouwer, H. and Rice, R.C., 1976, A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water resources research*, 12, 423-428.
- Cooper, H.H., Bredeheft, J.D. and Papadopoulos, I.S., 1967, Response of a finite-diameter well to an instantaneous change of water. *Water Resources Research*, 3, 263-269.
- Courcelles, B., 2015, Guidelines for Preliminary Design of Funnel-and-gate Reactive Barriers. *International Journal of Environmental Pollution and Remediation*, 3, 16-26.
- Figuerola, R.A., 1993, Methane oxidation in landfill top soils. *Proceedings Sardinia*, 93, 701-715.
- Hwang, D.G., 1998, A new approach to containment of leachate in landfills. *Korea Society of Waste Management, Proceedings of the 1998 Conference*, 51-68 (in Korean).
- Kim, G.W., Park, T.S. and Lee, H.G., 1967, Geological report of the Jecheon sheet 1:50,000. *Geological Survey of Korea* (in Korean).
- Kumar, D. and Alappat, B.J., 2005, Evaluating leachate contamination potential of landfill sites using leachate pollution index. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7, 190-197.
- Lee, D.G., Ahn, J.H., Kwon, K.W., Koo, J.K. and Bae, W.K., 2011, Evaluation of Leachate Containment by Soil-cement Walls for a Closed Landfill. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 16, 62-70 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Hwang, D.K., Yi, M.J., Choi, Y.K., Kim, J.W. and Lee, K.K., 2002, Tracer Test and Waterlevel Monitoring in a Coastal Landfill for Demonstrating a Protection Technology of Leachate Leakage. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 621-629 (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S., Choi, I.K., Mok, J.K. and Kim, J.W., 2016, An electrical resistivity survey for leachate investigation at a solid waste landfill. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 19, 59-66 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.K. and Lee, T.J., 2009, Characteristics of electrical resistivity of cylindrical cement core with respect to the conductivity and contents of pore water. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 46, 553-562 (in Korean with English abstract).
- Park, J.K., Kim, T.D., Choi, D.H. and Lee, J.Y., 2007, Evaluation of Groundwater Quality Characteristics around Uncontrolled Closed Valley Landfill. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12, 75-80 (in Korean with English abstract).
- Park, S.G., 2004, Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 7, 130-135 (in Korean with English abstract).
- Park, S.G., Cho, S.J., Park, Y.C. and Kim, J.H., 2009, Numerical simulation of electrical resistivity tomography for evaluation of CO₂ behavior in porous sandstone. *Journal of the Geological Society of Korea*, 45, 485-492 (in Korean with English abstract).
- Salem, Z., Hamouri, K., Djemaa, R. and Allia, K., 2008, Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*, 220, 108-114.
- Yi, M.J., Kim, J.H., Chung, S.H. and Suh, J.H., 2002, Three dimensional imaging of subsurface structures by resistivity tomography. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 5, 236-249 (in Korean with English abstract).
- Zhang, C., 2020, *Soil and Groundwater Remediation*. John Wiley & Sons, Inc., Chapter, 12, 386-399.

Received : October 21, 2022

Revised : November 26, 2022

Accepted : November 29, 2022