

포항 옥명 폐기물 매립지의 지하수 환경 Groundwater Environment of the Okmyong Waste Landfill in the Pohang City

정상용(Sang-Yong Chung)* · 이강근(Kang-Kun Lee)**

요약 : 포항 옥명 폐기물 매립지는 우리나라의 주요 산업폐기물 처리장으로서 1988년 1월부터 현재까지 약 10년동안 사용되고 있다. 매립지에서 반경 2~3 km 범위의 일반지하수는 산성비의 영향으로 pH가 약산성이며, EC, NO₃, SO₄가 보통의 지하수보다 높게 나타난다. Piper의 삼각다이어그램에서의 수질유형은 Ca-SO₄와 Na-SO₄형인데, Ca-SO₄형이 우세하다. 매립지내의 5개 감시정 지하수의 수질은 침출수의 영향으로 pH가 약알칼리성이며, TS, COD, Na, Cl, SO₄, Alkalinity, F 등이 일반지하수에 비하여 많이 나타난다. Mn, Zn, Pb, Cr, Ni 등의 중금속도 많이 나타나지만, 유해유기원소는 검출이 되지 않는다. 옥명 매립지 지하수의 수질유형은 Na-SO₄형으로서, 서울난지도, 부산석대 등의 일반 생활폐기물 매립지의 Na-Cl형과 구별된다. 현재까지 확인된 지하수 오염 범위는 매립지 입구에서 서쪽으로 약 120 m 떨어진 곳이다. 앞으로 침출수들이 매립지 주변지역으로 확산되는 것을 막기 위하여는 매립지 외곽에 차수벽을 설치하고, 매립지내에는 여러개의 채수정을 개발하여 오염된 지하수들을 주기적으로 양수하여 침출수처리장에서 처리하여야 한다.

Abstract : The Okmyong Waste Landfill which is one of major industrial waste landfills in Korea has been used for 10 years since January, 1988. The groundwater in range of 2~3 km from the landfill is a little acidic and has high concentrations of EC, NO₃, and SO₄ because of acidic rain in Pohang. The groundwater pattern in Piper's trilinear diagram belongs to Ca-SO₄ and Na-SO₄ types, but Ca-SO₄ type is more predominant. The groundwater of five monitoring wells at the landfill area is a little alkaline and has high concentrations of TS, COD, Na, Cl, SO₄, Alkalinity and F because of the effect of the leachates. They also have high heavy metals of Mn, Zn, Pb, Cr, and Ni, but toxic organic compounds are not detected. Their groundwater pattern is Na-SO₄ type, and distinguished from the groundwater pattern Na-Cl types of the Nanjido and the Seokdae Municipal Waste Landfills. The range of groundwater contamination which is validated up to now is about 120m west from the entrance of the Okmyong Waste Landfill. To prevent the dispersion of the leachates to the outside, cutoff walls should be constructed at the boundary of the landfill. Several pumping wells should also be developed at the landfill so that the contaminated groundwater can be pumped and treated at a leachate-treatment plant in the landfill.

서론

옥명 폐기물 매립지는 경북 포항시 남구 대송면 옥명리에 위치하며(Figure 1), 1988년 1월부터 매립되기 시작하여 현재도 산업폐기물의 매립이 진행되고 있다. 폐기물 매립지는 (주)유봉산업에서 초기에 관리를 하다가, 1996년에 (주)아남환경산업에서 인수하여 운영 관리하고 있다. 폐기물 매립지는 11개의 소규모 매립장으로 구분되어 있으며, 현재까지 7개의 매립장에서 매립이 완료되었고, 나머지 2개의 매립장에서 매립이 진행중이다. 제 9 매립장까지의 매립면적은 총 141,033m²(약 42,737평)이고, 매립 예정량은 약 2,372,500m³이다. 현재 2개의 매립장은 차기 매립예정지로 부지 정리 작업중이다.

매립지의 초기 매립형태는 간단히 처리된 산업폐기물을 몇점

의 비닐로 피복된 매립지에 매립하는 단순한 방식이었으나, 최근에 폐기물을 물리·화학적으로 처리하고 차수막(HDPE)이 피복된 매립지에 폐기물 매립과 복토를 병행하여 실시하고 있다. 그러나 1994년 6월 18~19일 양일간에 있었던 폭우로 인하여 제 6매립장 제방이 무너져서, 단순 투기된 액상의 산업폐기물들이 매립장은 물론 인근의 공장과 도로에까지 유출되었다. 따라서 옥명 폐기물 매립장은 산업폐기물들에 의해 매립지의 지하수가 오염되어 있음은 물론이고, 폐기물 유출사건으로 매립장 주변의 도로 및 공장에까지 오염물질들이 확산되어 있을 가능성이 크다.

(주)유봉산업(1995)의 조사자료에 의하면 매립장에서 CH₄, CO₂, NH₃, H₂S 등의 가스와 침출수가 발생되고 있어 주변의 지하수들을 오염시키고 있다. 옥명 폐기물 매립장은 만 10년 동안 사용되고 있으나, 아직까지 침출수에 의한 지하수 오염의 범위와 정도 등에 관한 연구가 체계적으로 진행되지 못한 실정이다. 본 연구에서는 수리지질학적 조사를 통하여 매립지는 물론 그 주변지역에 대해서도 침출수에 의한 지하수 오염의 범위와 정도를 규명하고 지하수오염 제어대책에 대해서도 논의한다.

*부경대학교 지구환경과학부(Division of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

**서울대학교 지질과학과(Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

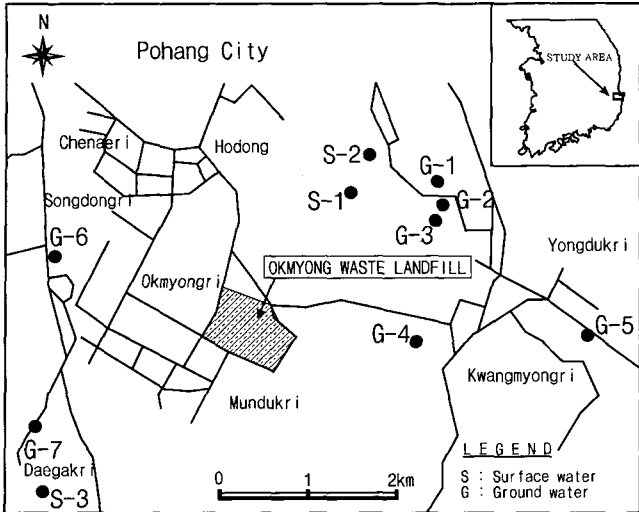


Figure 1. Location map of the Okmyong waste landfill which shows the sample points of surface and ground water.

지질현황

옥명폐기물 매립지 일원에는 신생대 제3기 지질작용에 의한 다양한 지질분포가 나타나고 있으며, 구성 암석 중에서 가장 넓은 분포를 하는 것이 연일층군과 장기층군의 이질암층과 사질암층이고, 하부에는 응회암, 응회질역암 등의 고기 화산암체가 분포하고 있다(국립지질조사소, 1964; 한국동력자원연구소, 1988). 또한 제4기에 해당되는 현무암이나 층적층들이 이들의 지층을 부정합으로 피복하고 있으나 아직 미교결 상태이어서 풍화에 매우 약하여 저지대를 이루고 있다.

폐기물 매립장내에서는 매립장 건설에 따른 사면절토와 암석의 풍화로 인하여 노두의 발달이 양호하지 못하다. 부지 주위에

가장 많이 분포하고 있는 실트질 이암은 옅은 갈색내지 담회색이며, 지층내에 화석이 산출되기도 한다. 매립지 일원의 연일층군에 발달된 층리면의 주향과 경사는 N65°E, 25°SE와 N15°W, 23°SW의 두 가지가 우세하며, 단층의 방향은 N80°E가 가장 많고 EW, N40°W 방향도 여러 곳에서 나타난다(경북대학교 환경과학연구소, 1995). 폐기물 매립지에서는 노두의 발달이 미약하여 큰 구조선의 발달상태를 조사할 수는 없었지만, 절리조사 결과에 의하면 N80°~90°E와 N0°~10°W의 방향이 비교적 우세하게 나타났다.

매립지내의 지하지질 발달상태와 수리지질학적 조사를 위하여 2개의 시험시추가 이루어졌으며, 시추공의 위치는 Figure 2에 표시되어 있다. BH-1 공은 제 6 매립장의 제방에 20 m의 심도로 굴착되었으며, 매립층이 1m이고, 이암의 풍화암이 15 m까지 분포하며, 절리가 발달된 이암이 20 m까지 나타난다. 풍화암은 담회색 내지 암회색이며 모래가 약간 섞인 실트질 점토층이다. 절리면에는 단층작용에 의한 미끄럼면(slickenside)이 나타난다. BH-2 공은 옥명 폐기물 매립지 입구에 위치한 차기 매립예정인 제 10 매립장에 50 m 심도로 굴착되었다. 지질 분포는 1.5 m까지 매립층이며, 이암의 풍화암이 9.0 m까지 발달되어 있고, 절리가 발달된 이암이 50.0 m까지 분포한다. 절리면에는 단층작용에 의한 미끄럼면이 많이 나타난다.

시험시추에 의하면 매립층에는 실트질 점토와 자갈들이 섞여서 나타나며, 풍화암은 담회색 내지 암회색이며 가는 모래가 섞인 실트질 점토층이다. 이암은 곳곳에 풍화가 발달되어 있으며, 단층작용에 의한 파쇄대가 나타난다. 또한 심부 이암에서 반화강암(Aplite)이 맥상으로 나타나기도 한다.

매립지 현황

옥명 폐기물매립지는 11개의 매립장으로 구분되어 있다

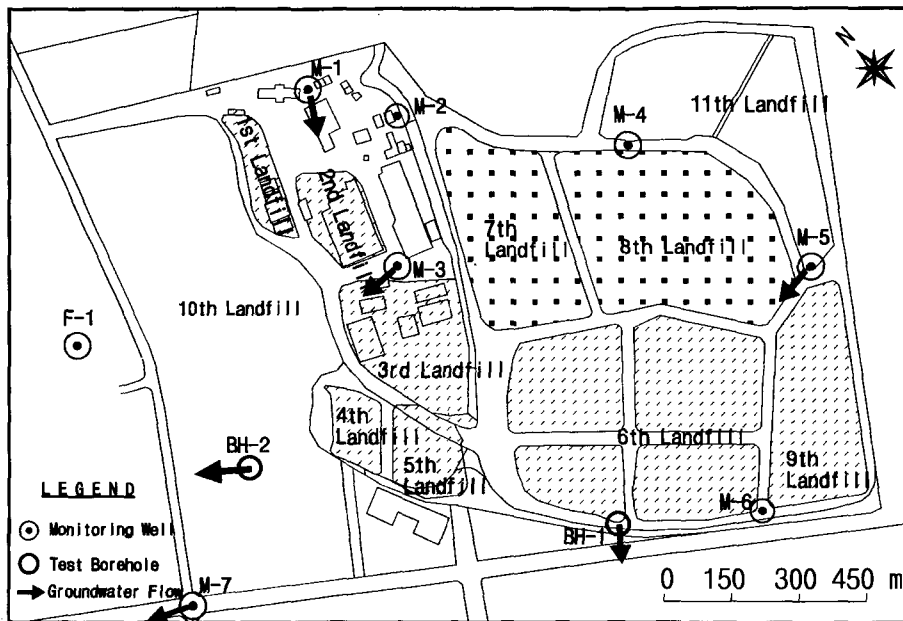


Figure 2. Map of the Okmyong waste landfill comprising 11 small landfills.

(Figure 2). 그 중에서 7개의 매립장(제 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9매립장)은 매립이 완전히 완료되었고, 2개의 매립장(제 7, 8매립장)은 매립이 진행중이며, 최근에 차기 매립예정지로서 2개의 매립장(제 10, 11매립장)이 정지 작업중에 있다. 각 매립지의 특성을 보면, 제 1, 2, 3, 4 매립장은 5~7 m 깊이로 절토하고, 제 5매립장은 10m 깊이로 절토한 후에 단순투기 하거나(제 1, 2매립장), 또는 얇은 비닐을 몇 겹 깔은 후에 폐기물들을 투기하였다(제 3, 4, 5매립장). 제 6매립장은 20 m 깊이로 절토한 후 두께 1.5 mm HDPE를 1겹 깔았고, 제 7, 8, 9매립장은 HDPE를 2겹 깔은 후에 폐기물을 매립하였다.

제 1, 2, 3, 4, 5 매립장은 저지대에 위치하며 매립지 내에 시설물들이 들어서 있다. 각 매립장별 규모와 사용기간은 Table 1에 있다.

지하수 현황

매립지 주변의 지하수

옥명 폐기물매립지 주변의 지하수 현황을 파악하기 위하여 97년 5월과 9월에 매립장에서 반경 약 3 km의 범위내에 있는 하천수와 지하수를 조사하였다. 옥명 폐기물매립지 주변에는 많은 공장이 있으나, 대부분이 상수도를 이용하고 있어서 지하수공이 없거나 간혹 있어도 폐쇄된 상태이다. 따라서 지하수 조사는 매립지에서 멀리 떨어진 비공장지대에서 실시되었다. 조사위치는 Figure 1에 표시되어 있고, 조사결과는 Table 2에 정리되어 있다. 이 지역의 지하수들은 대부분 식수로 이용되고 있고, 우물형태는 수굴정호(dug well)와 시추관정이다. 수굴정호는 대부분 매몰되어 모터를 연결한 후 지상에서 물을 뽑아쓰는 개량형 수굴정호이다. 지표수 및 지하수의 수온은 16.4~20.7 °C 범위이고, pH는 5.56~8.66으로 분포 범위가 넓다. 조사된 지하수중 pH의 변화가 큰 우물은 G-3, G-5, G-7이다. G-3과 G-7은 산성에 가깝고, G-5는 알칼리성에 가깝다. 전기전도도는 167.1~495 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 또 염분도(Salinity)는 0.1~0.2 ppt의 범위에 있으며, 총 10개 수질 중에서 4개가 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상, 7개가 0.2 ppt를 나타내어 타 지역에 비하여 오염지수가 약간 높은 편이다.

매립지의 지하수

포항 옥명 폐기물 매립지에는 매립장에서 발생하는 침출수들의 지하수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 7개의 감시정들(Figure 2)이 개발되어 있으나, 현재는 5개의 감시정(M-1, M-2, M-3, M-5, M-7)에서만 지하수 조사가 가능하고 2개의 감시

정(M-4, M-6)은 매몰되어 있다.

Table 3에 의하면 감시정의 심도는 80~168 m, 양수량은 70~100 $\text{m}^3/\text{일}$, 수중모타의 용량은 2~3 Hp이며, 설치심도는 55~66 m 이다. 감시정내의 수중모타들을 제거하고 1997년 9월 28일 일제히 관측한 지하수위는 지표하 4.5~49.2 m 범위이다. 감시정 M-5는 내부가 붕괴되어 개발 당시의 심도 92 m에서 현재 16 m로 줄어들어 지하수위가 높게 형성되어 있다. 감시정의 심도와 지하수위 자료에 의하면 현재 M-1, M-3, M-7 감시정은 피압대수층에 개발되어 있고, M-5 감시정은 현재 자유면대수층에 형성되어 있다. M-1, M-2, M-3 감시정은 현재도 계속 양수하여 매립지에서 이용하고 있어서 수질이 양호한 편이지만, M-5와 M-7 감시정은 현재 사용되고 있지 않아서 수질이 불량하다. 옥명 폐기물매립지에서 서쪽으로 약 120 m 정도 떨어져 있는 (주)한국아이엠에서 2년전까지 사용하였던 지하수공 F-1은 이 지역 지하수 흐름의 하류구배에 해당되며, 옥명 폐기물매립지에서 발생하는 침출수의 영향을 받고 있다.

감시정 M-1, M-3, M-5, M-7과 시험시추공 BH-1, BH-2의 공내에 유속계 관측을 통하여 연직방향(1-D)의 지하수 유량 및 유량과 수평방향(2-D)의 지하수 유동속도 및 유량을 측정하였다. 이용된 기기는 미국 KVA analytical systems에서 최근 개발한 Groundwater Flowmeter System, 모델 200 GeoFlo^R(1996)

Table 2. Surface and ground waters around the Okmyong waste landfill

Well	Temp (°C)	Ph	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Salinity (g/l)	Depth (m)	Use	Type
S-1	19.1	6.31	453	0.2	-	Public Drinking	Surface Water
S-2	20.1	6.56	368	0.2	-	Unused	Stream
S-3	18.4	6.56	167.1	-	-	Public Drinking	Surface Water
G-1	19.0	6.43	414	0.2	15	Domestic Drinking	Drilled Well
G-2	16.4	6.32	411	0.2	21	"	Drilled Well
G-3	18.3	5.56	361	0.2	-	"	Dug Well
G-4	17.0	7.27	383	0.2	-	Public Drinking	Drilled Well
G-5	20.2	8.66	495	0.2	200	"	Drilled Well
G-6	20.5	7.36	259	0.1	2.65	"	Dug Well
G-7	20.7	5.77	180.7	0.1	400	"	Drilled Well

Table 1. The State of the small landfills comprised in the Okmyong waste landfill site

Contents	1st Landfill	2nd Landfill	3rd Landfill	4th Landfill	5th Landfill	6th Landfill	7th Landfill	8th Landfill	9th Landfill	Total
Area (m^2)	3,300	5,440	3,450	9,350	15,080	35,500	10,672	36,200	22,041	141,033
Waste Quantity (m^3)	16,500	54,400	27,600	187,000	301,600	1,065,000	235,800	194,600	290,000	2,372,500
Used Period	88. 1.26 ~ 88. 8.19	88. 8.20 ~ 89. 3.15	89. 3.16 ~ 89. 7.20	89. 6.23 ~ 90. 7.20	90. 7.21 ~ 90. 11.12	91. 11.13 ~ 94. 4.30	94. 2.24 ~ now	95.12.29 ~ now	95. 3.20 ~ 97. 5.15	88. 1.26 ~ now

Table 3. Monitoring wells and boreholes at the Okmyong waste landfill

Well	Diameter (inch)		Well Depth (m)	Quantity (m ³ /day)	Elevation (m)	Water Level (below Surface, m)	Water Level (above m.s.l., m)	Pump Capacity (Hp)	Pump Depth (m)
	Outer	Inner							
M-1	8	2	108	100	43	35.2	7.8	3	66
M-2	8	2	-	70	43	-	-	2	-
M-3	8	2	168	100	45	49.2	-4.2	3	86
M-5	8	2	92	-	60	4.5 (7.61)	55.5 (52.39)	3	-
M-7	8	2	80	-	40	28.8	11.2	-	55
BH-1	3		20		66.6	7.0	59.6		
BH-2	3		50		30	1.7	28.3		
F-1	8	2	30		38	(11.35)	(26.65)		

*지하수공의 지하수위는 1997년 9월 28일에 측정되었으며, 팔호안의 수위는 1997년 5월 30일에 측정되었음.

이다. Table 4에 의하면 지표면하 50 m까지 연직방향의 지하수 유량은 14.8~16.2 ml/min이며, 수평방향의 지하수 유속은 3.0~8.9 ft/day이다. M-1, M-7, BH-2에서는 2개 심도에서 유속이 측정되었으며, 심도가 깊어짐에 따라 유속이 약간씩 감소하고 있다. 수평방향(2-D)의 지하수 유향은 M-1과 BH-1에서 남남동 방향이고, 다른 측정공에서는 모두 서남서 방향이다. 각 공에서의 지하수 유향이 Figure 2에 표시되어 있다. Table 3과 Table 4에서 지하수 수위 및 지하수 유향을 검토할 때, 폐기물 매립지내의 지하수 유동은 상류구배에 위치한 M-5 일대에서 하류구배에 있는 BH-2 일대로 이루어지고 있다. 이것은 매립지내의 지형적인 변화와 비교할 때도 잘 일치한다.

옥명 폐기물매립지내의 지하수는 매립장의 규모, 시설 및 경과기간 등을 검토해 볼 때, 1990년 말까지 매립이 완료된 단순 매립형의 제 1, 2, 3, 4, 5 매립장에서 발생하는 침출수에 의하여 상당히 오염되었을 것으로 판단된다. 제 6매립장에서도 비록 HDPE를 1겹 깔았지만 시험시추공 BH-1에서 확인한 결과 침출수들이 제방으로 침투하였다. 현재까지 확인된 매립장 주변의 지하수오염 장소는 (주)한국아이엠 지하수공 F-1이며, 이것

은 옥명 폐기물매립지에서 약 120 m 정도 떨어져 있다.

지하수 수질

매립지 주변의 지하수 수질

1997년 6월에 옥명 폐기물 매립장에서 남서쪽으로 2.5 km

Table 5. Chemical analysis of surface and ground waters around the waste landfill (June, 1997)

Components	Unit	Drinking Standard	Surface Water	Ground Water
			S-3	G-7
Temperature	°C		18.4	15.5
pH		5.8~8.5	6.56	6.14
EC	µS/cm		167.1	217
Na	mg/l		31.19	27.93
Mg	"		12.02	10.03
K	"		4.57	5.99
Ca	"		22.54	21.74
Cl	"	150	11.84	19.57
NO ₂	"		n.d.	n.d.
NO ₃	"		0.70	6.28
PO ₄	"		n.d.	n.d.
SO ₄	"	200	49.18	65.06
F	"	1.5	n.d.	n.d.
Br	"		n.d.	n.d.
As	"	0.05	<0.05	<0.05
Sc	"	0.01	<0.05	<0.05
Fe	"	0.3	<0.05	<0.05
Al	µg/l	200	22.80	20.10
Cr	"		1.12	0.89
Mn	"	300	7.45	2.03
Co	"		0.10	0.11
Ni	"		2.86	2.36
Cu	"	1000	7.11	11.20
Zn	"	1000	20.10	19.50
Cd	"	10	<0.10	<0.10
Ba	"		34.50	70.90
Pb	"	50	0.52	0.53
U	"		<0.10	<0.10

Table 4. Flow rate, flow direction and flow velocity of groundwater in monitoring wells and test boreholes

Well	M-1	M-3	M-5	M-7	BH-1	BH-2
Depth(m)	36	50	16	39.6	17.0	9.5
Flow Rate (ml/min)	16.2	15.9	15.9	15.7	16.1	14.8
Flow Direction (°MN)	down	down	down	down	down	down
Flow Velocity (ft/day)	8.9	5.7	3.0	5.3	3.7	4.7
Flow Direction (°MN)	161.2	253.8	252.5	255.7	171.6	269.4
Depth(m)	45			50.2		20
Flow Rate (ml/min)	14.8			16.1		16.1
Flow Direction (°MN)	down			down		down
Flow Velocity (ft/day)	7.4			4.5		3.7
Flow Direction (°MN)	169.4			250.9		257.7

정도 떨어진 영일만 온천장에 개발된 지하수 G-7과 지표수 S-3의 수질자료(Table 5)에 의하면 pH는 6.14~6.56의 약산성이고, 일반 양이온류 Na, Mg, K, Ca는 4.57~31.19 mg/l로 보통의 음용수 수질을 나타내고, 음이온류 Cl, NO₂, NO₃, PO₄도 n.d.~19.57 mg/l의 범위로 보통의 음용수 수질이다. 그러나 SO₄는 49.18~65.06 mg/l로 보통의 음용수보다 약간 많은 편이다.

1997년 10월에 조사된 매립지에서 반경 약 3 km 범위의 지하수 및 지표수 수질자료(Table 6)에 의하면, pH는 5.56~8.66이다. G-3와 G-7은 각각 5.56과 5.77의 약산성이고, G-5는 8.66의 약알칼리성으로 음용 지하수 수질에서 벗어나고 있다. EC는 G-6와 G-7을 제외하면 368~495 µS/cm의 범위로 보통의 지하수보다 높은 편이다. 양이온류 Na, Mg, K, Ca는 G-5를 제외하면 0.02~27.0 mg/l로 보통의 지하수 수질이며, 음이온류 HCO₃, Cl, NO₂, NO₃, PO₄는 모두 보통의 지하수 특성이다. 그러나 SO₄는 S-2, G-1, G-2, G-3, G-7이 50 mg/l 이

상으로 우리나라 보통의 지표수나 지하수보다 높다. pH가 산성이고, SO₄가 높은 원인은 포항이 공업도시인 관계로 대기오염이 심하여 발생하는 산성비에 있는 것으로 사료된다. 산성비는 pH가 5.6 이하이며, 주로 화석 연료의 연소에서 발생하는 SO₂와 자동차 배기가스에서 발생하는 NO_x가 대기중에서 복잡한 산화과정을 거친 후 각각 H₂SO₄와 HNO₃로 변하여 나타나는 현상이다(Botkin and Keller, 1995). 중금속류는 거의 모두 보통의 지하수 특성인데, G-5에서만 F가 9.27 mg/l로 다량 검출된다. G-5공은 이질암층에 200m 심도로 개발된 지하수공인데, pH가 8.66, EC가 495 µS/cm, Na가 102.0 mg/l, F가 9.27 mg/l로 침출수에 의한 오염특성을 보여준다. 따라서 G-5의 지하수는 인근에 불법으로 매립된 폐기물의 영향을 받고 있는 것으로 보인다.

1997년 10월의 수질자료를 이용하여 작성된 Piper의 삼각다이아그램(Figure 3)에 의하면 옥명폐기물 매립지 주변의 지하

Table 6. Chemical analysis of surface and ground waters around the waste landfill (Octorber, 1997)

Components	Unit	Drinking Standard	Surface Water		Ground Water					
			S-2	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Temperature	°C		20.1	19.0	16.4	18.3	17.0	20.2	20.5	20.7
pH		5.8~8.5	6.56	6.43	6.32	5.56	7.27	8.66	7.36	5.77
EC	µS/cm		368	414	411	361	383	495	259	180.7
Salinity	g/l		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
Na	mg/l		23.2	23.8	23.1	21.4	36.0	102.0	11.4	7.59
Mg	"		3.28	4.31	4.14	4.61	1.4	0.02	1.47	1.77
K	"		2.60	2.43	2.46	7.06	2.53	2.01	9.99	1.86
Ca	"		21.6	27.0	25.9	14.1	22.6	0.91	14.4	6.22
Total Alkalinity	"		28	30	22	10	52	74	42	6
Bicarbonate Alkalinity	"		18	20	16	2	42	58	20	2
Cl	"	150	27.98	42.28	35.90	36.30	29.42	29.32	20.50	13.20
NO ₂	"		n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
NO ₃	"		20.88	20.53	18.45	17.03	1.88	1.53	13.21	3.35
PO ₄	"		n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
SO ₄	"	200	77.37	74.69	89.57	92.32	29.51	35.02	28.46	52.07
F	"	1.5	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	9.27	n.d	n.d
Br	"		n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
As	"	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Se	"	0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Fe	"	0.3	<0.05	<0.05	<0.05	0.014	0.019	0.008	0.009	0.006
Al	"	200	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cr	µg/l		1.82	2.19	2.20	1.70	26.57	16.00	2.13	1.46
Mn	"	300	-	-	-	-	-	-	-	-
Co	"		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.19	<0.5	<0.5	<0.5
Ni	"		6.59	6.80	5.79	36.31	41.10	9.86	3.61	5.35
Cu	"	1000	18.97	2.49	2.79	4.01	14.35	1.19	2.12	5.77
Zn	"	1000	190.40	48.59	8.11	56.73	144.90	1.51	7.22	15.88
Cd	"	10	<0.5	<0.5	<0.5	0.74	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ba	"		55.85	62.74	61.03	81.78	604.60	1.33	19.77	48.96
Pb	"	50	0.72	<0.5	0.68	1.98	<0.5	<0.5	<0.5	0.67
U	"		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

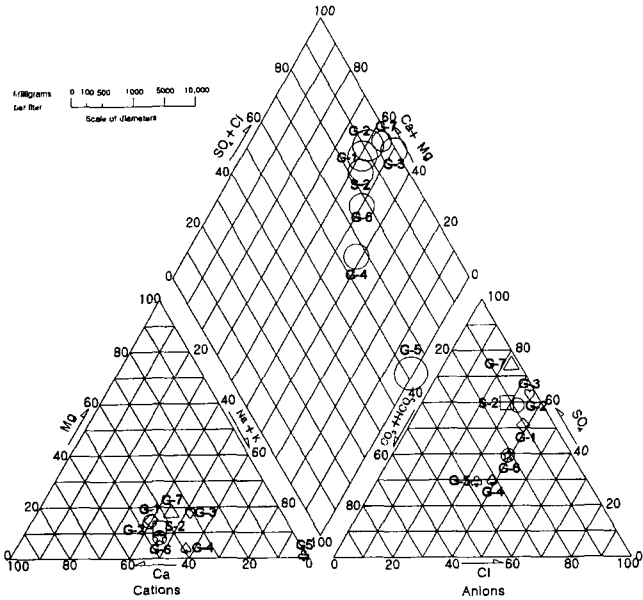


Figure 3. Trilinear diagram for the chemical qualities of groundwaters around the Okmyong waste landfill.

수 수질은 Ca-SO₄형과 Na-SO₄형으로 구분되는데, Ca-SO₄형이 Na-SO₄형 보다 우세하다. 그러나 서울의 난지도와 부산의 석대 생활폐기물 매립장 주변의 지하수 수질은 Ca-HCO₃와 Ca-Cl₂ 유형(Lee et al., 1997, 정상용 등, 1997)이다. 옥명매립지 주변의 지하수 수질과 난지도와 석대 매립지 주변의 지하수 수질 차이는 그들 지역간의 지질 차이에 의해서도 발생되지만, 여기서는 주로 공업지대인 포항의 산성비에서 유래되어지는 것으로 사료된다. 난지도 지역의 지질은 화강편마암(삼성건설주식회사, 1994)이고, 석대지역의 지질은 안산암질암(정상용, 1995), 옥명지역의 지질은 이질암이다.

매립지의 지하수 수질

1997년 6월의 분석자료 (Table 7)에 의하면 M-1과 M-2의 pH는 알칼리성으로 음용수 기준치 8.5를 초과한다. 증발잔유물 (TS)은 M-1과 M-5가 음용수 기준치 500 mg/l를 초과하며, COD는 M-5가 16.8 mg/l로 음용수 기준치 10 mg/l를 초과한다. NH₄-N은 M-5가 0.95 mg/l로서 음용수기준치 0.5 mg/l를 초과한다. NH₄-N은 폐기물의 분해과정에서 발생하는 NH₃ 가스의 영향에 의한 것이다.

물의 주요 양이온 중에서 Na의 함량은 4개의 감시점에서 54.31~80.03 mg/l로 매립지 주변의 지하수보다 모두 높지만, Ca는 M-5와 M-7에서만 각각 90.67 mg/l와 369.2 mg/l로서 주변 지하수보다 높다. SO₄는 163.68~796.72 mg/l의 범위로 매립지 주변의 지하수보다 최소 2배 이상 높고, M-7은 음용수 기준치 200 mg/l를 3배 이상 초과한다. SO₄는 산업폐기물 매립지의 지하수에서 많이 나타나고 있는데, 경기도 화성에 있는 산업폐기물 매립지에서도 SO₄가 매우 높게 나타나고 있다(오석영과 전효택, 1996). F는 0.73~6.59 mg/l이며 M-1, M-2가 음용수 기준치를 4배 이상 초과한다.

중금속류에서는 Al이 45.1~158.0 µg/l의 범위로 음용수 기

Table 7. Chemical analysis of groundwater in the monitoring wells (June, 1997)

Components	Unit	Drinking Standard	M-1	M-2	M-5	M-7	F-1
Temperature	°C		22.5	23.5	16.9	18.0	18.7
pH		5.8~8.5	8.87	8.90	7.33	6.58	7.98
EC	µS/cm		765	717	912	2370	1916
TS	mg/l	500	644	-	817	-	1482
COD	"	10	3.6	-	16.8	-	16.6
Hardness	"	300	10	-	146	-	29
NH ₄ -N	"	0.5	0.42	-	0.95	-	2.72
NO ₃ -N	"	10	0.0	-	0.0	-	11.9
Na	"		62.16	64.45	54.31	80.03	99.87
Mg	"		0.69	0.25	14.63	86.17	5.02
K	"		4.07	3.37	11.74	24.11	15.58
Ca	"		7.45	4.43	90.67	369.20	22.09
Cl	"	150	28.97	26.45	43.07	196.81	259.75
NO ₂	"		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.10
NO ₃	"		n.d.	n.d.	0.49	n.d.	51.30
PO ₄	"		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SO ₄	"	200	182.41	163.68	270.91	796.72	214.55
F	"	1.5	6.59	6.45	1.42	0.73	0.45
Br	"		n.d.	n.d.	1.20	1.40	1.51
As	"	0.05	-	<0.05	-	<0.05	-
Se	"	0.01	-	<0.05	-	<0.05	-
Fe	"	0.3	-	<0.05	-	0.08	-
Al	µg/l	200	67.20	45.10	113.00	158.00	53.20
Cr	"		12.80	8.66	9.15	31.90	24.20
Mn	"	300	1.42	3.78	694.00	4993.00	93.30
Co	"		0.59	0.11	6.06	7.00	0.38
Ni	"		1.66	0.68	60.90	74.50	57.20
Cu	"	1000	1.48	0.64	18.40	3.62	28.20
Zn	"	1000	9.63	3.57	12140.	5075.00	76.60
Cd	"	10	0.40	<0.10	2.31	<0.10	<0.10
Ba	"		26.90	23.80	109.00	134.00	183.00
Pb	"	50	0.23	0.14	90.50	1.35	0.63
U	"		0.33	<0.10	0.17	1.50	1.25
Hg	"	0	n.d.	-	n.d.	-	n.d.
CN	"	0	n.d.	-	n.d.	-	n.d.

준치 200 µg/l를 초과하지는 않지만, 매립지 주변의 지하수에 비하여 상당히 높게 나타난다. Mn은 1.42~4993.0 µg/l이며, M-5와 M-7이 음용수 기준치를 2~16배 초과한다. Zn은 3.57~12,140 µg/l이며, M-5와 M-7이 음용수 기준치를 5~12배 초과한다. Pb는 0.14~90.50 µg/l이며 M-5가 음용수 기준치의 1.8배이다. 기타 Cr, Co, Ni, Cd, U 등도 음용수 기준 범위의 함량이지만, 주변 지하수에 비하여 높게 나타난다. 4개 감시점의 수질을 비교해볼 때 M-5와 M-7이 M-1과 M-2보다 훨씬 오염이 많이 되어 있다. 그 이유는 M-1과 M-2의 지하수는 매일 양수되어 이용되고 있으나, M-5와 M-7의 지하수는 양수되지 않아서 오염물질이 계속 축적되어지고 있기 때

문이다.

옥명 폐기물 매립지에서 서쪽으로 120 m 정도 떨어진 (주)한국아이엘의 지하수공 F-1은 30 m 심도의 암반층에 개발된 지하수공이다. 수질분석자료에 의하면 TS가 1,482 mg/l인 해수의 특성(brackish water)으로 음용수 기준치의 3배에 가깝고, NH₄-N이 2.72 mg/l로서 음용수 기준치의 5배 이상이다. 비반응성물질인 Cl이 259.75 mg/l로서 음용수 기준치의 1.7배 정도이다. 기타 COD, NO₃-N, SO₄ 등이 모두 음용수 기준치를 초과하며, 중금속류의 함량은 모두 음용수 기준치 이내이지만 매립지 주변의 지하수에 비하여 높다. 따라서 F-1의 지하수공은 옥명 폐기물 매립지에서 발생되고 있는 침출수의 영향을 받고 있는 것으로 보인다.

감시정 지하수 M-1, M-3, M-5와 (주)한국아이엘의 지하수 F-1에 대한 유기물분석 자료(Table 8)에 의하면 모두 불검출이다. 따라서 옥명 폐기물 매립장의 폐기물들은 일반생활폐기물과는 달리 거의 대부분이 무기질로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다. 최석규 등(1998)에 의하면 옥명 매립지의 폐기물 성분은 오니류(contaminated sediments)가 17~68%로 가장 많고, 광재류(slags)가 5~27%, 폐사류 1~33%, 금속편류가 1~16% 등이며, 동식물성잔재물은 1% 미만이다.

옥명 산업폐기물 매립지의 지하수 수질특성은 NH₄-N과 SO₄가 서울의 난지도(Lee *et al.*, 1997), 부산의 석대(정상용, 1995; 정상용 등, 1997)에 위치한 일반생활폐기물 매립지의 지하수보다 월등히 높게 나타난다. NH₄-N의 고농도는 NH₃ 가스와의 연관되며, 다량의 SO₄ 이온은 H₂S 가스의 산화(Devanny *et al.*, 1990)와 관련이 있는 것으로 보인다. 최석규 등(1998)에 의

하면 옥명 폐기물 매립장에서 발생하는 NH₃ 가스는 4.36~40.8 mg/l, H₂S 가스는 106.23~659.28 mg/l이다. 옥명 매립지의 가스는 난지도(서울특별시 청소사업본부, 1992), 김포(수도권 매립지운영관리조합, 1993), 그리고 석대(부산직할시 해운대구, 1993)의 일반생활 폐기물 매립장에서 발생하는 것보다 월등히 높다.

1997년 10월에 조사한 감시정 수질분석자료(Table 9)에서도 pH는 7.11~8.78의 범위로 약알칼리성이고, TS, COD, NH₄-N은 음용수 기준치를 초과하고 있다. NO₃-N은 0~3.2 mg/l로 소량이다. 양이온류에서는 Na가 146~337 mg/l로 다량 나타나지만, Mg, K, Ca는 주변 지역의 지하수보다 약간 많이 나타난다. Na가 매립지에서 많이 나타나는 것은 매립지의 일반적인 특성이다. 음이온에서 HCO₃는 45~182 mg/l의 범위로서, 주변 지하수의 2~58 mg/l에 비하여 월등히 높게 나타난다. HCO₃는 주로 매립장의 폐기물 분해에서 발생하는 CO₂가스의 용해에 의하여 지하수에 첨가되는 것으로 보인다. 비반응성 물질인 Cl은 22.07~286.74 mg/l의 범위이고, M-7에서는 음용수 기준치를 초과한다. NO₂, NO₃, PO₄는 미량으로 주변 지하수와 비슷하다. 그러나 SO₄는 141.70~316.66 mg/l의 범위로 다량 함유되어 있으며 M-1과 M-5는 음용수 기준치를 초과한다. 옥명폐기물 매립지에서 NH₄-N, SO₄, HCO₃ 등이 다량으로 나타나는 것은 매립지에서 아직도 NH₃, H₂S, CO₂ 가스들이 많이 형성되고 있다는 것을 뜻한다. 유해 무기원소 F는 M-1, M-2, M-3에서 음용수 기준치를 4~5배 초과하며, 중금속류 중에서 Zn은 M-5에서 음용수 기준치를 2배 이상 초과한다. 기타 Cr, Co, Ni, Ba 등이 주변 지하수에 비하여 높게 나타난다. 감시정들 간의 수질을 비교하면 1997년 6월의 분석결과와 마찬가지로 M-5와 M-7의 수질이 M-1, M-2, M-3의 수질보다 침출수에 의하여 오염이 많이되어 있다. 그 이유는 역시 M-5와 M-7의 지하수는 별로 양수되지 않아서 오염물질들이 축적되어 있기 때문이다.

매립장 내의 지하지질과 지하수 조사 목적으로 개발된 시험 시추공 BH-1과 BH-2의 수질분석 자료(Table 9)에 의하면 제 6매립장 제방에 굴착된 BH-1공의 지하수는 EC가 9850 µS/cm, Salinity가 5.7 ppt(5700 mg/l), Na가 1473.6 mg/l, 비반응성물질인 Cl이 3669.15 mg/l, SO₄가 223.19 mg/l이며, 기타 Br, Ni, Zn, Ba, Pb 등의 중금속 함량이 높게 나타나고 있다. 따라서 BH-1 공의 지하수 수질은 매립장에서 발생하는 침출수이며, 이것은 차수막을 뚫고 흘러나온 것으로 보인다. 1994년 6월 매립장의 붕괴 사고로 한때 침출수들로 덮여 있었던 차기 매립예정지 제 10매립장에 굴착된 BH-2 공의 지하수는 15 m와 35 m 지점에서 채취되었다. 두 심도의 지하수 수질을 비교하면 35 m 지점의 지하수가 더 많이 오염되어 있다. BH-2 공의 지하수 수질특성은 TS, COD, NH₄-N, Na, SO₄, F, Cr의 함량이 아주 높아, 아직도 침출수의 영향을 많이 받고 있다는 것을 알 수 있다.

1997년 10월에 분석된 폐기물 매립지내의 지하수 수질을 이용하여 작성된 Piper의 삼각 다이어그램(Figure 4)에 의하면 감시정과 시험 시추공의 수질은 완전한 Na-SO₄ 유형이다. 그러나 서울의 난지도와 부산의 석대 생활폐기물 매립장에서 발생하는

Table 8. Chemical analysis of organic compounds in the groundwater of monitoring wells (June, 1997)

Components(mg/l)	Drinking Standard	M-1	M-3	M-5	F-1
Alkyl Benzene Sulfonate (ABS)	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Phenols	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
Total Trihalomethane (THMs)	0.1	0.000	0.000	0.000	0.000
Diazinon	0.02	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Parathion	0.06	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Malathion	0.25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Fenitrothion	0.04	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Carbaryl	0.07	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1,1,1-Trichloroethane	0.1	0.000	0.000	0.000	0.000
Tetrachlorethylene	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000
Trichloroethylene	0.03	0.000	0.000	0.000	0.000
Dichloromethane	0.02	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzene	0.01	0.000	0.000	0.000	0.000
Toluene	0.7	0.000	0.000	0.000	0.000
Ethylbenzene	0.3	0.000	0.000	0.000	0.000
Xylene	0.5	0.000	0.000	0.000	0.000
1,1 Dichloroethylene	0.03	0.000	0.000	0.000	0.000
Carbon tetrachloride	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000

Table 9. Chemical analysis of groundwater in monitoring wells (October, 1977)

Components	Unit	Drinking Standard	M-1	M-2	M-3	M-5	M-7	BH-1	BH-2 (15 m)	BH-2 (35 m)
Temperature	°C		20.8	22.0	22.1	17.9	16.6	28.0	18.0	18.7
pH		5.8~8.5	8.36	8.72	8.78	7.31	7.11	8.20	7.19	7.23
EC	μS/cm		1010	725	706	1299	1850	9850	1682	2480
Salinity	g/l		0.5	0.3	0.3	0.8	0.9	5.7	0.9	1.3
TS	mg/l	500	635	489	494	783	1218	-	-	2190
COD	"	10	6.0	1.3	1.6	11.4	13.9	-	-	146
NH ₄ -N	"	0.5	n.d.	n.d.	n.d.	0.65	0.01	-	-	1.19
NO ₃ -N	"	10	1.1	0.1	n.d.	1.8	3.2	-	-	0.6
Na	"		200	146	154	224	337	1473.6	216	313.6
Mg	"		1.09	0.06	0.10	13.4	19.4	19.0	4.50	9.23
K	"		4.23	1.83	1.86	12.30	12.00	315	11.40	16.50
Ca	"		12.3	1.98	2.28	48.0	65.7	334	19.8	52.8
Total Alkalinity	"		65	87	216	80	226	63	-	210
Bicarbonate Alkalinity	"		45	64	60	66	182	30	-	170
Cl	"	150	31.53	24.95	22.07	137.14	286.74	3669.15	127.57	78.68
NO ₂	"		1.02	n.d.	n.d.	n.d.	0.99	n.d.	n.d.	n.d.
NO ₃	"		0.69	n.d.	n.d.	1.78	n.d.	0.29	0.33	n.d.
PO ₄	"		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.56	n.d.	n.d.
SO ₄	"	200	314.92	167.86	160.92	316.66	141.70	223.19	168.48	1005.26
F	"	1.5	5.28	6.13	5.31	n.d.	n.d.	-	4.37	2.22
Br	"		n.d.	n.d.	n.d.	1.95	1.08	95.40	0.50	0.38
As	"	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Se	"	0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Fe	"	0.3	0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Al	μg/l	200	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.14	<0.05
Cr	"		23.78	16.27	20.82	29.68	38.32	15.51	52.54	31.48
Co	"		<0.5	<0.5	<0.5	6.32	8.74	6.31	2.32	9.14
Ni	"		17.98	12.45	23.27	78.05	211.00	185.40	52.69	70.62
Cu	"	1000	5.68	1.58	1.77	4.85	4.26	4.96	8.18	5.77
Zn	"	1000	40.07	4.78	99.14	2093.00	1484.00	267.00	47.80	314.50
Cd	"	10	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.70	<0.5	<0.5
Ba	"		69.08	26.41	37.44	89.33	332.20	522.20	207.80	109.70
Pb	"	50	<0.5	<0.5	<0.5	2.85	<0.5	8.30	<0.5	<0.5
U	"		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.20	1.11	4.35	3.93
Hg	"	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-	-	n.d.
CN	"	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	-	-	n.d.

침출수의 수질은 Na-Cl 유형(Lee *et al.*, 1997, 정상용 등, 1997)이다. 따라서 옥명 산업폐기물 매립장과 난지도, 석대 등의 일반생활폐기물 매립장에 매립된 폐기물들의 구성물질이 서로 많이 다르다는 것을 알 수 있다.

지하수 오염제어 대책

포항 옥명 폐기물 매립지 및 주변지역의 지질, 지하수현황 및 지하수 수질조사에 의하면 폐기물 매립지에서 발생되고 있는 침출수에 의하여 매립지내의 지하수는 물론 매립지외곽의 지하수까지도 오염이 진행되고 있다. 따라서 포항 옥명 폐기물 매립

지에서 발생되고 있는 침출수에 의하여 주변의 지하수가 더 이상 오염되는 것을 방지하기 위하여 다음과 같은 조치들이 요구되어진다.

첫째, 감시정을 최소한 4개소 이상 추가 설치하여 지하수위와 수질(pH, 전기전도도, 온도)을 자동기록기를 이용하여 관측하여야 한다. 설치 감시정의 심도는 100 m 이상(매립장의 절삭 깊이의 2배 이상이며, 상당량의 지하수를 포함하는 깊이) 되어야 하고, 위치는 현재 감시정(M-1, M-2, M-3, M-5, M-7)과 중복되지 않으며 지하수의 주흐름 방향이 되어야 한다. 현재 매립장에 있는 수질조사용 감시정들은 시설이 불충분하여 정식 감시정으로는 부족하지만, 보조감시정으로는 활용할 수 있을 것

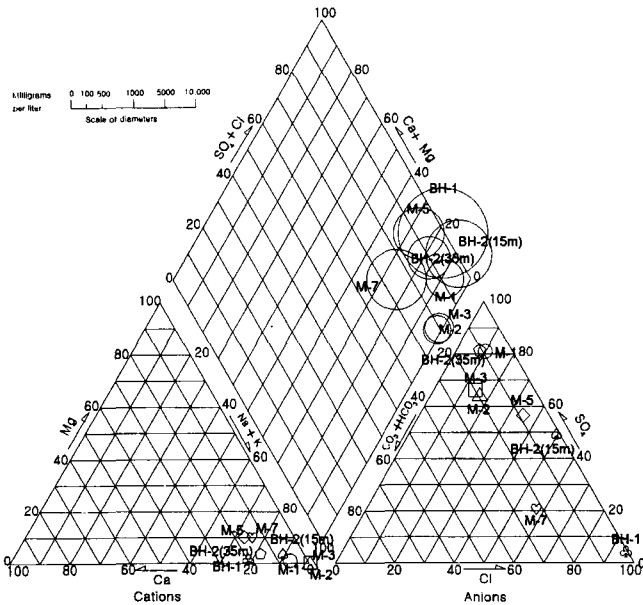


Figure 4. Trilinear diagram for the chemical qualities of groundwaters at the Okmyong waste landfill.

이다.

둘째, 매립지내에서 발생하는 침출수들을 뽑아내기 위하여 지하수 흐름의 하류구배에 최소 3개 이상의 채수정을 개발해야 한다. 채수정에서 뽑아낸 오수들은 침출수 처리장에서 처리한 후에 방류해야 한다.

셋째, 매립지 주변에 차수벽을 설치해야 한다. 현재 매립지에서 발생되고 있는 침출수의 주 유동방향은 매립지 입구에 있는 제 10 매립예정지이며, 현재 이 매립지 밖으로 지하수 오염이 확산되고 있다. 따라서 이 차기매립지와 도로경계 부분에 차수벽이 필요하고, 차수벽의 유형(Slurry trench cutoff-wall, Grout curtain, Sheet piling 등)은 정밀 지질 및 지하수조사 후에 결정한다. 시험시추에 의하면 제 6 매립장 도로쪽의 외곽부분도 소량의 침출수들이 제방 쪽으로 이동하고 있다. 침출수들이 제방 쪽으로 이동하게 되면 제방의 안정성에도 문제가 되기 때문에 앞으로 이곳에도 차수벽 설치가 고려되어야 한다.

넷째, 위의 사항들을 효과적으로 수행하기 위해서는 매립지내의 지하수 분포와 오염현황을 더 상세히 파악해야한다. 이를 위해서는 10개 정도의 시험시추(심도 50 m)가 필요하며, 이를 토대로 수리지질학적인 조사, 지하수유동, 오염물질의 확산 및 침출수 발생량 산정 등이 이루어져야 한다.

결론

포항 옥명폐기물 매립지의 지하수환경 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 옥명폐기물 매립지 일원에는 신생대 제 3기의 연일층군과 장기층군의 이질암층과 사질암층이 넓게 분포하고, 하부에는 응회암, 응회질역암 등이 분포한다. 미고결 상태에 있는 제 4기의 현무암이나 층적층들은 이 지층들을 부정합으로 피복하고

있다. 매립지내의 시험시추 자료에 의하면 매립지의 지질은 이암으로 구성되어 있으며, 이암층에서는 단층작용으로 파쇄대가 나타나고, 또 절리면에는 미끄럼면(slickenside)이 여러곳에서 나타난다.

2. 지하수 유향측정 결과 M-1과 BH-1공에서 지하수의 유향은 남남동 방향이고, M-3, M-5, M-7 및 BH-2공에서의 지하수 유향은 모두 서남서 방향이다. 폐기물 매립지내의 지하수 유동은 상류구배에 위치한 M-5에서 하류구배에 위치한 BH-2 방향으로 이루어지고 있다.

3. 옥명폐기물 매립지에서 반경 2~3 km 범위에 위치하는 비공업용 지하수공은 수굴정도와 시추관정으로 구별되며, 심도가 수 m에서 400 m까지 이른다. 매립지주변 지하수의 수질은 pH가 5.56~8.66, EC는 167.1~495 $\mu\text{S}/\text{cm}$, NO_3 는 1.53~20.88 mg/l, SO_4 는 28.46~92.32 mg/l의 범위이다. 조사된 지하수 중에서 반이상의 지하수가 보통의 지하수보다 이 성분들의 함량이 높게 나타난다. 이러한 원인은 공장지대의 대기오염에 의한 산성비에서 기인하는 것으로 사료된다. Piper의 삼각다이아그램에 의하면 매립지주변 지하수의 수질유형은 Ca- SO_4 형과 Na- SO_4 형으로 구분되지만, Ca- SO_4 형이 우세하다.

4. 폐기물매립지에서 약 120 m 정도 떨어진 지하수공 F-1의 수질은 중발산류물, COD, $\text{NH}_4\text{-N}$, Cl, $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 모두 음용수 기준치를 1~5배 정도 초과한다. 또한 중금속류의 함량은 모두 음용수 기준치 이내이지만, 주변의 일반 지하수 보다는 높다. 따라서 지하수공 F-1은 매립지에서 발생하는 침출수의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

5. 매립지에 있는 5개 지하수 감시정의 심도는 80~168 m, 양수량은 70~100 $\text{m}^3/\text{일}$, 지하수위는 지표하 4.5~49.2 m 범위이다. 이 감시정들의 수질은 pH가 모두 약알칼리성이며, 중발산류물은 489~1218 mg/l로 대부분 음용수 기준치를 초과한다. COD는 M-5와 M-7이, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 M-5가 음용수 기준치를 초과한다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 모든 감시정에서 기준치 이내이다. 양이온 중에서는 Na함량이 147~337 mg/l로서 가장 많고, 음이온 중에서는 Cl과 SO_4 가 음용수 기준치 이상으로 높게 나타나고, Alkalinity가 65~226 mg/l로 주변지하수 보다 월등히 높다. $\text{NH}_4\text{-N}$, SO_4 , Alkalinity의 높은 함량은 매립장에서 발생되고 있는 NH_3 , H_2S , CO_2 가스와의 관련이 있다. F는 M-1, M-2, M-3에서 음용수기준치의 3~4배 정도 나타나고 있다.

6. 매립지 감시정의 수질중에서 대표적인 과다 중금속은 Mn과 Zn이다. 감시정 M-5와 M-7에서 Mn은 2~16배, Zn은 1.4~20배 이상 음용수 기준을 초과한다. Pb는 M-5에서 음용수 기준치의 1.8배 검출되었다. 기타 Cr, Co, Ni, Cd, U 등은 음용수 기준범위의 함량이지만, 주변의 지하수에 비하여 높게 나타난다. 감시정 수질에서 유기물 성분은 모두 검출되지 않았으며, 이것은 매립된 폐기물들이 대부분 무기질로 구성되어 있기 때문이다. 제6매립장 제방에 굴착된 시험시추공 BH-1의 수질은 TS, Salinity, Na, Cl, SO_4 등이 침출수의 특성을 나타낸다. 차기매립예정지인 제10매립장에 굴착된 시험시추공 BH-2의 수질도 TS, Salinity, Na, Cl, SO_4 , F, Cr의 함량이 아주 높아 침출수의 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단된다. Piper의 삼각다이아그램에 의하면 옥명산업폐기물 매립지내의 지하수 수질은

Na-SO₄ 유형이다.

7. 옥명폐기물 매립지와 그 주변의 지하수 조사에 의하면, 매립지에서 발생하는 침출수에 의하여 매립지는 물론 그 외곽으로도 오염이 진행되고 있다. 현재 확인된 지하수 오염범위는 매립지입구에서 서쪽으로 약 120 m 떨어진 (주)한국아이엠의 지하수공이다. 반경 3 km 범위의 주변 지하수공의 수질조사에 의하면, 옥명 폐기물 매립지에서 발생되고 있는 침출수들의 영향이 크게 나타나지는 않았다. 그러나, 옥명 폐기물 매립지에서 발생되고 있는 침출수들이 주변지역으로 더 이상 확산되는 것을 방지해야 하며, 이를 위하여 매립장과 도로의 경계에 차수벽을 설치하고, 매립지내의 침출수들을 정화하기 위한 여러가지 조치들(채수정 개발, 침출수 처리시설 보완 등)이 이루어져야 한다.

사 사

본 연구는 1997년도 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(과제번호: BSRI-97-5407)의 지원에 의하여 이루어졌다. 연구비를 지원해준 교육부에 감사하며 또한, 본 연구수행중 현장조사에 협조하여준 (주)아남환경산업에도 감사한다. 아울러 본 연구에 필요한 지하수유속계를 빌려준 지오택컨실탄트(주)와 수질분석을 수행한 한국표준과학원 기초과학지원연구소(서울분소) 및 경상북도보건환경연구원에도 감사한다.

참고문헌

- 경북대학교 환경과학 연구소, 1995, 폐기물 제 5매립장 지반안정 및 차단형 매립장의 구조물 안전진단 보고서.
- 국립지질조사소, 1964, 한국지질도(1:50,000), 포항도폭.
- 부산직할시 해운대구, 1993, 석대쓰레기 매립장 안전진단 및 사후 환경관리 방안연구 보고서.
- 삼성건설주식회사, 1994, 난지도 매립지 안정화 기본설계 수리지질 연구조사 보고서.
- 서울시 청소사업본부, 1922, 난지도 매립지 환경오염방지 및 안정화 대책 보고서.
- 수도권 매립지 운영 관리조합, 1995, 수도권 매립지(제 1공구) 기반시설 보완(지반 안정성 및 지하수 오염 평가분야) 보고서.
- 오석영, 전효택, 1996, 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성, 지하수환경, 3(1), p. 37-49.
- (주)유봉산업, 1995, 유봉산업 폐기물 매립시설 환경성 검토 및 사후대책 수립 보고서.
- 정상용, 1995, 부산석대 폐기물 매립장 일대의 지하수 오염, 지하수환경, 2(1), p. 1-8.
- 정상용, 권해우, 이강근, 김운영, 1997, 부산석대 폐기물 매립지 일원의 수질환경, 지하수환경, 4(4), p. 175-184.
- 최석규, 박동일, 1998, 폐기물 매립지의 매립가스에 관한 조사 연구 (아남환경산업(주) 포항산업폐기물 처리시설의 환경안정성에 관한 조사연구 보고서 중).
- 한국동력자원연구소, 1988, 지질도폭보고서 어일 (1:25,000).
- Botkin, D. B. and Keller, E. A., 1995, Environmental science, earth as a living planet, 627 pp., John Wiley & Sons.
- Deviny, J. S., Everett, L. G., Lu, J. C. S. and Stollar, R. L., 1990, Subsurface migration of hazardous wastes, Van Nostrand Reinhold, New York, 378pp.
- Lee, K. K., Kim, Y. Y., Chang, H. W. and Chung, S. Y., 1997, Hydrogeological studies on the mechanical behaviour of landfill gases and leachate of the Nanjido landfill in Seoul, Korea, Environmental Geology, 31(3/4), p. 185-198.
- KVA ANALYTICAL SYSTEMS, 1996, Groundwater Flow System, Operations and Maintenance Manual.