

Coprostanol을 포함한 지하수 수질분석을 통한 매립지 침출수의 지하수 침투 가능성 평가

박성열 · 김홍석 · 황경엽 · 황인성[†]
부산대학교 사회환경시스템공학부

Assessment of Leachate Intrusion to Groundwater around Landfill Area by Monitoring of Groundwater Quality

Seong-Yeol Park, Hong-Seok Kim, Kyung-Yup Hwang, and Inseong Hwang[†]

Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Possibility of leachate leakage was assessed for the area surrounding the landfill site A that had been used as an oxidation basin for night soils treatment for 19 years (1974~1992). Groundwater monitoring wells were installed in the area where leachate leakage was suspected through the investigation on the groundwater hydraulics. Water qualities of the groundwater collected from the sites were then compared with those of the landfill leachate. In the cases of general water quality parameters such as nitrogen species (NH₃-N, NO₃-N, NO₂-N, T-N), *E. Coil*, heavy metals/inorganics, and color, the concentrations observed in the monitoring wells were generally near the background levels and were much lower than those observed in the leachate. Coprostanol, one of the fecal sterols, and an indicator for the contamination by human excrements was also monitored. The coprostanol concentrations (1~2 ng/L) of the groundwater was extremely lower than those of the leachate (8,382 ng/L). A series of monitoring results and the estimations based on modeling suggest that it is not likely that the leachate leaked from the landfill.

Key words : Leakage, Leachate, Groundwater, Nitrogen species, *E. Coil*, Coprostanol, Heavy metals

1. 서 론

우리나라는 1970년대 이후 산업구조의 다양화, 급속한 도시화로 인하여 생산은 대형화 되었으며, 소비 패턴은 다양하게 되었다. 이로 말미암아 폐기물도 질적, 양적으로 증대되어 배출되고 있다^{1,2)}. 국내에서 배출된 폐기물의 처리 방식 중 가장 큰 비중을 차지해온 방식이 매립이다. 매립지는 운영과정에서 뿐만 아니라, 매립완료 이후에도 지속적으로 환경문제를 일으킬 가능성을 안고 있는데, 예를 들면 유해한 매립가스와 가스 폭발 및 악취발생, 폐기물의 분해에 따른 매립층의 부동침하, 사면의 불안정, 침출수의 발생으로 인한 주변 지표수 및 지하수의 오염 등의 문제를 꼽을 수 있다³⁾.

우리나라에서는 침출수 오염에 가장 큰 비중을 차지

하고 있는 단순매립이 1990년 이전까지 적용되어 왔으며, 1991년에 이르러서야 매립지 설치기준이 폐기물관리법으로 구체화되면서 매립지에 차수시설이 설치되기 시작하였다⁴⁾. 매립지 차수시설 관련 법규가 도입되면서 침출수의 유출로 인한 오염의 비중을 상당량 감소시킬 수 있는 차수, 복토, 처리의 기능을 갖춘 위생매립의 방식이 적용되어 운영되고 있다. 하지만 이러한 위생매립지의 경우에도 하절기에 집중적인 강우로 인하여 침출수가 과다 발생하고 침출수의 신속한 배제가 이루어지지 않는 경우, 침출수 수위의 상승, 이로 인한 매립지 내부의 환경악화가 초래될 수 있다⁵⁾. 물론 이 매립지 자체 물리적 시설의 균열이나 밀림으로 인하여 위생매립의 핵심이라고도 할 수 있는 차수막 및 차수벽 파손의 가능성도 있다고 할 수 있다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-51-510-3523, Fax: 82-51-514-9574, E-mail : ihwang@pusan.ac.kr

본 연구에서는 초기의 위생매립지 중 하나인 A 쓰레기 매립장으로 부터 침출수 유출 여부를 파악하기 위해 수행되었다. A 매립지 주변에는 국가가 지정한 주요 환경보호 구역이 존재하기 때문에 오염의 사전예방 및 효율적인 초기 대응을 위해서라도 침출수 유출 가능성을 조사할 필요가 있다. 따라서 건설현장 및 매립장 차수벽 예상지역에서 약 20~80 m 거리에 2개의 지하수 관측정을 설치하였으며, A 매립장에서 발생하는 침출수와 주변 지하수의 수질을 비교하는 방식을 이용하여 간접적으로 침출수 유출 가능성을 평가하였다. 또한 A 매립장 부지에는 매립장 건설 이전에 분뇨를 자연여과 방식으로 처리한 산화분지가 존재하고 있었으므로, 이 산화분지의 영향을 알아보기 위한 관측정 역시 추가하여 연구를 진행하였다.

침출수와 지하수의 수질 비교를 위한 지시자 역할을 수행할 수 있는 물질들을 문헌 조사를 통해 다음과 같이 선정하였다. 질소계열 물질($\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, T-N), 대장균(*E. Coli*), 중금속, 색도 등의 항목은 중요한 지하수 수질항목일 뿐만 아니라 침출수에서 높은 농도로 나타나는 물질들이므로 이들 물질을 중점적으로 조사하고 분석하여 침출수 유출 여부 또는 개연성을 확인하고자 하였다. 또한 과거 산화분지라는 특성을 감안하여 인간 등의 포유류의 장에서 존재하는 cholesterol로부터 생성되는 대표적인 fecal sterol 중 하나로서 분변성 오염의 지표인 coprostanol (5 β -cholestan-3 β -ol)을 인자로 선정하였다⁶⁾. Coprostanol은 분뇨에서 주로 발생하며 폐슬러지 및 매립지 침출수의 특성을 파악하는데도 중요하게 사용된 바 있는 물질이다^{7,8)}. 추가적으로 인근 지하수의 유향 및 유속을 측정하고 지연상수 및 생분해계수를 적용한 오염물질이동 모델링을 실시하여 실제 매립지내에서 침출수의 유출이 일어났을 경우, 유출수의 흐름과 오염물질의 농도를 예측하였다. 이를 통해서 관측정의 위치가 오염확산의 여부를 확인하기에 적절한지 검증하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 지역

부산시에 위치하는 A 매립지는 차수, 복토, 처리의 기능을 갖춘 위생매립의 방식을 적용시킨 최초의 매립지이다. 하지만 이러한 위생 매립도 집중 강우와 같은 물리적 요인에 의해 차수벽 및 차수막이 파괴되어 침출수의 유출 가능성을 가지고 있으며 이를 방지할 경

우 생태계 훼손이 우려되는 지역이므로 기초조사를 통해 침출수 유출 가능성을 파악하여 향후 주변 환경에 대한 정밀조사의 필요성을 평가할 필요가 있다.

2.2. 실험 방법

2.2.1. 지하수 수리 조사

매립장 인근 지하수의 유향 및 유속 등의 수리조사를 실시하였다. 건기와 우기를 나누어 측정하였으며 우기인 2006년 9월 14일과 2006년 9월 20일 지하수 관측정을 이용하여 유향 및 유속을 측정하였고 건기인 2006년 12월 28일 유향 및 유속을 측정하였다. 측정은 지하수 유향 및 유속 측정 장비를 이용하여 수행되었다. 이 측정 장비는 열원에서 나오는 heat pulse를 N, S, E, W에 위치하는 sensor가 감지하여 N-S 방향의 온도 차이와 E-W 방향의 온도 차이를 감지하고, 이를 벡터 합성함으로써 지하수 유동방향과 유속을 구한다. 이렇게 획득한 지하수 수리자료를 바탕으로 지하수 관측정 1~3에서 지하수의 흐름 방향과 유속을 측정하였고, 더 나아가 오염 물질의 이동 경로에 대해 추정하였다.

2.2.2. 지하수 시료 채취

2006년 8월 24일에 A 매립장 주변 지하수 관측정 설치 공사를 시행하였다. Fig. 1과 같이 침출수 유출이 의심되고 있는 가교인근에 2개 지점(MW 1, MW 2)을 선정하여 설치하였고 과거 A 매립장 지역에 존재하였던 산화분지의 영향을 알아보기 위해 산화분지로 사용되었던 부지에 1개 지점(MW 3)을 선정하여 산화분지에서 기인한 오염물의 영향을 살펴보았다. 시료채취는 베일러(Bailer)라는 시료채취기(BEC Bailer, 아름다운 환경건설(주))를 이용하여 강우시와 비강우시로 나누어 총 4회 시행하였으며 지하수 시료뿐만 아니라 침출수 시료도 동시에 채취하여 분석하였다.

MW 1의 경우, 지하 13-15 m 정도의 부분에서, MW 2의 경우 지하 2-3 m 정도의 부분에서, MW 3의 경우 지하 10-12 m 인근에서 각각 시료를 채취할 수 있었다. 관정내로 유입된 후 2시간 이상 된 물은 대기와 접촉하거나 관정 재질과 반응하여 성상이 달라질 수 있으므로 고여 있는 물은 퍼내고 새로 나온 물을 채취하였다. 시료 채취는 취수정내에 고여 있는 물의 4~5 배를 퍼낸 다음 행하였으며, 퍼내는 물의 양은 물의 pH와 비전도도를 측정하여 이 값이 평형(원래 상태의 지하수 수질로 된 시점)에 도달할 때까지로 하였다.

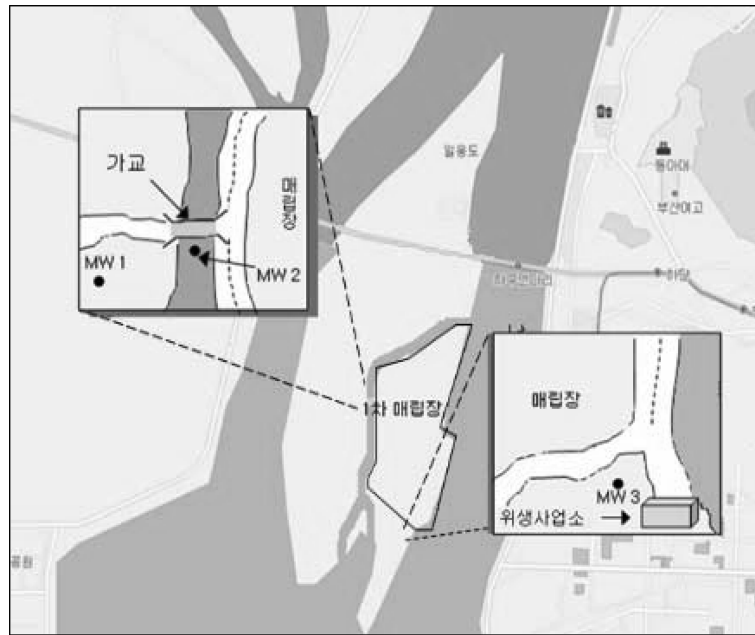


Fig. 1. Locations of monitoring wells in landfill A area.

중금속을 포함한 수질 분석 일반 항목 측정을 위한 시료는 폴리에틸렌 병(2L)에 유기오염 물질 측정을 위한 시료는 갈색 유리병(1L)에 옮겨 담았다. 시료채취 용기는 시료를 채우기 전에 시료로 3회 이상 씻은 다음 사용하였다. 부유물질 등이 함유된 시료는 시료의 균질성이 유지될 수 있도록 채취하였으며, 침전물 등이 부상하여 혼입되는 것을 방지하였다. 시료채취용기에 시료를 채울 때에는 시료의 교란을 최소화하였으며, 가능한 한 공기와의 접촉이 없도록 가득 채웠다.

2.2.3. 지하수 수질 분석

기초 문헌조사를 바탕으로 선정된 질소계열 물질, 대장균, 중금속 등 지시자 역할을 수행할 수 있는 수질 항목뿐만 아니라 BOD, COD, SS, 총인, 부유물질 등 기본수질항목을 수질오염공정시험방법에 의거하여 분석하였다.

Coprostanol의 분석을 위해 침출지에서 채취한 시료는 실험실로 이동 후 즉시 0.45 μm 막 여과지로 여과하여 여과액을 4L갈색 병에 담은 후 4°C에서 분석 시까지 보관하였다. DCM(dichloromethane), methanol, hexane은 HPLC 등급(J.T. Baker)을 사용하였으며 N,O-bis(trimethylsilyl) trifluoroacetamide(BSTFA)를 유도체로 사용하고 Zhang et al.⁷⁾의 방법을 참고하여 SPE법을 이용하여 추출하였다. Coprostanol은 DB-

5ms silica capillary column (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 mm)을 장착한 gas chromatograph-mass selective detector(Agilent 6890/5973N)을 이용하여 분석하였다⁷⁾.

2.3. 지하수 수질자료 해석 방법

지하수 및 침출수 수질자료를 해석하기 위한 기반을 마련하기 위해 문헌연구를 실시한 결과 질소계열 물질, 대장균, coprostanol, 중금속, 색도 등의 항목을 중점적으로 조사하고 분석하는 것이 바람직하다는 결과를 얻었다. 각 수질항목의 선정사유는 아래 Table 1에 나타난 바와 같다.

침출수가 유출되었을 경우, 현장의 지하수 수리학 분석결과를 바탕으로 지연상수(retardation factor)를 적용하여 간단한 모델링 작업을 수행하였으며 이 결과를 현장에서 측정된 오염물질 농도와 비교하여 침출수 유출 여부 판단의 자료로서 사용하였다. 지연상수는 식 (1)을 이용하여 계산하였다¹⁶⁾.

$$R = 1 + \frac{K_d \rho_s (1 - \theta)}{\theta} \quad (1)$$

위 식에서 R은 지연상수이고 K_d 는 각 오염물질의 분배계수(distribution coefficient), ρ_s 는 토양의 밀도이며 θ 는 공극률을 나타낸다. ρ_s 와 θ 값은 국내 토양의 대표

Table 1. Major groundwater quality parameters

항목	중요성
질소계열물질	매립장이 혐기성일 경우 질소계열 물질 중 암모니아성질소가 대부분을 차지한다. 또한 암모니아성질소는 질산화로 인하여 아질산성질소, 질산성질소가 된다. 이러한 질소계열 물질의 특성 및 질산화 정도를 파악하여 수질평가가 가능하다 ¹¹⁾ .
대장균	A 매립장 부지의 상당 부분이 과거에 분뇨처리시설로 사용된 바 있어 지하수내 대장균 관련 자료의 해석에 주의를 요한다. 침출수에서 유래한 대장균과 분뇨에서 유래한 대장균을 구별할 수 있는 지표로 '대장균(<i>Escherichia Coli</i>)'을 선정하였다. '대장균군' 보다는 '대장균'이 분원성 오염에 대한 특이성이 가장 높아 분원성 오염물질의 직접적인 지표로 사용되는 경우가 많다 ¹²⁾ .
Coprostanol (수계 분변성 오염의 지표)	대장균(<i>E. Coli</i>) 개체수가 사업폐기물의 독성, 세계 등의 살균작용으로 인해 변화할 때에도 하수에 포함되어 있는 분변성 오염의 지표로 사용할 수 있는 coprostanol와 같은 분자 지시자(molecular marker)가 많이 사용되고 있다. ¹³⁾
중금속	침출수에서 대부분의 중금속은 불검출 되거나 시간이 지남에 따라 감소하지만 Fe, Mn, Zn은 농도가 높게 나타난다 ¹⁴⁾ .
색도	색도는 휴믹물질과 같은 유기물과 철, 망간과 같은 중금속이 존재할 경우 발생하는 것으로 알려져 있다 ¹⁵⁾ .

값인 2와 0.48을 각각 사용하였으며, 각 오염물질의 분산계수와 이를 이용한 지연계수 값을 계산하여 모델링을 통한 오염물질의 예측농도와 현장 실측치를 구하여 비교분석하였다. 질산성 질소 등의 이온물질의 경우 몇몇 실험 등에서 분산계수가 보고되고는 있으나¹⁷⁾ 실질적으로는 큰 의미가 없다고 판단된다.

3. 실험 결과

3.1. 지하수 수리학

3.1.1. 지하수 관측정 1(MW 1)에서의 유향 및 유속 측정자료

1차 지하수 유향 및 유속 측정은 우기인 2006년 9월

14일 12시와 14시에 각각 2회 측정하였으며 2차 측정은 건기인 2006년 12월 28일에 실시하였다. Table 2와 같이 MW 1에서 1차 측정 시 지하수는 각 심도별로 차이는 있었지만 평균적으로 16.7 m/day의 속도로 흐르고 있음을 알 수 있었으며, 2차 지하수 유속은 1차 측정 결과와는 달리 심도별 차이가 크지 않았고 평균적으로 15.6 m/day로 흐르고 있음을 알 수 있었다. 이것은 국내 지하수의 평균 유속이 1 m/day임(한국원자력 안전기술원) 감안할 때 매우 빠른 편인데 해당 지역이 sand 위주의 지층으로 이루어진 강 하구의 삼각주 주변이기 때문에 그 영향을 크게 받은 것으로 판단된다. 또한 유향은 매립지에서 주변의 강으로 향하는 서남서 방향임을 확인할 수 있었다.

Table 2. Groundwater flow directions and velocities

구분	측정심도 (m)	유향(Degree, °)	유속 (m/day)	비고
MW 1	5.0	255.4	9.73	2006년 09월 14일 (강우시)
	10.0	239.8	28.38	
	13.5	283.1	13.61	
MW 2	5.0	250.2	15.51	2006년 12월 28일 (비강우시)
	7.0	250.2	15.64	
	4.0	239.0	10.68	
MW 3	5.0	258.2	13.46	2006년 09월 14일
	6.0	282.1	12.95	
	5.0	315.1	7.56	
MW 3	5.0	294.0	10.61	2006년 12월 28일
	7.0	288.6	12.87	
	9.0	288.9	16.31	
	5.0	327.1	13.69	
	7.0	343.0	12.86	

※ 유향은 북쪽(N)을 기준으로 시계방향

3.1.2. 지하수 관측정 2(MW 2)에서의 유향 및 유속 측정자료

MW 2에서의 1차 측정 시 지하수 유속은 심도별로 큰 변화는 없었으며, 평균 유속 12.4 m/day로 흐르고 있음을 알 수 있었다. 건기인 2차 지하수 유속은 7.6 m/day로 흐르고 있음을 알 수 있었다. 지하수 MW 2 또한 지하수 MW 1과 같이 지하수 유속이 비교적 빠름을 알 수 있었고 건기일 때보다는 우기일 때 유속이 빠름을 확인 할 수 있었다. 유향은 지하수 MW 1과 같이 인근 강으로 향하는 서남서 방향으로 흐르고 있음을 Table 2를 통해 확인할 수 있다. 따라서 MW 1과 MW 2에서 관측된 지하수 유속의 평균인 14.6 m/day를 가교인근 지하수의 평균 유속이라고 가정하고 침출수 유출시 관측정까지 도달하는데 걸리는 시간은 MW 2의 경우 약 1.4일, MW 1의 경우 약 5일의 시간이 소요됨을 추정해 볼 수 있다. 그리고 한 달 정도 시간이 경과하면 남쪽인 바다로 흘러들어 갈 것이라고 예측할 수 있다. 또한 관측정 1, 2의 유향과 유속으로 볼 때 매립지에서 침출수 유출이 일어날 경우 바로 감지가 가능할 것으로 예측되었다.

3.1.3. 지하수 관측정 3(MW 3)에서의 유향 및 유속 측정자료

MW 3에서의 유속 또한 심도별 유속 변화가 적었고 평균 유속은 MW 2보다는 조금 빠른 13.3 m/day로 나타났다. 또한 건기인 2006년 12월 28일 2차 지하수 유속은 평균유속이 13.3 m/day로 MW 1, 2와는 달리 건기와 우기의 차이가 없었다. 또한 유향은 MW 1, 2와는 달리 북서쪽으로 지하수가 흐르고 있음을 Table

2를 통해 알 수 있었는데 이 방향은 바다가 있는 남쪽 보다는 약간 북쪽으로 치우쳐 흐르고 있음을 의미한다.

3.2. 지하수 및 침출수 수질

3.2.1. 질소계열 물질

총 4회에 걸쳐 측정된 지하수 및 침출수의 질소계열 물질을 분석한 평균값을 Fig. 2에 나타내었다. 지하수 관측정 1~3에서의 암모니아성 질소의 농도가 침출수의 암모니아성 질소 농도보다 현저히 낮음을 알 수 있었다. 그리고 MW 1과 3의 암모니아성 질소의 경우 대체로 먹는물 수질기준(0.5 mg/L)을 약간 상회하는 양호한 수질을 가지고 있음을 알 수 있었다. MW 2에서의 암모니아성 질소 농도가 다소 높은 18~28 mg/L 정도로 나타났는데, 질산성 질소의 먹는물 수질기준이 10 mg/L인 점을 고려하면 비교적 나쁜 수질이라고 판단된다. 하지만 침출수에서의 농도와 100배 이상 차이가 있으며 지역자치단체가 측정한 매립지 인근 하천등 주변지역의 오염물질 분석자료와 비교한 결과 비슷한 농도분포를 보이고 있었으므로 전반적으로 침출수의 영향이 존재한다고 결론 내리기는 힘들다고 판단된다. 해당 자료가 없는 coprostanol을 제외한 나머지 오염물질들의 비교결과 역시 전반적으로 비슷한 경향을 보이고 있었다.

3.2.2. 대장균

총대장균군, 분원성 대장균군, 대장균을 Table 3을 통해 살펴보면 먼저 총대장균군은 전반적으로 MW 3 (230/100~200/100 mL)과 침출수(480/100~300/100 mL)에서만 검출되었는데 이 농도 범위는 지하수 수질기준

Table 3. Water quality of groundwater and leachate (Biological Indices)

	구분	MW 1 (mL)	MW 2 (mL)	MW 3 (mL)	침출수 (mL)
1차	총대장균군	검출	검출	검출	검출
	분원성대장균군	불검출	불검출	검출	불검출
	대장균	불검출	불검출	검출	검출
2차	총대장균군	불검출	불검출	230/100	480/100
	분원성대장균군	불검출	불검출	30/100	불검출
	대장균	불검출	불검출	불검출	불검출
3차	총대장균군	불검출	불검출	200/100	300/100
	분원성대장균군	불검출	불검출	25/100	불검출
	대장균	불검출	불검출	불검출	불검출
4차	총대장균군	불검출	불검출	불검출	31/100
	분원성대장균군	불검출	불검출	불검출	불검출
	대장균	불검출	불검출	불검출	불검출

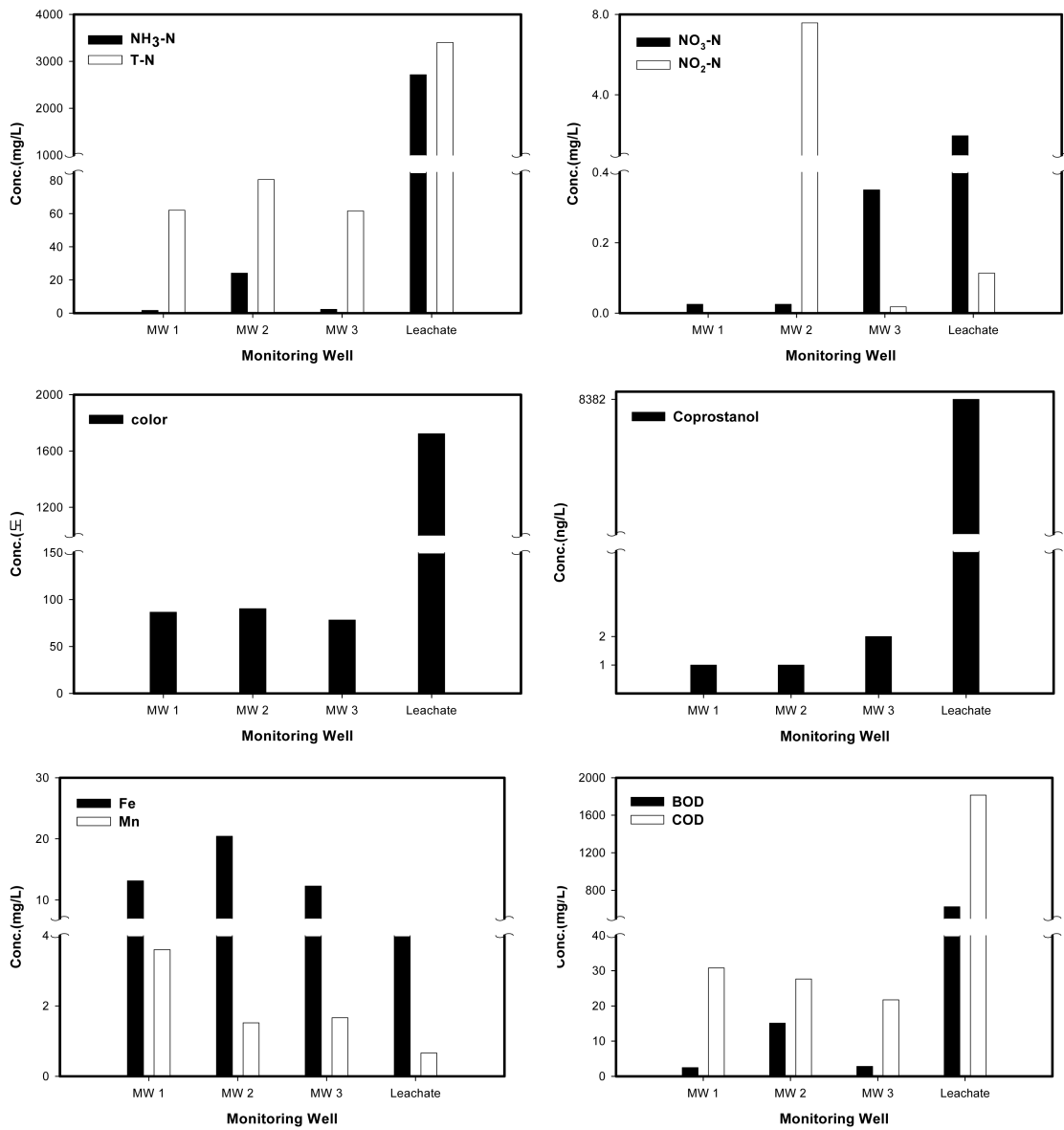


Fig. 2. Comparison of water quality of groundwater and leachate from a landfill site (NH₃-N, NO₃-N, NO₂-N, T-N, coprostanol, color, heavy metals (Fe and Mn), BOD and COD).

중 생활용수 수질기준(5,000/100 mL)보다 현저히 낮음을 알 수 있었다. 그리고 대장균과 분원성 대장균 자료를 보면 A 쓰레기 매립장 가교인근 지점인 MW 1, 2 지역은 매립지와 과거 산화분지의 영향을 많이 받고 있지 않는 것을 알 수 있었다. 이는 산화분지에서 유래한 오염물이 상당 부분 자연정화 되었다고 볼 수 있겠다. 또한 MW 1, 2에서 총대장균군이 검출되었는데 총대장균군은 분변과 일반 환경에서도 빈번히 발견되며, 양질의 먹은물이나 오염되지 않은 토양 및 물에서도 발견

되므로 총대장균군이 검출되었다는 것만으로 침출수가 유출되었다는 유추를 하기는 힘들다.

3.2.3. Coprostanol(수계 분변성 오염의 지표)

분변성 오염의 지표인 coprostanol은 Fig. 2와 같이 침출수의 경우 8,382 ng/L로 나타났다. 이 수치는 매립이 종료된지 10년이 지난 중국의 한 매립지에서의 농도(5,450 ng/L)⁷⁾와 비교할 수 있는데 A 매립지의 경우 매립이 종료된지 약 15년이 지났음에도 불구하고 높은

수치를 보이는 것을 볼 때 산화분지의 영향이 있었으므로 예상할 수 있다. 반면에 MW 1~3에서는 1~2 ng/L로 매우 낮은 수치로 검출되었음을 알 수 있었다. MW 1~3에서 검출된 coprostanol의 농도 범위는 진해만의 농도 0.2~26.3 ng/L, 한강하구 1.~21.1 ng/L, 울산만 0.95~56.3 ng/L과 비교해 보았을 때 매우 낮은 수치를 보이고 있음을 알 수 있다.⁸⁾ 그 때문에 침출수의 유출 가능성이 적다는 점을 예측할 수 있으나 coprostanol의 경우 log K_{ow} 값이 8.82로 소수성이 상당히 크기 때문에 지하 대수층을 이동하면서 대수층내 물질에 흡착될 가능성이 크다. 본 연구에서는 대수층 조건에 대한 정보 및 흡착특성에 대한 자료가 부족하기 때문에 coprostanol이 유출되어 토양에 흡착제거 되었는지 침출수의 유출이 일어나지 않았는지에 대한 명확한 평가를 위해서는 추가적인 조사 및 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2.4. 중금속 및 무기물질

중금속 및 무기물질 중 Hg, Cu, CN¹⁻은 검출되지 않았으며, Zn은 0~0.705 mg/L 범위로 검출되었고, As는 0~0.454 mg/L 범위로 검출되었는데 이 농도 범위는 먹는물 수질기준 (Zn: 1.0 mg/L, As: 0.5 mg/L) 이하이므로 현장 및 침출수의 중금속 및 무기물질의 오염은 그다지 심하지 않은 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 2와 같이 중금속 중 Fe, Mn의 경우는 침출수내 농도를 상회하는 수준으로 비교적 높은 농도로 지하수에서 검출되는 경우가 많았다. 이는 침출수의 영향을 배제할 수는 없지만 부지 내 토양이나 철제로 만들어진 가교공사 중 일시적으로 발생한 폐기물 등과 같은 비점오염원의 영향을 받았을 가능성이 더 크다고 할 수 있다. 또한 인근 지역인 낙동강 하구지역이나 영산강 지하수 시료(Fe: 4~12 mg/L, Mn: 3~6 mg/L)에서 발생하는 농도 범위와 비슷하다는 것을 알 수 있었다. 추가적인 연구가 수행될 경우에는 soil extraction을 통한 분석이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

3.2.5. 색도

색도의 경우 지하수의 색도가 전반적으로 먹는물 수질기준(5도 이하)을 상회하는 수준으로 나타났지만 침출수의 색도에 비해 현저히 낮음을 Fig. 2를 통해 알 수 있었다. 지하수 시료의 MW 2에서의 색도가 높게 나타난 것은 침출수의 유출에 의한 것도 배제할 수 없지만 철제로 된 가교의 영향으로 일시적으로 중금속중

색도 유발 물질인 Fe의 농도가 높아진 것에 기인했을 가능성도 배제할 수 없다. 또한 지하수 시료 내 색도의 평균 농도의 범위가 영산강 지역의 취수정 지하수 시료 내에서도 흔히 볼 수 있는 농도 범위(80~150도)이므로 침출수의 영향이라고 단정 지을 수는 없었다.⁹⁾

3.2.6. 유기물 농도

지하수내 유기물 농도(BOD, COD)는 침출수 배출허용기준(BOD: 70 mg/L, COD: 800 mg/L) 및 침출수의 농도와 비교했을 때 현저히 낮음을 Fig. 2를 통해 알 수 있었다. 하지만 A 쓰레기 매립장 가교인근 지역인 MW 1, 2에서 BOD와 COD의 농도가 비교적 높은 값을 보여주고 있는데 토양유기물로부터 이런 정도의 농도가 유래할 수 있는지에 대한 자료의 부족으로 확인할 수는 없었다. 낙동강 퇴적물 내 유기물 농도가 COD 기준으로 수만 mg/kg에 육박하는 것을 고려하면 토양자체에 존재하는 유기물에서 기인할 가능성도 무시할 수 없다고 판단된다. 따라서 MW 1~3에서의 BOD, COD의 농도로는 침출수의 영향 여부를 직접적으로 확인하기는 힘들었다.

3.3. 지하수 수질 변화 추이

3.3.1. 시간에 따른 변화

시간에 따른 각 수질항목의 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 약 2개월여의 비교적 짧은 시간 동안이지만 시간에 따른 수질변화의 추이를 살펴보았다. COD와 NH₃-N의 경우 시간에 따라 전반적으로 그 농도가 증가하는 경향을 보여주었으며, Mn의 경우 전반적으로 감소하는 추세를 보였으며, 색도 및 BOD는 오르내리는 경향으로 존재하여 뚜렷한 경향을 파악하기는 힘들었다. 즉, 시간에 따라 수질이 개선되거나 악화되는 경향을 파악하기 힘들었으며, T-N의 경우는 급격한 농도 변화도 보여 시료채취 시 또는 분석 시 오차가 유발되었을 가능성도 존재한다고 할 수 있겠다.

3.3.2. 강우에 의한 변화

강우가 지하수질에 미치는 영향을 알아보기 위해 1차 시료채취는 시료채취일로부터 20일 이내에 1mm의 강우를 나타낸 경우와 4차 시료채취는 7일 이내에 2mm의 강우를 나타낸 경우에 시료채취를 실시하여 비강우시 자료로 처리하였다. 2, 3차 시료채취는 각각 11mm, 13.5mm의 강우사상이 있은 후 3일 뒤에 실시하였다. 비강우시와 강우시 수질자료의 평균값을 각각

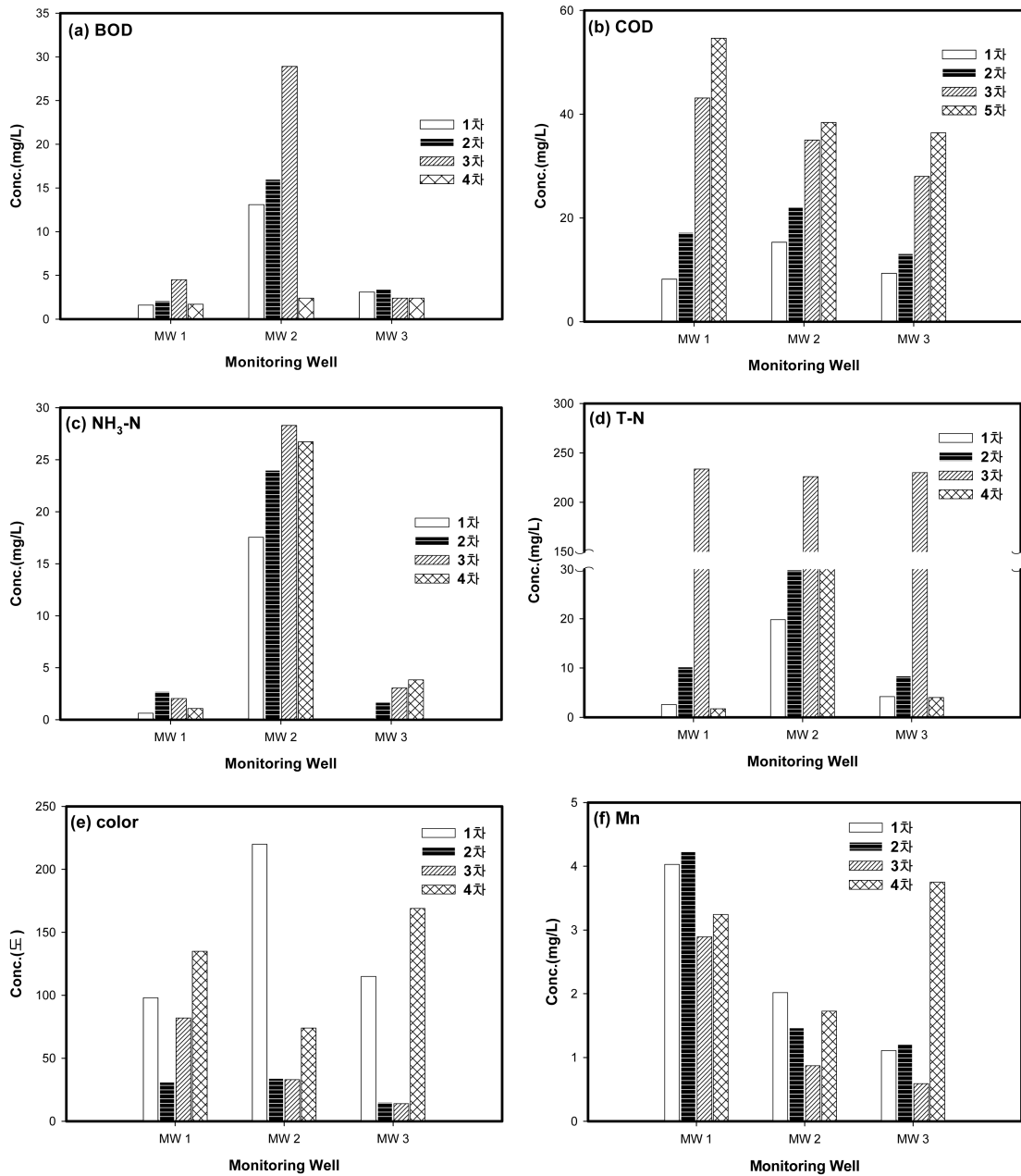


Fig. 3. The effect of sampling times on various water quality factors (NH₃-N, T-N, color, heavy metal (Mn), BOD and COD).

취하여 Fig. 4에 나타내었다.

먼저 BOD, NH₃-N, T-N 항목은 비강우시보다 강우시에 농도가 높게 나타나고 있음을 Fig. 4를 통해 알 수 있었다. 또한 Fig. 4를 통해 알 수 있듯이 색도, Fe, Mn 항목은 반대로 비강우시에 높게 나타났다. 나머지 수질 항목들의 농도 변화는 강우와 비강우 때 별

차이가 없음을 확인 할 수 있었다. 우리나라는 대부분의 강우가 여름에 집중되는데 강우량이 적은 가을과 겨울에 시료 채취 및 분석을 실시하여 현 자료를 이용해서는 강우량 변화에 따른 지하수질의 변화를 정확히 파악하기는 힘들었다.

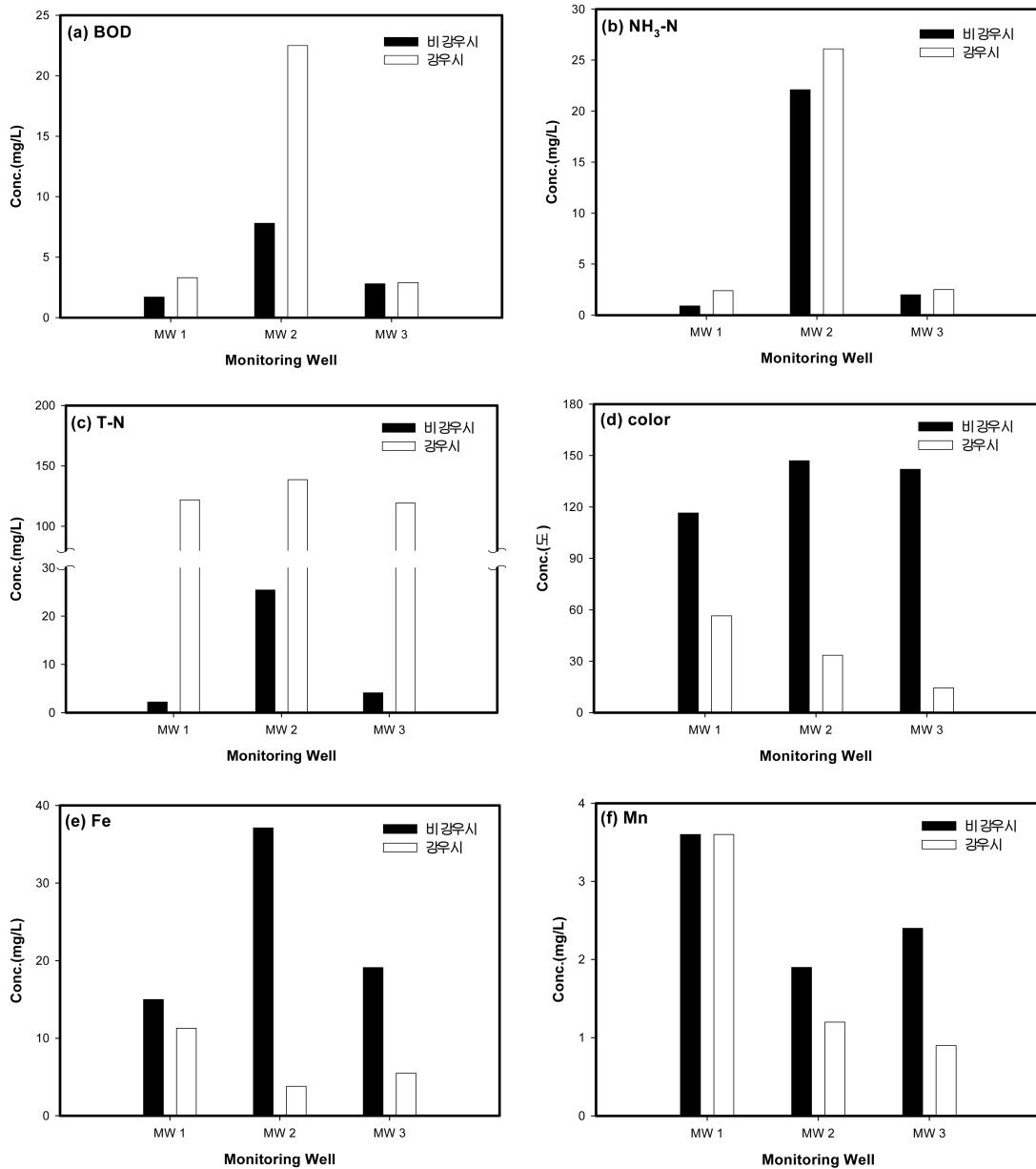


Fig. 4. The effect of rainfall event on various water quality factors (NH₃-N, T-N, color, heavy metals (Fe and Mn) and BOD).

3.3.3. 지연상수를 이용한 모델링 결과

앞선 연구방법에서 제시한대로 기 수집한 수리학적 지하수 데이터와 각 오염물질의 지연상수를 이용한 모델링을 통하여 보다 정밀하게 오염물질의 이동을 예측하였으며 지하수내 생분해속도상수를 가정하여 침출수가 유출되어 관측정 1, 2까지 이동하면서 1차반응에 의해서 분해되었을 경우를 가정한 최종농도를 예측치로

설정하고 관측정 1, 2에서 실제 측정한 평균농도를 실측치로 설정하여 각각 농도를 비교하였다. 각 오염물질의 분산계수(K_d)값과 이를 이용한 지연상수(R)를 구하였으며¹⁶⁻¹⁸⁾, 이를 지하수 속도에 적용하여 실질적인 오염물질의 이동속도를 예측하였다. Coprostanol의 경우 $\log K_{ow}$ 값 8.82와 Lyman 등이 제시한 식²¹⁾을 이용하여 K_d 를 예측하였다. 또한 오염물질의 농도변화를 예측

Table 4. Modeling results based on distribution coefficient (K_d), retardation factor (R) and biodegradation coefficient of various contaminants

오염물질	분배계수 K_d (L/kg)	지연상수 R	평균 도달시간(d)	생분해계수	오염농도 (예측치)	오염농도 (실측치)
질산성 질소	0	2.1	2.4	0.2	2.1 mg/L	0.04 mg/L
중금속(Mn)	3~30	7.2~63	42	-	4 mg/L	16 mg/L
대장균	1~10	1.5~22	14	0.075	140/100 mL	불검출
Coprostanol	1,415	3,067	3,571	0.001	236 ng/L	1 ng/L

하기위해 일반적으로 지하수 환경에서 적용되는 1차분해 속도상수를 적용하였는데 현장에서는 인위적인 정화공정을 수행하지 않았으므로 지하수내 미생물에 의한 오염물질의 분해만을 가정하였다. 질산성질소의 경우 0.2 d^{-1} 를 적용하였으며¹⁹⁾ 중금속은 생분해되지 않으며 coprostanol의 경우 lab-scale에서 실험한 결과²⁰⁾를 참고하여 생분해속도를 약 0.001 d^{-1} 이라고 가정하였다. 대장균의 경우는 약 0.075 d^{-1} 의 토착미생물에 의한 분해가 보고 된 바 있으므로 이 값을 사용하였다¹⁶⁾. 각각 위와 같은 값들을 적용한 후 모델링하여 예측한 오염물질의 농도와 실측치를 Table 4에 나타내었다.

중금속의 경우 앞서 언급했듯이 다른 요인에 의해 관측정에서의 농도가 더 높게 나왔으므로 모델링 결과가 중요하지 않은 것으로 판단된다. Coprostanol의 경우, 지연상수(R)가 상당히 크게 나타났기 때문에 가정한 생분해속도 상수에 민감하게 반응하여 모델링값이 큰 의미를 가지지 않는다고 판단된다. 하지만 그 외 질산성 질소, 대장균의 경우 모델링 결과 유출을 가정했을 경우 관측정에서 예상되는 농도가 실측농도보다 상당히 높은 것을 볼 수 있다. 이는 역시 침출수의 유출가능성이 낮음을 간접적으로 뒷받침할 수 있는 결과라고 판단되며 향후 보다 명확한 규명을 위한 추가적인 조사가 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

본 조사연구 사업에서는 침출수 유출이 의심되는 매립장내 가교 인근 지역에 2개, 매립장 건설 이전에 분뇨를 자연여과 방식으로 처리한 산화분지 지역에 1개의 지하수 관측정을 설치하여 인근 지역 지하수 흐름을 파악하고 지하수 수질 조사를 통하여 매립지 침출수 유출의 개연성을 파악하고자 하였다.

1) 지하수 흐름에 대한 조사결과 가교인근의 지하수는 인근 강을 향하는 서남서 방향으로 비교적 빠른 10

m/day 이상의 유속으로 흐르고 있는 것으로 나타나 침출수가 유출되었을 경우 MW 1과 2에서 비교적 빠른 시간에 감지할 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 매립장의 남쪽에 위치한 MW 3의 경우에는 흐름이 강 및 바다에서 멀어지는 북서향으로 나타났다.

2) 지하수와 침출수의 수질 비교를 위해 선정했던 물질들 중 질소계열물질, 총대장균군, 분원성 대장균군, 대장균, 중금속 (Hg, Cu, Zn, As, CN^{-1}) 등 대부분의 물질의 농도는 지하수에서의 농도가 침출수에 비해 현저하게 낮은 것을 확인할 수 있었으며 이는 A 매립지의 침출수 유출 가능성이 낮다는 사실을 뒷받침하고 있다. 다만 유기물 농도 (BOD 및 COD), 색도 및 일부 중금속 (Fe, Mn)의 경우 먹는물 수질기준을 상회하는 경우가 있었으나 이는 침출수의 영향이라기 보다 주변지역의 토양이나 비점오염원이 원인일 가능성이 더 크다고 판단된다. 또한 매립지 주변 하천 등을 대상으로 하여 해당 지역자치단체의 조사결과와 비교하여보아도 비슷한 농도를 보이는 것으로 나타났으므로 매립지에서의 누출 가능성은 적다고 판단된다.

3) 침출수 내에 존재하는 분변성 오염의 지표인 coprostanol의 분석 및 비교 결과, 이전에 있었던 산화분지의 영향으로 매립지 내 침출수에서의 coprostanol 농도는 일반 매립지에 비해 약 2배 높은 것으로 나타났다. 매립지 주변 관정에서의 coprostanol 농도는 극히 낮은 것으로 나타났으므로 유출가능성을 낮다고 볼 수 있으나 coprostanol의 큰 소수성에 의한 대수층환경에서의 흡착을 고려할 경우, 명확한 판단을 위해서는 추가적인 조사 및 연구가 필요하다고 판단된다.

4) 2개월여 간 관찰한 지하수질의 변화를 살펴보면 시간이 경과함에 따라 수질이 개선되거나 악화되는 경향을 파악할 수 없었다. 그리고 11~13 mm의 비교적 작은 강우였지만 강우에 의한 침출수 및 지하수량의 변화가 수질에 미치는 영향도 뚜렷하게 발견되지 않았다. 또한 지연상수 및 생분해계수를 적용한 모델링 결과 역시 예측치와 실측치가 큰 차이를 보이는 것으로 보

아 이 역시 침출수의 유출가능성이 낮음을 간접적으로 뒷받침할 수 있는 결과라고 판단된다. 본 연구에서 제시한 조사기술은 대수층내의 추가적인 조사 등이 동반될 경우, 매립지 침출수의 유출여부를 가늠할 수 있는 효율적인 선행연구가 될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 부산지역환경기술개발센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었음.(06-2-70-76)

참고문헌

1. 윤오섭, *한국환경위생학회*, **1992**, 18, 58-62.
2. 정원문, 이창균, 노현웅, 임봉수, *한국물환경학회추계학술발표회논문집*, **2000**, 327-330.
3. 구자공, 윤석표, *한국지반공학회지반환경매립에관한학술발표회논문집*, **1993**, 28-44.
4. 이근상, *한국폐기물학회*, **2005**, 22, 372-380.
5. 신광식, 박영주, 배우근, *한국폐기물학회추계학술연구회발표논문집*, **2004**, 434-437
6. 최민규, 최희구, 김상수, 문효방, *한국환경과학회지*, **2005**, 14, 23-32.
7. Zhang, C, Wang, Y. and Qi, S., *Journal of Chromatography B*, **2008**, 874, 1-6.
8. Pratt, C., Warnken, J., Leeming, R, Arthur, M.J. and Grice, D.I., *Organic Geochemistry*, **2008**, 39, 353-369.
9. 최민규, 문효방, 김상수, 이윤, *한국환경과학회지*, **2005**, 14, 481-490.
10. 박희열, 김형수, *한국자원공학회지*, **2001**, 38, 13-26.
11. 양승태, 차상덕, *대한환경공학회지*, **1998**, 20, 736-744.
12. Darren, D.S., Joo, H.T. and Koh, M.T., *Water Reseach*, **2006**, 37, 3452-3462.
13. Andrew, D., Eaton Lenore, S. and Clesceri Arnols, E., **1995**, Greenberg Standard Methods, 19th ed, 9221B-9230A, Clesceri, L., Greenberg, A. and Eaton, A., APHA, Washington, DC., USA.
14. Elhmmali, M. M., Roberts, D. J. and Evershed, R. P., *Environmental Science & Technology*, **2000**, 34, 39-46.
15. Dimitra, R.C. and Carmela, V., *Engineering Geology*, **2006**, 85, 111-121.
16. Michael D. LaGrega, Phillip L. Buckingham, Jeffrey C. Evans, **2001**, *Hazardous Waste Management*, 2nd ed, 1116~1126, McGraw-Hill Higher Education, USA.
17. Cantrell, K. J., Serne, R. J., and Last, G. V., **2003**, *Hanford Contaminant Distribution Coefficient Database and Users Guide*, PNNL-13895 Rev.1, Department of Energy, USA.
18. Mudge, S. M. and Ball, A. S. **2006**, *Sewage In: Environmental Forensics: A Contaminant Specific Approach* Eds. Morrison, R. and Murphy, B. Elsevier, pp533.
19. 권오열, 김영철, 박승조, 서명교, 서정호, 신현무, 이시진, 이재영, 전항배 공역, **1999**, 환경모델링, 초판, 528~548, 동일출판사, 대한민국.
20. Pratt, C., Warnken, J., Leeming, R., Arthur M. J., and Grice, D. I., *Organic Geochemistry*, 2008, 39, 353-369.
21. Lyman, W. J., Reμ, W. F. and Rosenbaltt, D. H., **1994**, *Handbook of Chemical Property Estimation of Methods*, American Chemical Society, Washington, DC.