

광주광역시 풍암매립지 주변 하상퇴적물과 물의 지구화학적 특성

안건상^{1,*} · 박천영² · 신인현¹ · 배종필¹

¹조선대학교 사범대학 지구과학과, 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

²조선대학교 공과대학 자원공학과, 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

Geochemical Characteristics of Stream Sediments and Waters around the Pungam Landfill in Gwangju City, Korea

Kun-Sang Ahn^{1,*} · Cheon-Young Park² · In Hyun Shin¹ · Jong-Phill Bae¹

¹Department of Earth Science, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

²Department of Resource Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Abstract: This study was carried out to evaluate geochemical properties for stream sediments, surrounding soils, sludge collected in the drainage pipe of leachate and waters (stream water, groundwater, leachate) around the Pungam Landfill in Gwangju city. The stream sediments don't show any systematic trend of contents from upstream to downstream. The most enriched major element in the stream sediments is Fe (up to 7.08wt.% in GJ-23). Though stream sediment GJ-23 and GJ-34 were enriched by some heavy metals (eg. As, Cu, Zn), they do not constitute serious problems for environment consideration. The concentration of Fe (35.1wt.%) and As (38ppm) are significantly high in the GJ-8, which is soil specimen adjacent to leachate reservoir. The sludge (GJ-7) shows very high concentrations of As, Mn, Cr, Pb. In particular, the Cr content is 45.6 ppm, which exceeds the permitted level. The leachate is characterized by high TDS (2210-2470mg/L) and high electric conductivity (468, 530ms/cm), and enriched in both cation (Na, K) and anion (HCO₃). The leachate (PK-3) had a relatively high concentration of Cl, and is plotted in Na-Cl type on the Piper's diagram. The NO₃-N of the groundwater and stream water exceeded the permitted levels for drinking water.

Keywords: stream sediment, soil, sludge, leachate, groundwater, Pungam Landfill

요약: 광주광역시의 풍암매립지 주변에 분포하는 하상퇴적물, 주변토양, 침출수의 배수관 내에서 채취한 슬러지 그리고 물(하천수, 침출수, 지하수)의 지구화학적 특성을 연구하였다. 하상퇴적물에서 상류에서 하류 쪽으로 규칙적인 함량 변화는 나타나지 않는다. 하상퇴적물에서 가장 풍부하게 산출되는 주원소는 Fe(7.08wt.%)이다. 하상퇴적물 GJ-23, 34는 중금속을 다량으로 포함하고 있지만, 심각한 환경 피해를 일으킬 수 있는 농도는 아니다. 주변 토양 중에서 침출수 저장고와 인접한 토양(GJ-8)에서의 철 함량은 35.1wt.%, 비소 함량은 38.8 ppm으로 가장 높다. 침출수구에서 채취한 슬러지 시료 GJ-7의 Cr함량은 45.6ppm으로 토양오염 우려기준을 훨씬 초과한다. 침출수는 총용존물질(2210, 2470mg/L)과 전기전도도(468, 530ms/cm)가 높고, 양이온에서 Na, K가, 음이온에서 HCO₃가 우세하다. 침출수인 PK-3은 Cl함량이 비교적 높아 파이퍼도에서 Na-Cl형 영역에 점시된다. 지하수와 하천수는 질산성질소의 함량이 음용수 기준을 훨씬 넘어서 식수로 사용하기에는 부적절한 것으로 나타났다.

주요어: 하상퇴적물, 토양, 슬러지, 침출수, 지하수, 풍암매립지

서론

현재 국내에서는 대부분의 폐기물이 매립에 의해

처리되고 있으며, 매립지 확보가 어려운 경우에 토지 이용 상황이나 처분장의 주변환경 등에 따라 산간계곡에 매립하기도 한다(배재근과 오종민, 1995). 침출수의 집수 시설이 취약하거나 특별한 차수시설이 없는 불량매립지의 경우 매립지 하부로 유출되는 침출수는 주변의 토양, 지표수 및 지하수를 오염시킬 수 있다(Wadleigh, 1968). 외국의 경우 독일을 비롯한

*Corresponding author: aksahn@chosun.ac.kr

Tel: 82-62-230-7348

Fax: 82-62-230-8122

선진국에서는 폐기물 매립지역 지하수에서의 오염체 이동에 관한 연구(Kemdroff *et al.*, 1992; Nicholson *et al.*, 1983)와 토양오염에 관한 연구(Yong *et al.*, 1992)가 수행되었다. 국내에서도 난지도 폐기물 매립지를 비롯한, 청주지역의 매립지(한국자원연구소, 1995), 대전지역의 매립지(김경웅과 손호웅, 1994)와 광주 일곡매립지(차종문 외, 1999)에 대한 연구가 수행되었다.

국내에서 지금까지의 매립지 지역에서의 환경연구는 물리탐사(이기화 외, 1996; 권병두 외, 1998)와 주변 지하수 오염에 관한 연구(장연수와 이광열, 1994; 정상용, 1995; 오석영과 전효택, 1996; 이철효와 한정상, 1996; 정상용 외, 1997; 정상용과 이강근, 1998)가 주류를 이루고 있으며, 매립지의 중간복토재와 차수제로 사용되었던 토양과 퇴적물 혹은 매립지 주변의 농경지 토양의 중금속오염에 관한 연구(김경웅과 손호웅, 1994; 정하익과 김상근, 2000; 김동우 외, 2001; 이평구 외, 2001)는 상대적으로 미흡한 실정이다.

광주광역시 서구 풍암동에는 월드컵축경기장과 이웃하여 매립이 종료된 쓰레기 매립지가 있으며, 이 매립지를 사이에 두고 대규모 아파트 단지가 건설되었다. 현재 매립지는 농지조성사업이 이루어졌고, 매립지 복토 위에는 각종 작물이 시험 재배되고 있다. 연구를 시작할 1999년 당시에는 매립지 주변에 작은 개천이 흐르고, 이 개천은 지류로 나누어 농경지를 통과하기도 하면서 하류인 풍암저수지에 이르렀다. 풍암매립지 주변에서 시작하여 풍암저수지에 이르는 지류에는 황갈색침전물이 다량 관찰되고, 농경지를 통과하는 지류나 저습지에는 기름 때가 흔히 관찰된다. 그러나 2001년도 말에 완공된 월드컵경기장의 주차장 공사로 대부분의 수계가 변경되거나 메워졌다. 이 연구는 매립 종료된 쓰레기매립지 주변을 흐르는 하상퇴적물의 지구화학적 특성을 주변토양 및 침출수 관 내의 슬러지와 비교하여 밝히고, 또한 매립지 침출수에 의한 주변의 지표수 및 지하수의 오염상태를 파악하는데 목적이 있다. 이 연구결과는 침출수가 매립지 주변의 하상퇴적물과 수계에 미치는 영향을 평가할 수 있는 자료가 될 것이다.

매립지와 주변환경

광주광역시 풍암매립지는 위생매립지로서 1991년 7월1일부터 생활쓰레기를 매립하기 시작하여

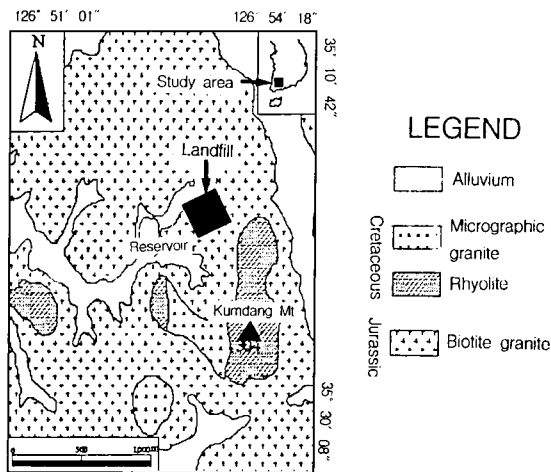


Fig. 1. Geological map around the Pungam Landfill in Gwangju city.

1994년 12월 30일까지 매립되었으며, 매립지 전체 면적은 85,835m²(25,965평), 매립면적은 82,000m²(24,805평), 매립량은 580,000m³(300,000ton), 매립고는 평균 7.0m정도이다. 매립지의 주요 시설물로는 매립지에서 발생하는 침출수에 의한 오염을 방지하기 위한 차수시설이 설치되어 있으며, 침출수 발생량은 평균 30m³/일이다. 침출수 처리방법은 관로를 통한 하수 종말 처리장으로 이송처리를 하고 있으며, 매립지의 각종 미생물들에 의해 유기성 폐기물이 분해되면서 발생하는 가스(LPG)의 배출을 위한 가스배출 시설(L=2,025, D=150~250m/m)이 2개소 설치되어 있다.

연구지역 일대는 중생대 쥐라기의 흑운모화강암을 기저로 하여 백악기 미문상화강암과 유문암이 관입하고 있으며 주변의 충적층이 이들을 부정합으로 피복하고 있다(황상구 외, 1990). 현재 매립지 주변은 대부분 토양으로 피복된 상태이며, 연구지역에서 관찰되는 소규모의 노두는 흑운모화강암이다(Fig. 1).

매립지 주변에는 매립지 출입구의 우측 고지에 제각이 있으며, 제각 우측 하부 쪽으로 개를 사용하는 민가가 있고 매립지의 전방에는 염주체육관과 광주 월드컵 경기장이 위치한다. 그리고 매립지 출입구에서 저수지로 향하는 도로를 경계로 매립지와 풍암지구 아파트 단지가 나누어지며, 이 도로 중간정도에 철골자재 저장소가 자리잡고 있으며, 이웃하여 몇 채의 폐축사가 널려 있다. 전반적으로 매립지의 출입구 쪽이 지형적으로 높아서 수계는 매립지 입구 쪽에서

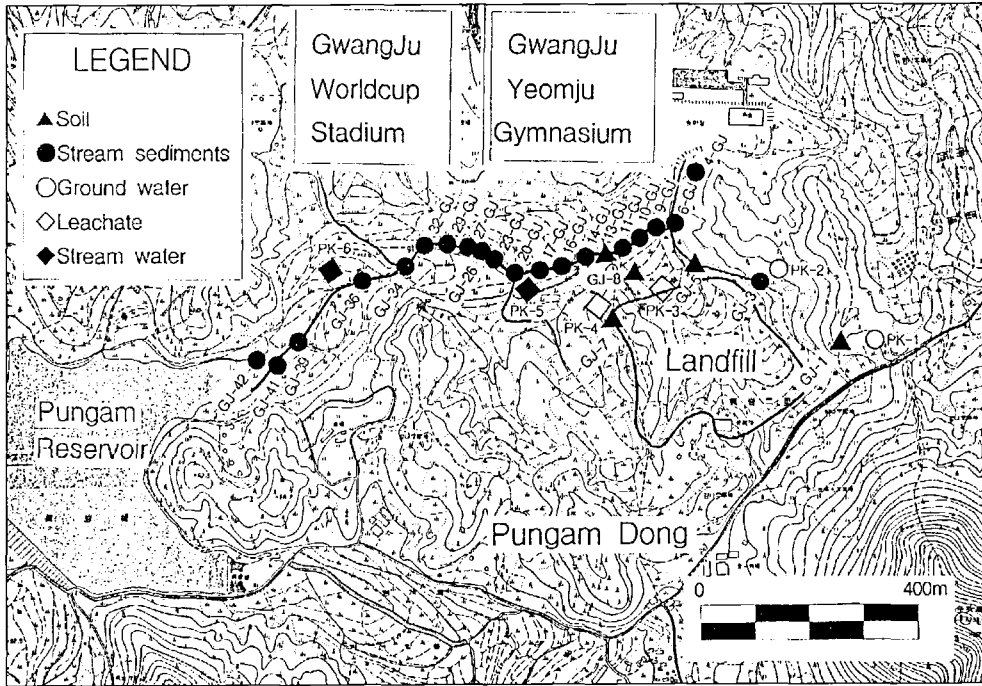


Fig. 2. Sampling sites of stream sediments, surrounding soils and waters around the Pungam Landfill.

매립지 옹벽을 감싸고돌며 풍암저수지로 흐른다. 또 하나는 칠골자재 저장소를 통과하는 작은 수계가 존재한다. 수계에 분포하는 하상퇴적물의 대부분은 매립지를 둘러싼 산에서 공급되는 것으로 보인다.

시료채취 및 분석

하상퇴적물 및 주변토양

하상퇴적물은 매립지 출입구 쪽에서 수계를 따라 상류에서 하류로 가면서 20개의 시료를 채취했다 (Fig. 2). 시료 GJ-4는 염주체육관 측에서 주 하천으로 유입되는 지류의 퇴적물로서 위치 상 매립에 의한 오염과는 관련이 적을 것으로 판단하여 비교퇴적물(배경시료)로 지정했다. 시료 GJ-23은 대규모의 칠골 건축자재 보관소를 통과하는 지류가 본류와 합류되는 지점이다. 시료 GJ-34지점의 북측 산기슭에는 300평 정도의 폐기된 빙과류 보관용 냉장(동)고가 적재되어 있었으나 현재는 모두 철거된 상태이다.

매립지 주변토양은 모두 4개 지점에서 채취했다. 시료 GJ-1은 산기슭에서, 시료 GJ-5는 차수벽과 멀지 않은 밭에서, 시료 GJ-8은 침출수 저장고와 15m 정도 떨어진 논에서, GJ-13은 습지에 가까운 논에서 각

각 채취했다. 오염이 가장 심할 것으로 예상한 시료 GJ-7은 침출수 저장고로 유입되는 송수관 내에 쌓인 퇴적물(슬러지)이다.

채취한 시료들은 실험실 내에서 유기물을 제거하고 자연 건조시킨 후 -80mesh, -200mesh로 체분석을 실시하여 분석용으로 사용하였다. 이 중에서 -200 mesh 시료를 잘 혼합한 후, 각각 50 g을 취하여 캐나다의 Activation Laboratories Ltd.에 분석을 의뢰했다. 주성분 및 미량원소는 lithium metaborate와 tetraborate에 용해시켜, 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, Perkin Elmer Scix ELAN 6000)로 분석하였다.

물 시료

매립지 주변의 물 오염실태를 파악하기 위해 6개(지하수 PK-1, -2; 침출수 PK-3, -4; 하천수 PK-5, -6)의 시료를 1999년 3월에 채취했다(Fig. 2).

지하수 PK-1은 매립지 출입구와 멀지 않은 제각에서 생활용수로 사용하는 지하수로 매립지의 매립면보다 고도가 높으며, 지하수 PK-2는 매립지 옹벽과 하천을 경계로 한 민가개 사육장에서 사용하는 지하수다. 침출수 PK-3은 매립지 옹벽 근처의 웅덩이

에서, PK-4는 침출수 저장고에서 채취했다. 하천수 PK-5는 침출수 저장고에서 풍암저수지로 흐르는 유수이며, 이곳에는 하천 바닥과 식물에 황갈색 침전물이 다량 관찰되는 곳이다. 하천수 PK-6는 풍암저수지에 가까운 곳으로 평소에 늪지를 이루는 지역에서 채취하였다.

물 시료는 양이온 및 음이온 분석용을 구분하여 채취하였으며, 양이온 분석용 시료에는 이온들이 용기 벽면에 흡착되는 것을 방지하기 위하여 농질산을 가하여 pH를 2이하로 조정하였다. 모든 시료는 0.45µm 공극의 질산염습유소여과지를 이용하여 부유 물질을 제거하였다.

수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh), 온도, 전기전도도(EC) 및 총고용물질(TDS)은 현장에서 채수 즉시 pH meter(TOA, HM-14P), ORP meter(TOA, RM-12P), Conductivity meter(HACH, COS50) 및 EC meter(TOA, CM-14P)를 이용하여 측정하였다. 시료 채수 이후 분석까지 모든 운반 및 저장은 아이스 박스와 냉장고를 이용하여 저온상태를 유지하였다.

물 시료의 양이온 분석은 한국기초과학지원연구원에 의뢰하여 20개 원소를 분석했다. 양이온 성분 중 Fe함량은 흑연로원자흡광분광분석기(GFAAS, GF90-PLUS)를 이용하고, K 함량은 원자흡광분광분석기(AAS, UNICAM989)를, Na, Mg 및 Ca 함량은 유도결합플라즈마방출분광분석기(ICP-AES, ICP1000-III, SHIMADZ)를, 그리고 Mn, Sr, Al, Cr, Cu, Zn, Ge, As, Se, Mo, Cd, Sb, Hg 및 Pb 함량은 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, PQ3STE, FISONS)를 이용하여 분석하였다. 하천수의 음이온 성분 중 F, Cl, NO₃, NO₂, PO₄ 및 SO₄ 함량은 서울대학교 자원공학과 의 이온크로마토그래피(IC, Dionex-II500)을 이용하여 분석하였다. 음이온 중 HCO₃ 함량은 현장에서 페놀프탈레인 용액과 메틸레드-브롬크레졸그린과의 혼합용액을 사용하여 적정법으로 알칼리도를 구한 후 계산에 의해 결정하였다.

분석 결과

하상퇴적물

풍암매립지를 둘러싸고 흐르는 개천의 하상퇴적물과 주변 토양 등의 주성분 및 미량원소 함량을 Table 1에 정리하였다. 하상퇴적물에서 수계에 따른 원소의 함량변화를 Fig. 3에 나타냈다. Table 1과 Fig. 3에서

시료 GJ-1, 5, 8, 13은 주변토양, GJ-7은 슬러지이며, 이들을 제외한 나머지 시료들이 하상퇴적물이다.

상류에서 하류로 감에 따라 이들 원소들의 함유량은 부분적으로 약간의 부화현상이 보이기는 하지만, 시료의 위치로 보아 매립에 의한 오염이 적을 것으로 판단되는 하상퇴적물 시료 GJ-4와 비교할 때 큰 차이를 보여 주지 않는다. 또한 매립지와 떨어져 있으며 매립면보다 고도가 높은 산에서 채취한 토양 GJ-1과도 원소함량의 차이는 크지 않다.

하상퇴적물에 함유된 주성분은 Fe, Al, Ca, K, Na, Mg으로, 최다량으로 산출되는 원소는 Fe이다. 그 중에서 시료 GJ-23이 가장 높아 7.08wt.%이고, 나머지 시료는 2~4wt.% 범위를 보인다. 황갈색침전물이 다량 관찰된 지점에서 특이한 원소의 부화현상은 볼 수 없었다. 알루미늄함량은 대부분의 시료가 유사한 값을 보이나, 그 중에서 GJ-3이 2.45wt.%로 가장 많고, Ca 함량은 거의 유사하며, 알칼리(Na+K) 함량은 GJ-14가 0.24wt.%로 가장 높다.

상류에서 하류로 감에 따른 미량원소의 함량변화도 주원소의 경우와 비슷한 경향을 보여주나, Ni, Zn, As, Mo의 경우 GJ-23과 GJ-34에서 비 이상적으로 높게 나타나는데, 특히 GJ-34에서는 위 원소들 외에도 Cu, Cd와 같은 중금속원소 함량이 다른 모든 하상퇴적물보다 높다. 또한 GJ-14과 GJ-41은 각각 Cr과 Pb를 가장 많이 포함한다. 하상퇴적물이 함유한 미량원소의 지구화학적 특성을 살펴보면 다음과 같다.

비소화합물의 대부분은 독성이 높기 때문에 살균제, 제초제, 살충제 등으로 사용하는 경우가 있다(최병순 외, 1997). 연구지역 하상퇴적물 중에서 비소의 함량이 10ppm이 초과하는 시료는 GJ-23과 GJ-34이며, 그 외 대부분은 6ppm 이하이다. 카드뮴은 대부분의 시료에서 검출되지 않으며 가장 높은 시료의 함량도 0.5ppm에 불과하여 우리 나라 토양오염 기준 1.5ppm 보다 낮다.

코발트 함량은 6.9~16.5ppm 범위를 나타낸다. 특수한 경우를 제외하고 보통 토양에는 10ppm을 초과하지 않는 것으로 알려져 있으나, 연구 지역에서는 시료 GJ-9와 10을 제외하면 대부분 10ppm 이상이다. 크롬 금속과 크롬산은 금속의 내구성을 증대시키는 부식방지제로 널리 사용하고 있는데, 하상퇴적물에서 크롬 함량은 16.9~26.8ppm의 범위로 우리 나라 토양오염 우려 기준인 4ppm을 훨씬 초과한다.

우리는 과일 등의 살균제 및 가축의 사료의 첨가물

Table 1. Concentrations of major (wt.%) and minor (ppm) elements of stream sediments and soils around the Pungam landfill

	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	Cd	As	Ni	Mn	Cu	Pb	Zn	Co	Cr	Mo
Soil																
GJ-1	2.47	6.09	0.47	0.17	0.03	0.13	0.1	11.4	11.5	783	12.7	25.8	94.9	18.2	20.1	1.2
GJ-5	1.87	6.74	0.40	0.63	0.07	0.12	0.0	6.4	8.8	1360	28.0	21.7	59.7	20.6	20.7	0.5
GJ-7	1.44	5.50	0.54	1.02	0.07	0.19	0.4	24.5	10.7	2250	9.7	44.4	136.3	11.4	45.6	0.5
GJ-8	0.33	35.09	0.12	1.15	0.04	0.05	0.1	38.8	5.4	983	4.7	9.4	36.0	6.8	8.0	0.8
GJ-13	0.76	2.39	0.42	0.23	0.02	0.06	0.0	3.6	7.2	593	6.8	21.0	50.4	11.1	15.5	0.2
stream sediments																
GJ-3	2.45	2.33	0.45	0.12	0.03	0.11	0.1	3.2	13.3	896	8.8	24.9	61.3	13.3	21.8	0.3
GJ-4	2.33	3.05	0.51	0.18	0.03	0.13	0.0	2.2	10.2	494	6.7	21.5	60.5	12.1	22.4	0.4
GJ-6	1.70	2.90	0.42	0.21	0.04	0.14	0.0	5.5	8.4	1120	10.2	25.0	80.0	10.8	24.6	0.4
GJ-9	0.81	3.91	0.31	0.20	0.02	0.09	0.1	6.7	6.6	451	5.7	17.4	42.7	6.9	15.6	0.5
GJ-10	0.88	3.42	0.41	0.07	0.02	0.10	0.0	4.6	6.6	260	6.4	19.3	48.6	9.2	15.9	0.3
GJ-11	1.02	3.22	0.61	0.21	0.02	0.14	0.1	4.2	8.2	870	12.6	22.1	79.9	13.9	18.2	0.4
GJ-14	3.04	3.89	0.65	0.29	0.05	0.19	0.2	5.5	13.5	1020	18.6	32.2	105.3	16.0	26.8	0.4
GJ-16	2.54	3.16	0.56	0.22	0.04	0.10	0.1	3.3	11.4	514	8.7	27.4	69.9	14.0	22.8	0.3
GJ-17	2.40	3.02	0.55	0.26	0.03	0.15	0.0	2.4	10.5	1030	11.6	23.4	65.1	13.3	21.9	1.5
GJ-20	2.06	3.71	0.54	0.35	0.03	0.14	0.0	3.5	9.4	1470	8.7	20.8	61.0	14.9	20.9	0.4
GJ-23	2.11	7.08	0.49	0.28	0.03	0.13	0.2	12.5	18.3	1360	20.2	27.5	155.9	16.5	23.7	1.4
GJ-26	1.51	2.84	0.43	0.13	0.05	0.14	0.0	3.3	8.6	567	10.3	20.7	60.9	14.1	20.3	0.4
GJ-27	0.82	2.18	0.29	0.10	0.01	0.08	0.0	2.6	5.4	491	5.7	16.1	39.7	11.1	15.7	0.3
GJ-29	1.35	2.88	0.47	0.31	0.01	0.12	0.0	4.8	8.1	1120	10.2	28.9	77.1	12.9	20.0	0.5
GJ-32	0.81	2.29	0.34	0.10	0.01	0.12	0.0	3.4	6.7	395	14.0	20.8	79.7	10.7	17.0	0.3
GJ-34	0.92	4.50	0.29	0.20	0.02	0.09	0.5	10.4	20.3	1720	57.2	35.8	229.1	11.6	25.5	1.0
GJ-36	1.98	3.46	0.64	0.18	0.02	0.14	0.0	5.3	11.2	702	10.3	27.6	89.7	16.2	25.1	0.4
GJ-39	2.22	2.82	0.47	0.10	0.02	0.12	0.0	4.3	10.9	286	9.1	26.6	71.4	12.4	21.8	0.4
GJ-41	2.29	2.88	0.55	0.15	0.02	0.18	0.1	3.0	9.1	355	9.5	36.0	81.6	10.8	16.9	0.4
GJ-42	1.89	2.76	0.50	0.18	0.02	0.15	0.1	3.3	10.7	337	11.1	63.7	103.2	13.6	20.5	0.3

GJ-1 and GJ-5 are sampled from hill and farm, respectively. GJ-8 and GJ-13 are sampled from rice field. GJ-7 is sludge in the drainage pipe.

로 사용되기도 하는데, 토양에서 이동성이 적고 농도가 0.1ppm을 초과하면 식물 생육에 지장을 초래한다. 시료 GJ-34는 57.2ppm으로 가장 높은 함량을 나타내며, 그 외는 6~20ppm 범위로 우리 나라 토양오염 우려 기준 이하이다. 본 역의 폴리브텐 함량은 모두 1.5ppm이하이다. 납 함량은 시료 GJ-42에서 63.7ppm을 제외하면, 16.1~36ppm의 범위로 우리 나라 토양오염 우려 기준 100ppm보다 상당히 낮은 수준이다.

아연은 토양 중에 각섬석, 흑운모 등의 유색광물에 많이 존재하며(최병순 외, 1997), 흔히 사용하는 잉크, 화장품, 복사지나 자동차 연료첨가제, 타이어에서 배출된다. 연구지역에서는 100ppm 이상인 시료는 4개이며, 나머지는 40~90ppm의 범위로 낮게 나타난다. 망간의 함량은 최저 286ppm으로 지각의 평균함량 100ppm에 비해 상당히 부화되어 나타나며, 1000ppm을 초과하는 시료도 7개나 된다.

주변토양

주변토양은 시료 GJ-1, 5, 8, 13이고, GJ-7은 침출수 수송관 내에 쌓인 슬러지이며, 이들의 주성분 및 부성분은 Table 1과 Fig. 3에 하상퇴적물과 비교하여 나타냈다.

토양 시료의 분석결과에서 가장 두드러진 특징은 GJ-8에서 철과 비소의 높은 함량이다. 시료 GJ-8의 철 함량은 35.1wt.%로 다른 토양에 비해 5배정도, 일반적인 하상퇴적물의 10배가 넘고, 일반적인 토양에서의 평균함량 4wt.%(0.2~55wt.%)보다 높은 편이다. GJ-8의 알루미늄과 마그네슘 함량은 다른 토양에 비해 낮으나 칼슘 함량은 높다. 일반적으로 토양에서 이동도가 매우 낮은 철은 칼슘과 함께 비소를 고정시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있는데, 그 때문인지 확실하지는 않으나 GJ-8의 비소 함량은 38.8ppm으로 다른 토양시료 뿐 아니라 어느 하상퇴

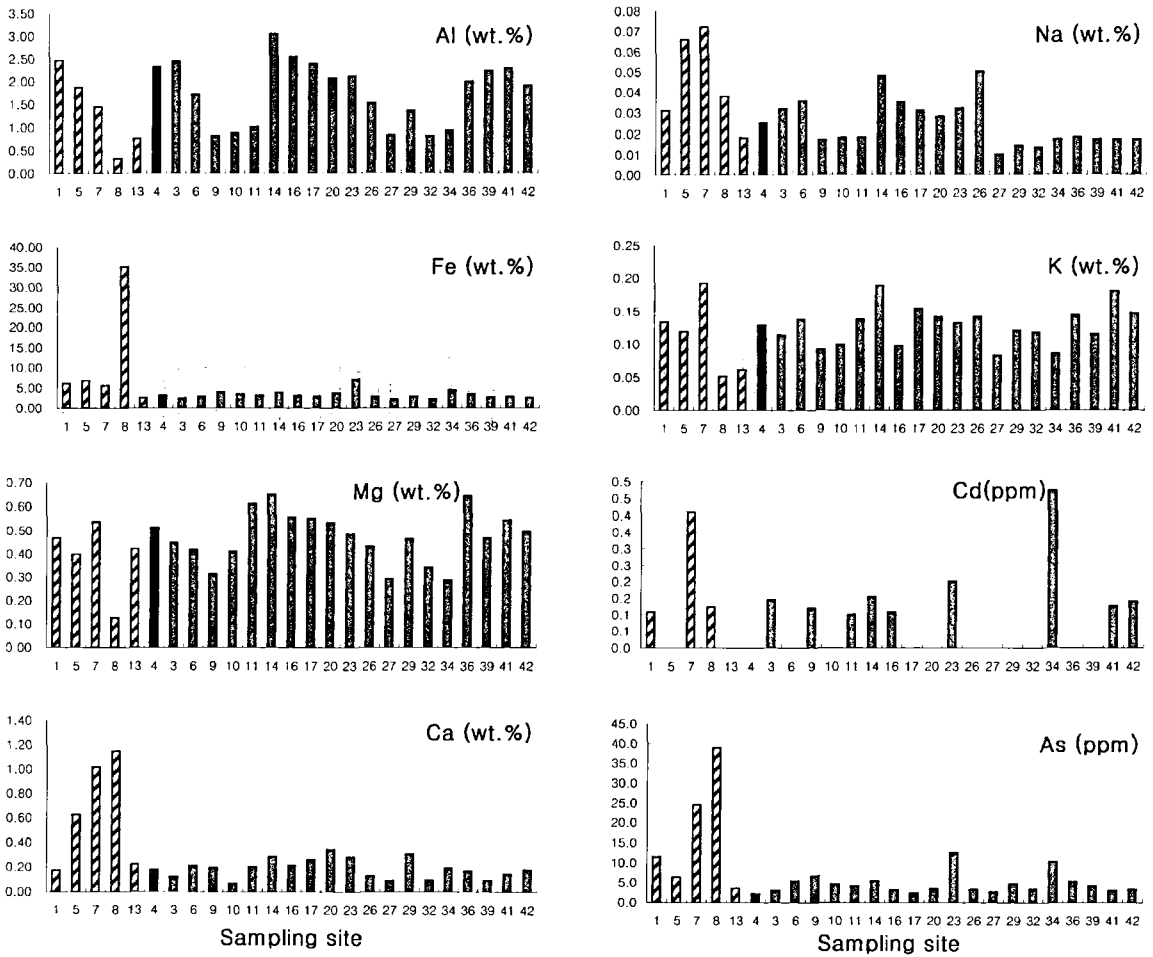


Fig. 3. Concentrations of major and minor elements of stream sediments, surrounding soils and sludge around the Pungam landfill.

적물 보다는 월등히 높다.

산에서 채취한 GJ-1과 밭에서 채취한 GJ-5에서 많은 원소들의 함량이 서로 유사한 값을 보인다. 논 토양(비 경작지) GJ-13은 거의 모든 원소들의 함량이 일반적인 하상퇴적물과 유사하게 나타나, 원소 함량으로 보아 하상퇴적물이 집적된 곳일 가능성도 있다.

슬러지 시료인 GJ-7의 원소함량은 주변 토양이나 하상퇴적물과는 전혀 다른 양상을 보여준다. 다른 시료보다 함량이 높은 원소는 Cd, Mn, Cr, As, Ca, Pb, Zn, Na+K이며, 낮거나 유사한 함량의 원소는 Al, Co, Mo, Mg, Ni, Cu이다. 상대적으로 높은 함량을 보이는 카드뮴은 0.4ppm으로 우려기준 1.5ppm보다 훨씬 낮다. 연구 지역에서 가장 높은 함량을 나타내는 크롬은 45.6ppm으로 토양오염 우려기준

4ppm을 10배 이상이나 초과한다. 망간과 알칼리(Na+K)의 함량도 각각 2250ppm, 0.26ppm으로 모든 시료 보다 높게 나타난다. 비소(24.5ppm)와 칼슘(1.02wt.%)은 시료 GJ-8 다음으로 많고, 납(44.4ppm)과 아연(136.3ppm)의 함량도 두 번째로 높다. 이상과 같이 슬러지 시료는 다른 토양시료나 하상퇴적물보다 원소의 함유량이 높지만, 크롬 이외에 오염을 우려할 만한 성분은 눈에 띄지 않는다. 또한 이 시료는 저장고로 유입되어 처리되므로, 수계로 유출되어 오염을 일으킬 가능성은 그다지 크지 않다.

물

풍암매립지 주변에서 채취한 물 시료들에 대한 물리화학적 특성을 Table 2에 정리했다. 물 시료들의

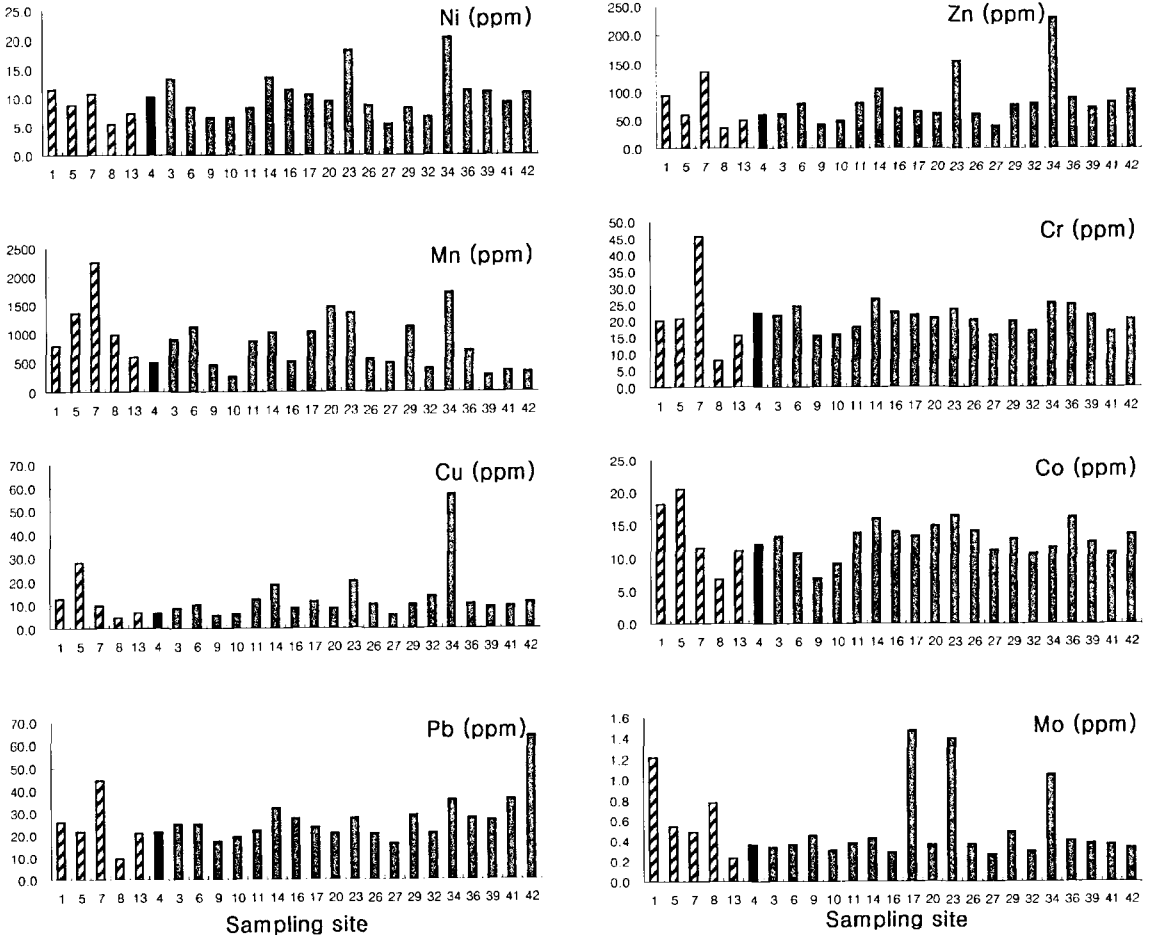


Fig 3. continued.

pH는 침출수가 8.78과 8.86으로 중알칼리성이며, 지하수는 6.52와 6.9로 중성 그리고 하천수는 7.62와 7.99로서 약알칼리성을 나타낸다. 산화환원전위는 지하수가 200mV 이상으로 가장 높고, 모든 시료는 산화환경이다(Fig. 4). 침출수의 총용존물질(2210, 2470 mg/L)과 전기전도도(468, 530ms/m)는 지하수나 지표수에 비해 압도적으로 높는데, 이는 성분함량의 부화와 밀접히 관련되어 있다. 주요 용존 양이온 함량은 침출수가 가장 높고, 음이온 함량은 침출수 PK-3에서 아주 높게 나타난다(Fig. 5).

풍암매립지 주변의 물 시료에 대한 수리화학적 유형을 알아보기 위해 주성분 이온들을 당량비로 환산하여 파이퍼도에 도시하였다(Fig. 6). 침출수가 지하수 및 하천수에 비해 양이온은 Na+K가, 음이온은 HCO₃이 우세하지만, PK-3의 염소함량은 다른 시료

에 비해 압도적으로 높게 나타난다. 그러나 Mg와 SO₄는 낮게 나타났다. 그 외 시료들은 Ca와 Na+K, 그리고 HCO₃와 Cl이 중간 정도의 수질 특성을 갖는다. 침출수 PK-3은 Na-Cl형으로 현재 매립중인 광주광역시 운정동 매립지의 침출수 수질유형(박천영, 김성구, 2002)과 유사하다.

Table 2에서 양이온의 함량을 살펴보면, 침출수는 Na나 K 이외에도 Mg, Fe, Al, Cr, As, Pb 등이 전체적으로 높은 함량을 갖는다. 하천수에서 우세한 양이온은 Ca, Si, Mn, Sr, U이며, 지하수에 가장 부화된 이온은 Cu와 Zn과 같은 미량 중금속이다.

음이온의 경우 HCO₃는 침출수가 가장 우세하다. pH가 8.3 이상인 침출수의 CO₃가 함유량은 8.5 mg/l와 12.5 mg/l를 각각 보인다. 염의 용해에 의해 형성된 Cl이 침출수 음이온의 상당부분을 차지하는데 용

Table 2. Physical and chemical properties of water samples around the Pungam Landfill (sampled in March, 1999).

Ion (unit)	Groundwater		Leachate		stream water		WHO ^(a)	EPA ^(b)	MEK ^(c)
	PK-1	PK-2	PK-3	PK-4	PK-5	PK-6			
pH	6.90	6.52	8.78	8.86	7.62	7.99			
Eh (mV)	232	242	156	131	47	108			
T (°C)	15.2	15.0	104	14.4	10.4	9.1			
TDS (mg/l)	190	84	2210	2470	593	449			
EC (ms/m)	43.2	18.6	468.0	530.0	140.7	107.9			
Na (mg/l)	29.9	16.7	332	342	82.4	66.2	200		
K (mg/l)	1.36	0.92	181	213	25.2	23.5	150		
Ca (mg/l)	33.4	13.5	46.0	65.1	88.5	72.3	200		
Mg (mg/l)	9.87	3.88	38.2	51.2	32.4	24.4	150	150	
Si (mg/l)	14.1	13.8	7.04	8.41	8.64	8.86			
F (mg/l)	nd	nd	2.5	0.1	0.1	0.1			
Cl (mg/l)	40.9	23.5	660.5	79.6	289.7	212.6	250	150	250
NO ₂ (mg/l)	nd	nd	nd	nd	nd	nd	100		
NO ₃ (mg/l)	82.6	19.9	9.6	1.9	18.2	35.2		10	20
HCO ₃ (mg/l)	6.7	59	164	225	38	32			
CO ₃ (mg/l)	-	-	8.5	12.5					
PO ₄ (mg/l)	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
SO ₄ (mg/l)	13.9	2.3	9.6	0.9	8.8	6.4	400	200	
Mn (mg/l)	nd	nd	0.87	2.04	3.80	2.02	0.1	0.3	
Fe (mg/l)	nd	nd	0.73	1.53	0.13	0.33	0.3	0.3	
Sr (mg/l)	0.42	0.27	0.36	0.69	1.05	0.79			
Al (μg/l)	1.24	0.32	46.8	9.54	0.63	2.47	0.2	2	
Cr (μg/l)	0.87	3.56	10.2	21.5	2.17	2.18			0.05
Cu (μg/l)	10.2	5.51	2.17	1.73	2.88	1.50	1	1	
Zn (μg/l)	34.8	39.5	5.38	13.0	9.56	3.97	5	1	
Ge (μg/l)	nd	nd	0.41	0.36	nd	nd			
As (μg/l)	nd	nd	22.4	32.2	1.74	1.28			0.05
Hg (μg/l)	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
Se (μg/l)	nd	nd	3.78	7.73	2.29	1.47			
Cd (μg/l)	nd	nd	nd	nd	nd	nd			0.01
Pb (μg/l)	0.34	nd	0.25	0.32	nd	nd	0.05	0.5	0.1
Th (μg/l)	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
U (μg/l)	nd	nd	0.37	0.63	1.34	7.82			

(a) World Health Organization (1993).

(b) Environmental Protection Agency (1998).

(c) The Ministry of Environment, Republic of Korea (drinking, architectural) (1999).

벽에서 유출되는 시료(PK-3)의 Cl 함량은 660.5 ml/l로 저장고 침출수 보다 높다. 이는 침출수 저장고에서의 정화처리에 의한 결과로 보여진다. NO₂는 전 시료에서 검출되지 않았으며, 지하수와 하천수의 NO₃ 함량은 침출수 보다 최고 9배 이상이나 높는데, 이는 농경지에서 사용된 비료와 퇴비의 영향으로 보인다.

Table 2에서 연구지역 물 시료의 이온 함량과 세계 보건기구(WHO), 미국의 환경보호국(US. EPA) 및 한국의 음용수 기준 허용치를 비교해 볼 수 있다. 지하수의 경우에 다른 항목은 모두 허용치 이하이나,

PK-1에서 청색증을 유발하는 것으로 알려진 질산성 질소의 함량이 허용치를 크게 초과한다. 하천수의 경우 양이온 중에서 Mn과 Fe, 음이온 중에서는 Cl과 HCO₃의 함량이 허용치를 초과하여 음용수나 농업용수로 부적합함을 알 수 있다. 결과적으로 연구지역 지하수는 음용수 기준을 훨씬 초과하여 식수로 사용하기에는 부적절한 것으로 나타났다.

매립지 퇴적물에서 중금속의 상대적 이동도

매립되는 생활쓰레기의 분해과정에서 발생할 수 있

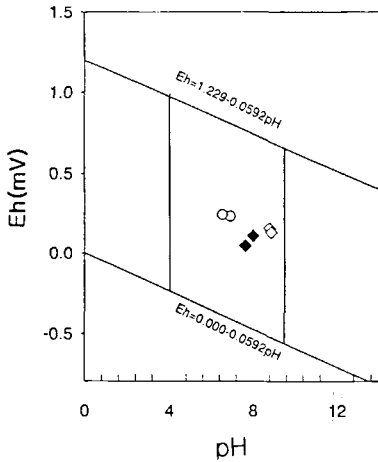


Fig. 4. Eh-pH relationship between water samples around the Pungam Landfill.

는 중금속은 용해와 침전반응을 통해 매립지 토양의 미량원소 함량과 거동에 직접적인 영향을 미칠 것으로 추정했다(이평구 외, 2001). 매립지에서 중금속 이동에 대한 평가를 통해 매립환경에서 미량원소의 거동을 예측할 수 있으며, 매립환경에서 안정된 형태로 존재하던 중금속이 복원사업 중에 산화환경으로 변화될 때 중금속의 용해 및 침전반응이 주변 지하수의 수질에 미치는 영향을 파악하는데도 이용할 수 있다.

이평구 외(2001)는 원소의 이동에 대해, 연속추출 결과를 기준으로 매립환경에서 발생할 수 있는 중금속 및 미량원소의 상대이동은 이온교환성 형태가 가장 높은 것으로 예상된다고 하였다. 연구 지역의 침출수 수송관에서 채취한 슬러지(GJ-7)에서 중금속 함량(As, Mn, Zn, Cu)이 높아 매립지 복원 사업을 할 때에 위험인자가 될 수도 있음을 의미한다. 특히 이동도가 상대적으로 큰 비소의 경우 슬러지가 24.5 ppm으로 농경지 우려기준 6ppm보다 4배 이상 높아, 매립토양의 이동이나 침출수 유출에 의한 환경오염 요소는 존재하는 것으로 판단된다. 더욱이 침출수 저장고와 인접한 토양 GJ-8의 비소의 함량은 38.8ppm으로 공장·산업지역의 토양오염 우려기준인 20ppm보다도 높은 값을 보이며, 주변 토양이나 하상퇴적물보다 압도적으로 높은 값을 보인다. 이는 침출수 저장고와 인접한 토양에서의 높은 중금속함량은 침출수 유출에 의한 오염일 가능성이 있다. 하상퇴적물의 경우 두 지점에서 높은 중금속 함량을 보일 뿐 대부분 우려 기준보다 낮다.

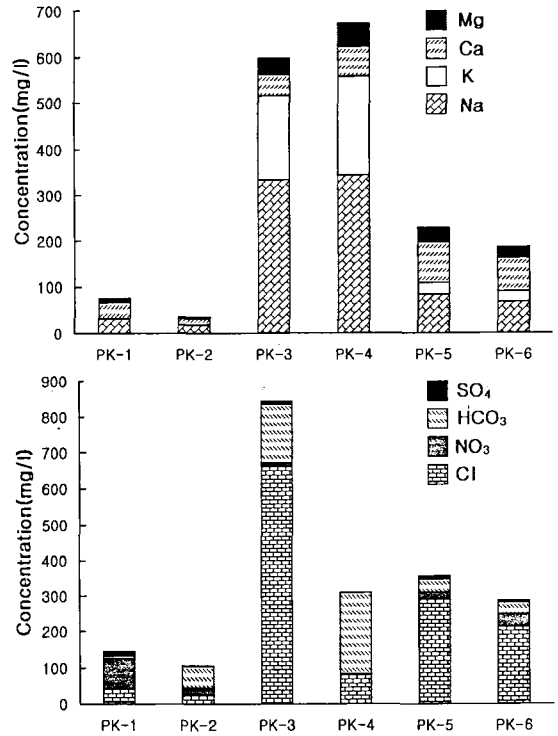


Fig. 5. Histogram for major ion concentrations in water samples around the Pungam Landfill.

하상퇴적물과 주변토양의 오염평가

연구지역에서 대부분의 하상퇴적물이나 토양의 중금속함량은 토양환경보전법의 농경지 토양의 우려기준 보다 낮아 매립에 의한 중금속 오염확산을 우려할 수준은 아니다. 그러나 특정 원소들은 그 함량이 높아 오염도를 평가해 볼 필요가 있다. 여기서는 기존 연구(Kemp et al., 1976; Kindler and Servin, 1990; Lee et al., 1997a; 이평구, 이재영 1997, 이평구 외, 2001)에서 이용되고 있는 방법, 즉 중금속과 미량원소의 오염정도를 농집지수(index of geoaccumulation, I_{geo})와 부화계수(enrichment factor, EF)를 이용하여 비교 평가하는 방법을 적용하였다.

농집지수(I_{geo})는 Muller(1979)가 제안했으며, 퇴적물의 오염정도를 평가하는데 이용되고 있다. 이 방법은 강, 호수, 해안퇴적물의 중금속 함량을 오염되지 않은 퇴적물과 비교하여 정량화하는 것이며, 기원물질의 중금속 함량 변화를 보정하기 위해 1.5를 곱해 주고 있다.

$$I_{geo} = \log_2[M_{sample}/1.5M_{background}]$$

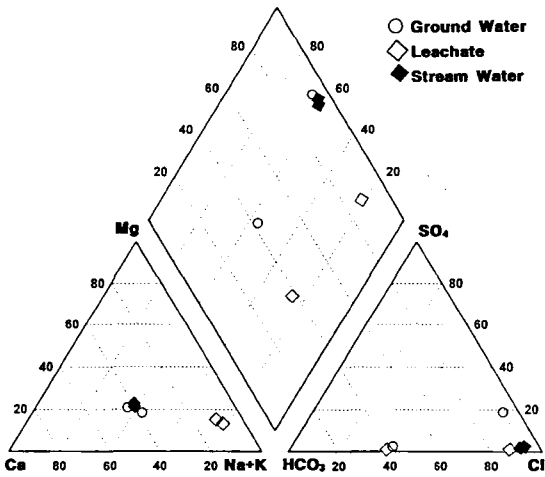


Fig. 6. Piper's diagram for water samples around the Pun-gam Landfill.

여기서 $M_{background}$ 는 배경시료의 함량이며, M_{sample} 는 비교 대상 시료의 함량이다. Muller는 I_{geo} 값을 7등급

으로 구분했다. 여기서 배경시료는 GJ-4의 값을 이용했으며, I_{geo} 계산값은 Table 3에 나타났다. 배경시료로 이용한 GJ-4는 주 하천으로 유입되는 지류의 최상류 하상퇴적물로서 매립지 옹벽을 둘러싸고 흐르는 하천과 떨어져 있어 매립에 의한 영향이 적을 것으로 판단했다.

I_{geo} 값을 분석해 보면 하상퇴적물에 비해 주변 토양에서 농집도가 우세하다. 주변 토양에서 가장 오염이 심한 곳은 GJ-8로서 비소가 3.54로서 중~강하게 오염 것으로 나타난다. 비소의 경우, 정도는 약하지만 GJ-1과 침출수구의 슬러지 GJ-7도 상대적으로 높게 나타나며, 하상퇴적물에서도 높은 농집도를 보이는 성분도 비소이다. 또한 GJ-8은 철(Fe)도 3정도로 몰리브덴과 함께 금속성분이 농집된 토양임을 알 수 있다. GJ-5의 경우 구리가 1.5, 비소와 망간이 1정도로 미약하나마 농집된 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 몇몇 원소 이외에는 거의가 1이하로서 오염을 우려할 수준은 아니다.

Table 3. Calculated geoaccumulation indices of metals in stream sediment and soil normalized by GJ-4 sample around the Pun-gam landfill.

Sample	Al	Fe	Mn	As	Cr	Co	Cu	Zn	Mo	Ni	Pb
Soils											
GJ-1	-0.50	0.41	0.08	1.77	-0.74	0.01	0.34	0.06	1.17	-0.41	-0.32
GJ-5	-0.90	0.56	0.87	0.93	-0.70	0.18	1.48	-0.60	-0.01	-0.80	-0.57
GJ-7	-1.28	0.27	1.60	2.87	0.44	-0.66	-0.05	0.59	-0.15	-0.52	0.46
GJ-8	-3.40	2.94	0.41	3.54	-2.06	-1.41	-1.09	-1.33	0.52	-1.50	-1.78
GJ-13	-2.20	-0.94	-0.32	0.09	-1.11	-0.71	-0.57	-0.85	-1.25	-1.08	-0.61
Stream sediments											
GJ-3	-0.51	-0.98	0.27	-0.08	-0.62	-0.45	-0.20	-0.56	-0.69	-0.20	-0.37
GJ-6	-1.04	-0.66	0.59	0.72	-0.45	-0.75	0.03	-0.18	-0.58	-0.87	-0.37
GJ-9	-2.11	-0.23	-0.72	1.00	-1.10	-1.38	-0.83	-1.09	-0.26	-1.22	-0.89
GJ-10	-1.99	-0.42	-1.51	0.47	-1.07	-0.98	-0.65	-0.90	-0.84	-1.22	-0.74
GJ-11	-1.78	-0.51	0.23	0.32	-0.88	-0.38	0.32	-0.18	-0.52	-0.89	-0.55
GJ-14	-0.20	-0.23	0.46	0.71	-0.33	-0.18	0.89	0.22	-0.34	-0.18	0.00
GJ-16	-0.46	-0.53	-0.53	-0.04	-0.56	-0.38	-0.21	-0.38	-0.93	-0.42	-0.23
GJ-17	-0.55	-0.60	0.47	-0.51	-0.62	-0.44	0.21	-0.48	1.44	-0.54	-0.46
GJ-20	-0.76	-0.30	0.99	0.07	-0.68	-0.28	-0.22	-0.57	-0.59	-0.70	-0.63
GJ-23	-0.73	0.63	0.87	1.90	-0.50	-0.14	1.01	0.78	1.37	0.26	-0.23
GJ-26	-1.21	-0.69	-0.39	-0.02	-0.72	-0.36	0.04	-0.57	-0.57	-0.83	-0.64
GJ-27	-2.08	-1.07	-0.59	-0.35	-1.10	-0.70	-0.81	-1.19	-1.04	-1.51	-1.00
GJ-29	-1.37	-0.67	0.59	0.52	-0.74	-0.48	0.02	-0.24	-0.15	-0.91	-0.16
GJ-32	-2.11	-1.00	-0.91	0.02	-0.98	-0.76	0.48	-0.19	-0.87	-1.20	-0.63
GJ-34	-1.92	-0.02	1.21	1.63	-0.40	-0.64	2.51	1.34	0.95	0.41	0.15
GJ-36	-0.82	-0.40	-0.08	0.66	-0.42	-0.16	0.04	-0.02	-0.42	-0.45	-0.22
GJ-39	-0.65	-0.70	-1.38	0.36	-0.62	-0.55	-0.14	-0.35	-0.53	-0.49	-0.28
GJ-41	-0.61	-0.67	-1.06	-0.16	-0.99	-0.74	-0.08	-0.15	-0.57	-0.76	0.16
GJ-42	-0.88	-0.73	-1.14	-0.01	-0.71	-0.41	0.14	0.19	-0.71	-0.52	0.99

Table 4. Calculated enrichment factor of metals in stream sediment and soil normalized by GJ-4 sample around the Pungam landfill.

Sample	Fe	Mn	As	Cr	Co	Cu	Zn	Mo	Ni	Pb
Soil										
GJ-1	1.88	1.49	4.82	0.85	1.42	1.79	1.48	3.19	1.06	1.13
GJ-5	2.75	3.42	3.54	1.15	2.12	5.20	1.23	1.86	1.07	1.26
GJ-7	2.92	7.35	17.72	3.29	1.53	2.35	3.64	2.19	1.69	3.34
GJ-8	80.68	13.92	121.95	2.51	3.95	4.93	4.17	15.20	3.71	3.06
GJ-13	2.40	3.67	4.90	2.13	2.81	3.09	2.55	1.94	2.17	3.00
Stream sediments										
GJ-3	0.73	1.72	1.35	0.92	1.04	1.24	0.96	0.89	1.24	1.10
GJ-6	1.30	3.09	3.37	1.50	1.22	2.09	1.80	1.38	1.12	1.59
GJ-9	3.67	2.61	8.62	2.00	1.65	2.42	2.02	3.61	1.85	2.32
GJ-10	2.98	1.40	5.51	1.89	2.02	2.54	2.13	2.24	1.71	2.39
GJ-11	2.42	4.02	4.29	1.86	2.63	4.29	3.02	2.40	1.85	2.35
GJ-14	0.98	1.58	1.88	0.91	1.01	2.12	1.33	0.91	1.01	1.15
GJ-16	0.95	0.95	1.34	0.93	1.06	1.19	1.06	0.72	1.02	1.17
GJ-17	0.96	2.02	1.02	0.95	1.07	1.68	1.04	3.98	1.00	1.06
GJ-20	1.37	3.35	1.78	1.06	1.39	1.46	1.14	1.13	1.04	1.09
GJ-23	2.56	3.03	6.18	1.17	1.50	3.33	2.84	4.30	1.97	1.41
GJ-26	1.43	1.76	2.28	1.40	1.80	2.37	1.55	1.57	1.30	1.48
GJ-27	2.02	2.80	3.32	1.98	2.60	2.42	1.85	2.06	1.49	2.12
GJ-29	1.63	3.91	3.72	1.54	1.85	2.63	2.20	2.34	1.37	2.32
GJ-32	2.16	2.30	4.38	2.19	2.55	6.03	3.79	2.37	1.88	2.79
GJ-34	3.72	8.77	11.71	2.88	2.43	21.53	9.55	7.35	5.01	4.20
GJ-36	1.33	1.66	2.78	1.32	1.58	1.81	1.74	1.32	1.28	1.51
GJ-39	0.97	0.61	2.01	1.02	1.08	1.42	1.24	1.10	1.12	1.30
GJ-41	0.96	0.73	1.36	0.77	0.91	1.44	1.37	1.03	0.90	1.71
GJ-42	1.11	0.84	1.83	1.13	1.38	2.03	2.10	1.13	1.29	3.65

하상퇴적물에서는 가장 오염이 심한 곳은 GJ-23과 GJ-34로서 다른 퇴적물시료에 비해 As, Mn, Cu, Zn 그리고 Mo성분이 높다. 그러나 이 두 시료도 최대 3 이하의 수치이기 때문에 오염에 대한 우려가 있는 것은 아니다. 따라서 풍암매립지 하상퇴적물과 주변 토양에서 극심한 중금속 농축은 거의 없는 것으로 판단된다.

부화계수(EF)는 토양내의 점토광물 점유율을 고려하여 중금속과 미량원소의 함량을 보정하는 방법이다. 점토광물은 넓은 표면적과 영구적인 음전하로 중금속과 미량원소를 흡착하는 능력이 탁월하다. 점토광물의 점유율이 커지면 중금속이나 미량원소의 함량이 상대적으로 높아진다. 따라서 점토광물의 구성비로 오염정도를 판단할 수 있다. 점토광물의 구성비율은 직접 구하기 힘들기 때문에, 점토광물을 대표하는 지시원소인 알루미늄(Al) 함량을 이용하여 중금속원소나 미량원소에 대한 오염 정도를 평가한다.

$$EF = [N/Al]_{\text{sample}} / [M/Al]_{\text{background}}$$

보정한 결과 $EF > 1$ 이면 매립지 주변 배경토양에 비해 오염된 것을 의미하며, $EF < 1$ 이면 감소된 것을 의미한다. 여기서 배경시료로 GJ-4를 선택했으며, 보정한 EF값은 Table 4에 나타났다.

하상퇴적물 중에서 대부분의 시료는 1~3의 범위를 보이지만, GJ-23, 32, 34의 Cu, Zn, As, Mo이 눈에 띄게 높다. 또한 주변토양 중에서는 GJ-8의 값이 높아 국지적으로 중금속원소가 농집되어 있음을 보여준다.

결론

풍암매립지 주변에서 채취한 하상퇴적물, 토양 그리고 침출수 수송관내의 슬러지의 주원소, 미량원소를 분석한 결과 일부시료의 As함량 등이 약간 높은 것으로 나타나, 토양이나 퇴적물의 중금속오염을 우려할 수준은 아니다.

하상퇴적물은 상류에서 하류까지의 규칙적인 함량 변화는 없으며, 두 곳에서 원소가 부화되어 있다. 하상퇴적물에 함유된 주성분은 Fe, Al, Ca, K, Na, Mg 이며, 가장 풍부하게 산출되는 원소는 Fe(GJ-23에서 7.08wt.%)이다. 시료 GJ-23, 34는 미량원소를 다량으로 함유하고 있으며, 특히 GJ-34에서는 Cu, Cd와 같은 중금속원소 함량이 다른 모든 하상퇴적물보다 높다. 이들은 위치나 부화 원소를 고려할 때 침출수의 영향이라기 보다는 다른 원인(건축폐자재 저장, 농약 살포)에 의한 것으로 보인다.

주변 토양 중에서 침출수 저장고와 인접한 토양(GJ-8)에서의 철 함량은 35.1wt.%, 비소 함량은 38.8 ppm으로 다른 토양시료 뿐 아니라 어느 하상퇴적물 보다는 월등히 높다. 나머지 토양 GJ-1, 13은 오염이 적은 하상퇴적물 GJ-4와 유사한 원소함량을 보인다.

슬러지 시료(GJ-7)의 원소함량은 주변토양이나 하상퇴적물과는 전혀 다른 양상을 보여준다. 슬러지에서 함량이 높은 원소는 As, Cd, Mn, Cr, Pb 등으로, 특히 크롬 함량은 45.6ppm으로 토양오염 우려기준 4ppm을 10배 이상이나 초과한다. As, Mn 등 이동도가 상대적으로 높은 원소의 함량이 많아 침출수 유출에 의한 오염을 경계할 필요가 있다.

배경토양과 채취된 시료의 중금속과 미량원소의 오염정도를 농집지수 및 부화계수를 이용하여 비교 평가한 결과 오염이 심한 것은 토양 GJ-8이며, 두 하상퇴적물(GJ-23, 34)도 약간 오염된 것으로 나타났다.

물 시료의 pH는 중-알칼리에서 약알칼리를 나타내며, 산화환경임을 보여준다. 총용존물질과 전기전도도는 침출수가 다른 시료에 비해 압도적으로 높고 지하수가 가장 낮다. 침출수가 지하수 및 하천수에 비해 양이온은 Na+K가, 음이온은 HCO₃이 우세하다. 침출수 PK-3의 염소함량은 다른 시료에 비해 압도적으로 높아, 파이퍼도에서 Na-Cl형 영역에 점시된다. 매립용벽에서 유출되는 침출수 PK-3의 수질유형은 Na-Cl형으로 현재 매립중인 광주광역시 운정동 매립지의 침출수 수질유형과 유사하다. 하천수는 음용수나 농업용수로 부적합하며, 지하수의 경우 질산성질소의 함량이 음용수 기준을 훨씬 넘어서 식수로 사용하기에는 부적절한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 조선대학교 학술연구비(99총

괄과제, 세부과제 책임자 안건상) 지원을 받아 연구된 것이며, 연구비를 지원해준 조선대학교에 감사한다. 물 시료의 채취와 분석에 도움을 준 정연중 박사, 김성구 석사 그리고 실내 작업에 도움을 준 박기만, 강중현 석사과정학생들에게도 고마운 마음 전하고자 한다.

참고문헌

- 권병두, 서정희, 오석훈, 1998, 부산시 석대 매립지의 중력, 자력, VLF탐사. 자원환경지질, 31, 59-68.
- 김경웅, 손호웅, 1994, 대전시 신대동 폐기물매립지 주변지역에서의 지하수 및 토양의 중금속오염. 지하수환경, 1, 85-89.
- 김동우, 한영수, 이재영, 2000, 불량폐기물 매립지 및 주변 토양 오염도에 관한 연구. 한국지하수토양환경학회 추계학술회의 요약, 310-313.
- 민경원, 정연태, 1996, 춘천지역 토양 및 분진 중의 유독성 미량원소의 분포에 관한 지구화학적 연구, 한국자원공학회지, 33, 251-265.
- 박천영, 김성구, 2002, 광주시 운정동 위생 쓰레기 매립장 침출수에 대한 지구과학적 연구, 한국자원공학회지, 39, 98-111.
- 배재근, 오종민, 1995, 토양오염학, 신광문화사, 372 p.
- 오석영, 전효택, 1996, 폐기물매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성. 지하수환경, 3, 37-49.
- 이기화, 권병두, 정호준, 1996, 난지도 매립지 전기·전자담사. 지하수환경, 3, 95-100
- 이철효, 한정상, 1996, 난지도 매립지 주변 지하수 환경의 오염특성에 관한 연구. 지하수 환경, 3, 27-36.
- 이평구, 이재영, 1997, 프랑스 A-71고속도로변 Retention pond의 기능 평가. 한국토양학회지, 2, 73-81.
- 이평구, 박성원, 염승준, 2001, 공주 금흥매립지의 중간복도재 및 차수재(눈토양)의 중금속 오염과 존재형태 연구. 자원환경지질, 34, 283-299.
- 장연수, 이광열, 1994, 난지도 매립지 지반을 통한 오염이 특성과 제어. 지하수환경, 1, 1-5.
- 정상용, 1995, 부산석대 폐기물 매립지 일대의 지하수 오염. 지하수환경, 2, 1-8.
- 정상용, 권해우, 이강근, 김윤영, 1997, 부산석대 폐기물 매립지 일원의 수질환경. 지하수환경, 4, 175-184.
- 정상용, 이강근, 1998, 포항 옥명 폐기물 매립지의 지하수 환경. 지하수환경, 2, 1-8.
- 정하익, 김상근, 2000, 폐기물매립지 주변토양 및 지하수 오염도 조사 및 분석. 한국지하수토양학회, 2000년 춘계 발표회 전문집, 116-119.
- 차중문, 김주용, 이병태, 김경웅, 1999, 광주지역 일곡 매립지 주변에서의 하천수 및 지하수 오염 모니터링. 자원환경지질, 32, 485-493.
- 최병순, 김진환, 이동훈, 1997, 토양오염개론. 도서출판 동화기술, 287 p.

- 한국자원연구소, 1995, 지구물리 지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발연구(I). 과학기술처, 422 p.
- 황상구, 김규봉, 이병주, 1990, 광주도곡 지질 보고서, 한국 동력자원연구소, 15 p.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 1984, Trace elements in soil and plants. CRE press, Florida, 315 p.
- Kemp A.L.W., Thomas R.L., Dell C.I., and Jaquet J.M., 1976, Cultural Impact on the Geochemistry of sediment in Lake Erie. Journal of Fish. Research Board Canada, 33, 440-462
- Kerndorff, H., Schieyer, R., and Milde. G., 1992, Geochemistry of groundwater pollutants at German waste disposal sites. In: S. Lesage and R.E. Jackson(ed) Groundwater Contamination and Analysis at Hazardous Waste sites, Marcel-Dekker Inc., 245-271.
- Kindler F.M. and Sevin H.E., 1990, Heavy metals in sediment of Turkish river systems. Natural background and anthropogenic effects. In Broekaert J.A.C.(ed), Metal Speciation in the Environmental, Springer-Verlag, 601-611
- Lee P.K., Baillif P., Touray J.C., and Ildefonse J.P, 1997, Heavy Metal Contamination of Setting Particles in a Retention Pond along the A-71 Motorway in Sologne, France. Society of Total Environment, 201, 1-15.
- Muller G., 1979, Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen seit. Umschau, 79, 778-783.
- Nicholson, R.V., Cherry, J.A., and Readon, E.J., 1983, Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study; 6. Hydrogeochemistry, Journal of Hydrology, 63, 131-176.
- Wadleigh, C.H., 1968, Waste in relation to agriculture and forestry, Misc. Publication No. 1065., U.S. Department Agricultural, 112 p.
- Yong, R.N., Mohamed, A.M.O., and Warkentin, B.P., 1992, Principles of Contaminant Transport in Soils, Elsevier, 327 p.

2002년 8월 24일 원고 접수
2003년 4월 1일 수정원고 접수
2003년 5월 24일 원고 채택