

난지도 매립지 주변 지하수환경의 오염 특성에 관한 연구

The Contamination Characteristics of the Nanji Uncontrolled Landfill and its Surrounding Hydrogeologic Environment

이철효(Cheol-Hyo Lee)* · 한정상(Jeong-Sang Hahn)**

요 약 : 난지도 매립지는 바닥차수재나 침출수 차집시설과 같은 오염방지시설이 전혀 설치되어 있지 않은 대표적인 불량 매립지로서 투수성 충적층상에 조성되어 현재 그 인근 지하수와 지표수환경에 심각한 악영향을 미치고 있다. 침출수에 의해 오염된 주변 지하수환경의 오염운(구간) 탐지시 사용할 수 있는 오염지시인자를 결정하고 난지도 매립지를 중심으로 거리별로 설치된 10개의 관측정과 1개의 BTMW*정을 이용하여 물시료를 채취 분석하거나 Electric data logger를 이용하여 그 오염물질의 수직 및 수평적인 분포특성을 파악하였다. 그 결과 온도와 전기전도도는 매립지에서 가까운 지점일수록 높았으며 침출수는 지표하 85 m 지점까지 거동하였다. 오염성분중 전기전도도와 온도는 매립지 인근지에서 오염지시인자임이 판명되었다. 완전스크린설치정(Fully screened well)에서 측정된 오염물질의 심도별 농도는 공내 진구간을 통해 일정하거나 하부구간이 약간 높은데 반해 BTMW에서 측정된 오염물질의 농도는 심도가 깊어짐에 따라 점이적으로 감소하였다. 이는 상하구간이 완전히 관통된 완전스크린설치정에서는 오염물질의 온도나 밀도차이 혹은 침출수의 수직흐름 때문에 농도가 공내에서 평준화되었기 때문이다. 따라서 매립지 인근지역에서 침출수의 수직 및 수평분포상태나 그 거동을 규명하기 위해서는 BTMW나 다점시료 채취정(multi level sampling well)을 이용하여 물시료를 채취 분석한 값을 이용해야 한다.

Abstract : The Nanji landfill is one of the biggest uncontrolled landfill in terms of its size and scale in the world. Because the landfill was constructed on the very vulnerable alluvial deposit installing no pollution control systems such as bottom liner and leachate collection systems, it has caused a serious adverse effect to near-by groundwater and surface water systems. A through remedial investigation comprising plume detection and site-characterization was performed to design the remedial measure. As a part the investigation, comprehensive water quality study was conducted, using ten existing observation wells and one bundle type monitoring well, to determine the contaminant indicators for the plume delineation and to define the vertical and horizontal variation of specific contaminants via distances from the landfill. The results clearly shows that EC and temperature are a good pollution indicators and the vertical concentrations of specific contaminants measured in the fully screened wells are 20 to 90% more than those measured at the same depth in bundle type well which is located just 2 m apart. This paper presents a cost effective monitoring and sampling method to define the contaminant plume and obtain a basic data for leachate control measures.

서 론

난지도 매립지는 1978년 부터 1993년 까지 약 15년간 서울시 일원에서 발생하는 대부분의 일반폐기물과 일부 산업폐기물 및 건설폐자재를 2,720,000 m²의 대규모 면적에 단순 투기형식으로 매립해 온 불량매립지이다. 현재 폐기물 매립량은 92,000,000 m³에 이르며 순수폐기물 매립고는 85 m 이상이다.

본 매립지는 투수성과 오염취약성이 매우 큰 조립질의 모래와 자갈로 구성된 하상충적층위에 바닥차수재나 침출수 집배수

시설이 전혀 설치되어 있지 않은 상태로 조성되어 있어 그 인근 지표수와 지하수계에 심각한 악영향을 미치고 있다. 특히 상술한 충적층은 인구 11,000,000명의 서울시 상수원인 한강 지표수계와 수리적으로 서로 연결되어 있는 하천-충적층계이다. 폐기물 매립지로 이용되기 이전의 난지도는 한강의 사주로서 농경지로 사용되었고, 난지도 북측에 발달되어 있는 셋강은 한강의 사행하천이었다. 매립전 본지역 원지반의 표고는 EL+7.5~10 m 정도이고 현재의 매립표고는 약 EL+95 m이다.

현재 난지도에서 1일 평균 2350 m³씩 발생되는 침출수중 300 m³이 사면의 일부구간을 통해 지표로 누출되거나 용천의 형태로 유출되고 있다. 잔여 2050 m³의 침출수는 하부에 분포된 투수성 충적층과 기반암을 통해 주변 지하수환경으로 유출되고 있는데 한강쪽은 전 침출수 유출량의 48%, 셋강쪽이 31% 및 기타 방향

*삼성건설 기술연구소(Institute of Technology, Samsung Corporation, 677-25, Yeoksamdong, Seoul, Korea)

**연세대학교 지질학과(Department of Geology, Yonsei University, 134 Shinchondong, Seoul 120-749, Korea)

이 약 21% 유출되고 있어 심각한 사회문제를 야기시키고 있다 (Hans Eng., 1994). 매립지 하부에 분포된 층적층은 평균 두께가 20 m 이상이고 평균 수리전도도는 1.9×10^{-2} cm/s이며 평균 비산출율은 0.13인 자유면 대수층으로서 지하수위는 지표면하 1.9 m~6.7 m 정도이다(Seoul City Government, 1992).

따라서 본 층적층은 DRASTIC index가 평균 170을 상회하여 주변의 타 지하수계에 비해 지표오염원에 의한 오염취약성이 매우 크다. 뿐만아니라 층적층 하부의 기반암을 이루고 있는 Pre-cambrian의 변성퇴적암은 심하게 파쇄되어 시추시 코아회수율이 70% 이내이고 RQD가 대체적으로 0%이며 수리전도도는 2.1×10^{-5} cm/s로서 상부층적층과 수리적으로 서로 연결된 파쇄매체이다. 따라서 상부층적층이 오염되는 경우 그 하부 기반암 파쇄매체의 오염은 필연적이다(Hans Eng., 1994).

난지도 매립지는 매립 당시 상당량의 유해폐기물과 슬러지를 일방쓰레기와 함께 혼합 매립하였기 때문에 매립지의 내부침출수의 온도는 다른 매립지보다 높은 50°C~64°C로 고온상태이다. 특히 본 매립지는 close up하기 직전에 매립지 정상부에서 그 하부 약 30 m 구간에 슬러지를 다량 매립했기 때문에 이 구간에서 온도는 60°C 이상이다.

Figure 1은 매립지 정상부에서 매립물의 구성물질을 조사하기 위해서 시굴한 시추공 내에서 측정된 매립지 내부의 온도와 함수비 그리고 침출수와 오염지하수의 온도분포를 도식한 것이다. 매립지 내부의 온도가 고온상태이므로 특히 매립지 정상부의 지면온도가 영하로 내려가는 동기에는 지표면과 매립지 내부구간은 매우 급한 온도구배를 이룬다(Lee, 1994).

따라서 매립지 내부로부터 지표면으로 상승한 고온다습한 증기는 지표면 가까운 곳에서 급속히 냉각, 응축되어 응축수로 변한 후 비포화대 내에 상위포화층을 이룬다. 고온의 매립가스가 응축되어 형성된 상위포화대는 온도구배나 표면에서 매립지 내로 침투되는 강수량에 따라 그 두께가 변하며, 또한 매립가스의 압력과 매립층의 구성물질 및 침투되는 강수량에 따라 일정한 상위포화대를 유지하면서 일종의 부유침출수층(floating water layer, in other word, perched leachate layer)을 형성한다

(Figure 7 참조) (Chrestensen et al., 1992).

고온의 증기는 따뜻한 곳에서 찬 곳으로 이동하는데 반해 물은 찬 곳에서 따뜻한 곳으로 이동한다(Chrestensen et al., 1992). 따라서 매립지내 상위포화구간의 경계구간에서 포화증기는 하향이동이 저지되어 점이적인 포화구간을 이루게 되고 또한 상, 하부구간에서 침출수는 온도차이 때문에 일종의 부력을 형성하게 되어 모관대가 넓은 범위로 발달하여 함수비를 증가시키고 침출수의 하향흐름을 방해한다.

1994년에 실시된 난지도 매립지 환경수리지질조사 결과에 의하면 난지도 매립지는 정상부의 지표면하 20 m~30 m구간(EL 75 m~65 m)사이에는 전술한 부유 응축침출수층이 존재하고 그 하부 55 m~60 m구간(EL 35 m~40 m)에는 기저침출수(basal leachate)가 널리 분포되어 있음이 밝혀졌다(Samsung Construction Co., 1994).

본 연구는 매립지의 침출수 수질특성과 현재 매립지 주변 지하수환경으로 과거 15년간 계속 누출되고 있는 침출수의 분포상태와 주변 지하수환경의 오염현상 및 물시료 채취정의 적정성 여부를 연구 검토하려는데 있다.

연구내용과 방법

대표 관측지점의 위치와 관측정의 구조

매립지에서 생성된 침출수가 매립지를 중심으로 하여 그 주변 지하수환경으로 누출되어 나간 현상을 연구하기 위하여 Figure 2와 같이 매립지 주변에 기 설치한 총 10개소의 관측정과 한강수와 셋강을 합한 12개의 대표 관측지점을 선정 이용하였다.

대표오염원의 수질은 매립지 중심부에 설치된 IB-2 관측공을 이용하였으며 배경수질로는 매립지 상류구배구간에 설치한 S-4 관측정을 이용하였다.

대상 관측정은 매립지 중심부에 설치된 IB-2를 중심으로 하여 한강쪽으로는 침출수의 주 흐름방향을 따라 거리별로 S-13L, PT-1, BTMW, W-2, S-6, S-8 및 한강지표수를 선정하였고, 셋강 방향으로는 IB-2, L-2, S-12 및 셋강을 선정하여 각 관측지점에서 물시료를 채취하여 수질분석을 실시하였으며 그 결

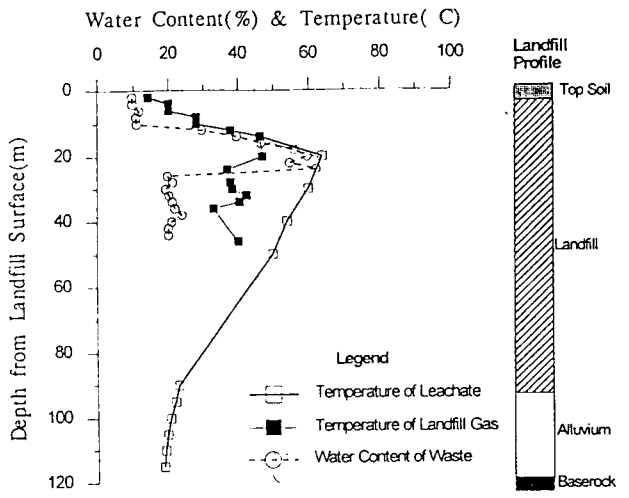


Figure 1. Profile of temperature(°C) and moisture content of the Nanji Landfill.

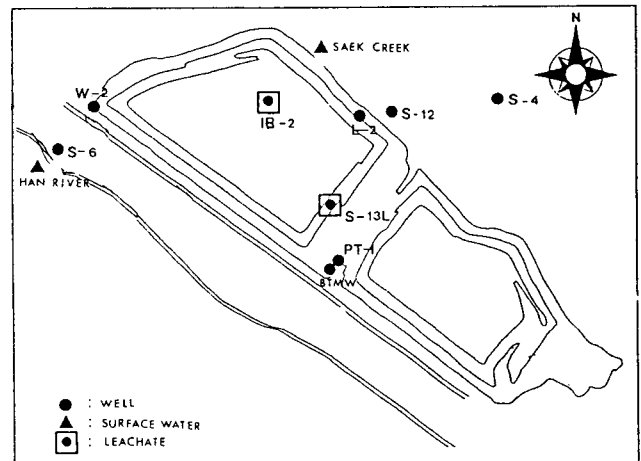


Figure 2. Location of sampling points.

과를 이용하여 매립지 중심부로 부터의 수평거리별 수질변화 상태와 이와 병행하여 수직구간별 오염지하수의 수질변화 특성을 파악하였다.

선정된 대표 관측정중 S-13L과 L-2 지점은 1매립지 사면에서 누출되고 있는 침출수 용천이며 한강과 샛강은 매립지 주변의 지표수이고 대표지층별 수직구간별 수질특성과 수두를 측정하기 위해 설치한 BTMW정으로서 그 구조도와 수위는 Figure 3과 같다.

각 관측정의 세부 설치사양과 심도는 Table 1과 같다.

이중 PT-1과 W-2는 양수정으로 사용한 시험정으로서 우물경이 8"이고 심도가 각각 60m와 37.5m로써 기반암을 관통하였으며 S-series의 관측정은 3"로 굴착하여 2"의 PVC 스크린을 설치한 관측정으로 모두 기반암을 관통하여 설치하였다(Table 1).

물시료 채취 및 수질 측정 방법

물시료 채취지점으로 이용한 S-series 관측정은 모두 굴착 전

구간에 스크린을 설치한 완전스크린설치정으로서 공내 특정 심도에서 Ø2" REDA 펌프를 이용하여 물시료를 채취하여 분석한 수질분석 결과는 심도에 무관하게 일정한 값을 나타내고 있다.

따라서 각 심도별 대표지층의 수두를 측정하고 심도별 대표지하수의 수질특성을 파악키 위하여 매립지 경계선상에 BTMW 1개소를 설치하였다.

BTMW는 경Ø2"의 Tricon roller bit를 이용하여 기반암까지 45 m 전구간을 굴착한 후 Figure 3과 같이 피조미터를 각 층마다 설치하고 벤토나이트로 각층을 서로 격리시켰다. 피조미터를 설치한 후 1주일 이후에 Electric data logger를 이용하여 지층의 수두를 측정함과 아울러 매 1 m 씩 공내 전기전도도, pH 및 온도를 측정하였다. 그런다음 BTMW와 2 m 떨어진 지점에 설치한 S-8 관측정[완전스크린설치정(심도 50 m)]의 동일심도에서 REDA 펌프(Ø2")를 이용하여 물시료를 채취하여 물 분석을 실시한 후 완전스크린설치정과 BTMW에서 측정한 특정 오염물질의 농도차이를 서로 비교 분석하였다. 특히 각 관측지점별로 1994년 3월에 공내에서 물시료를 채취하여 수질분석을 실시하여 침출수와 주변 오염지하수 및 배경수질의 특성을 파악하였다.

주요 분석항목과 분석방법은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 1매립지 상부와 1매립지 사면부에서 현재 배출 및 누출되고 있는 침출수와 매립지 상하류 구배구간에 위치한 총 11개 관측지점에서 물시료를 채취하여 수평거리별 심도별 오염상태를 공내에서 측정된 수질검층자료와 대비 분석하였다.

또한 비반응용질인 Cl⁻이온은 주로 희석에 의해 그 농도가 감소되므로 Cl⁻이온의 농도감소율을 이용하여 희석과 기타 농도

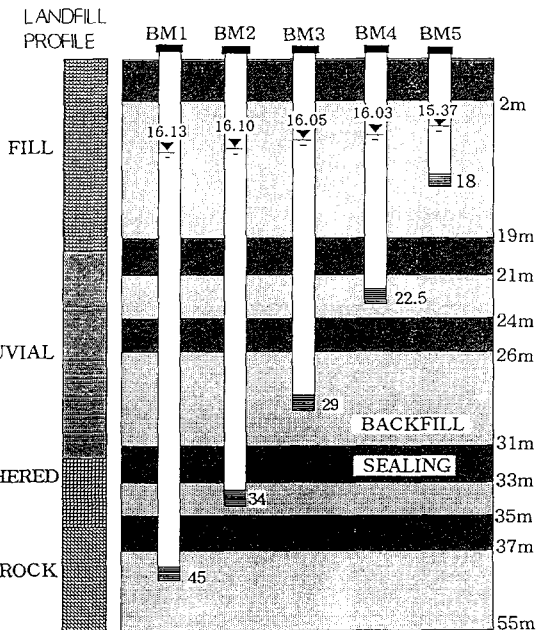


Figure 3. Well configuration of BTMW

Table 2. Main components to be analyzed and analysis method

Components	Analysis method
COD	중크롬산 칼륨 산화법
TOC	TOC analyzer
CL	HPLC
EC	전기전도도계와 CX probe(Hermit)
Fe	원자흡광 분석기(AA)

Table 1. Well configuration and lithology of observation wells in Nanji landfill (Unit : m)

No. content	Subsurface geology					Well configuration		
	Fill of top soil	Upper alluvium	Lower alluvium	Saprolite	Bedrock	Total depth	Well dia. (inch)	Water level (BGL) (m)
IB-2	30	-	-	-	30	30	2	flowing
PT-1	17	5	10	4	24	60	8	16.24
BTMW	19.5	6	7.5	13.5	8.8	45	8	15.39~16.13
W-2	12.7	5.5	15.5	21.0	3.6	37.5	8	12.45
S-6	-	13.5	12.0	2.0	11.5	39	2	3.15
S-12	13.7	7.8	1.3	6.2	10.7	39.7	2	3.83
S-10	2.	7.2	-	7.2	7.5	22.0	2	3.93
S-4	0.3	13.3	-	12.5	6.5	33		1.03
background								

감소원인을 심도별, 수평거리별로 분석 검토하였다.

연구결과와 고찰

공내 온도검층과 분석

매립지 내부의 침출수의 수온은 50~64°C의 고온이다. 따라서 침출수에 의해 영향을 받은 지하수는 비오염지하수(S-4 관측정)의 배경온도에 비해 훨씬 높다. 이러한 지하수의 수평 및 수직적인 온도특성을 정량적으로 파악하기 위하여 본역의 배경수질을 대표하는 S-4 관측정과 매립지를 중심으로 하여 PT-1, S-12 및 S-6 관측정에서 Electric data logger를 이용하여 공내 수직심도별 온도와 전기전도도 변화를 측정한다. 그 결과는 Figure 4와 같다.

S-4 관측정의 지하수면(1.03m)에서 3 m 지점까지의 공내온도는 대기온도의 영향을 민감하게 나타내나 이 지점부터 측정심도인 15 m 사이 구간은 수온이 13.5°C로 일정한 데 이는 지표하 3 m 지점이 본 지역 지하수계의 항온대임을 잘 나타내고 있다.

이에 비해 매립지 경계선상에 설치된 PT-1 시험정의 온도는 지하수면(16.24 m)에서 23°C로 부터 시작하여 암반구간인 30 m 지점에서는 17°C로 서서히 감소하였다. 이는 상부로 부터 고온의 침출수가 하방으로 유입되고 있기 때문이며 본 역의 배경수질을 대표하는 S-4 관측정의 수질 온도 분포와는 전혀 다른 양상이다.

또한 매립지 중심부에서 1175 m 떨어진 지점인 한강변에 설치된 S-6 관측정은 지하수면에서 4 m 지점까지는 대기온도의 영향을 받아 수온이 14.2~15°C 정도이지만 이 지점에서 암반 분포구간인 30 m 지점까지는 거의 일정한 15.3°C인데 이는 배

경온도보다 1.8°C 높다.

또한 매립지에서 634 m 상거하여 상암동 구간에 설치된 S-12 관측정의 수온은 전반적으로 17~17.5°C로서 배경온도보다 월등히 높다.

즉 매립지 인근에 설치된 3개 관측정 모두가 매립지로 부터 거리에 따라 다소 차이가 있긴 하나 측정 전구간의 수온이 배경수온보다는 높으며 매립지에서 가까운 지점이 먼 지점보다 수온이 높다.

특히 PT-1 시험정에서 측정된 심도별 온도변화는 지수적으로 감소하는데 심도(Z)별 수온(T)의 감쇄율은 대체적으로 $T(^{\circ}C)=26.5 \times e^{-0.0095Z}$ 로 표시 가능하다. 상기식을 이용하여 본역의 배경온도인 14°C가 분포된 심도를 구해 보면 약 85 m 정도이다. 이러한 사실은 PT-1 시험정 인근지역에서 침출수에 의해 이미 오염을 받은 심도가 암반구간을 포함해서 약 85 m 구간임을 암시한다.

이상과 같이 고온의 침출수가 발생되고 있는 난지도와 같은 매립지에서는 온도를 가장 탐지하기 용이한 오염의 지시인자로 이용할 수 있으며 온도가 수직적으로 비정상적으로 분포된 구간은 침출수의 주이동구간이다(Lee, 1994).

전기전도도(Electric conductivity (EC)) 측정 및 분석

전기전도도는 오염물질의 이온강도를 나타내는 수질인자로서 물에 용해되어 있는 용질의 총량(TDS)을 나타낸다. 일반적으로 전기전도도는 염류의 함량에 따라 증가하기 때문에 온도와 마찬가지로 현장에서 측정이 매우 용이한 인자이다. 따라서 비오염 지하수는 전기전도도가 매우 낮으나 침출수에 의해 오염된 지하수는 다량의 용존물질과 염류를 함유하고 있으므로 비오염 지하수에 비해 전기전도도가 매우 높고 침출수에 의해 오염정도가 클수록 전기전도도 값은 증가한다. 전기전도도는 온도가 1°C 증가함에 따라 약 2%씩 증가한다(Hem, 1959).

IB-2에서 분출되는 침출수의 전기전도도는 43,400 $\mu S/cm$ 이고 S-4 관측정의 배경 전기전도도는 Figure 4에서와 같이 지표하 8m 항온대에서 200~270 $\mu S/cm$ 였다. 따라서 각 관측지점별로 온도검층과 병행해서 전기전도도를 측정하여 주변 지하수가 침출수에 의해 어느정도 오염되었는지를 조사하였다. 완전스크린설치정의 공내에서 측정된 전기전도도는 심도에 따라 약간의 차이가 있긴 하나 거의 고른 분포를 보이고 있어 포화대 전구간이 전반적으로 오염되었음을 보이고 있다. 특히 매립지로부터 거리에 따라서 전기전도도의 절대값이 서로 상당한 차이를 보이는데 이는 각 지점별로 오염받은 정도가 서로 다르기 때문이다.

대체적으로 매립지에서 거리가 가깝고 침출수의 유출량이 큰 구간일수록 전기전도도의 값이 크다. 특히 한강변에 설치한 S-6 관측정에서 지하수면 하부구간의 온도는 거의 일정한 값을 나타내는데 반해 지표하 12 m 지점부터는 전기전도도가 3100 $\mu S/cm$ 를 상회한다. 이러한 현상은 상암동에 설치된 S-12 관측정에서도 동일한 현상을 보이고 있다. 이는 상기구간이 바로 침출수의 수평적인 주 이동구간이기 때문이다. 이에 비해 매립지 경계면에 설치된 PT-1 시험정은 지하수면과 지표하 27 m 구간에서 전기전도도가 가장 큰 9200 $\mu S/cm$ 이고 하부로 내려감

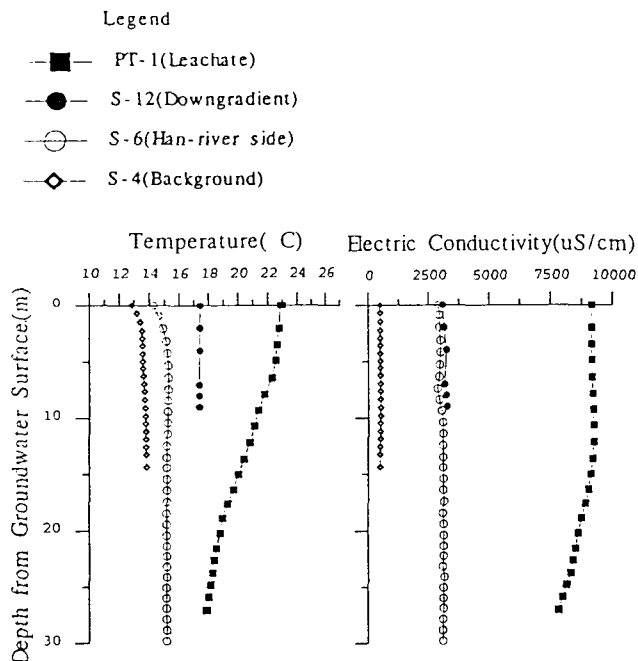


Figure 4. Vertical variation of temperature and EC at the observation wells.

에 따라 전기전도도가 점차 감소하여 지표하 40 m 하부의 기반암구간에서는 전기전도도가 7500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 정도이다. 이러한 현상은 온도검층 결과에서도 동일하게 나타난 바 있어 상부에 소재한 오염원인 침출수가 하방침투하고 있음을 뒷받침해주고 있다.

·비오염 지하수의 TDS와 전기전도도는 지하수의 수온에 따라 약간의 차이가 있긴 하나 대체적으로 $\text{TDS}=(0.55-0.75)\times\text{EC}$ 의 상관관계를 가지고 있다(Hem, 1959). 그러나 난지도 매립지 인근 지하수계에서 측정된 TDS와 전기전도도의 상관관계는 Figure 5와 같이 $\text{TDS}=155+0.39\times\text{EC}(r^2=0.99)$ 이다. 이는 비오염 지하수의 상관관계와는 전혀 다른 양상을 보이고 있다.

일반적으로 전기전도도는 용존고형물(Dissolved solids)이외에 콜로이드 상태나 입자로 존재하는 오염물질이나 침전물 또는 오염된 지하매체의 전기전도도를 종합적으로 나타내는 수질특성인자이므로 현상상태의 지하수 오염정도를 탐지하는데 있어 TDS보다 광범위하게 사용할 수 있는 오염지시인자이다. 뿐만 아니라 전기비저항은 전기전도도의 역수이므로 매립지내에서 침출수의 수두나 침출수에 의해 오염된 지하수의 오염구간(Plume detection)이나 오염정도를 판명하는데 전기 비저항탐사를 사용할 수도 있음을 암시한다.

난지도 매립지 침출수와 지하수의 흐름특성

1994년에 매립지의 최상부구간에서 실시한 전기수직탐사로 부터 취득한 각 매립지의 침출수의 수두와 매립지 주변에 기설치한 다목적 관측 및 시험정에서 측정된 수위자료를 이용하여 매립지내 침출수와 오염지하수 및 그 주변 지하수의 수위등고선도(P.M. map)를 작성한 결과는 Figure 6과 같다(Hans. Eng., and Samsung Const., 1994).

매립지 최상위 포화대구간에서 침출수는 방사상으로 흐르며 매립지 북쪽 및 북동쪽에 위치한 현재의 셋강과 마포쪽은 기존 매립지의 경계선을 따라 불투수성 경계($dh/dx=0$)을 이루며, 침출수와 주변 지하수의 흐름경계선을 이루고 있다. 또한 상암동의 소구릉선상의 정상부도 역시 소규모의 불투수성 경계인 지하수분수령을 이루고 있다.

즉 매립지의 북동단에 부존된 침출수는 셋강쪽으로 유출되어 다시 셋강의 충적층을 따라 흘러 한강으로 유출된다. 뿐만 아니

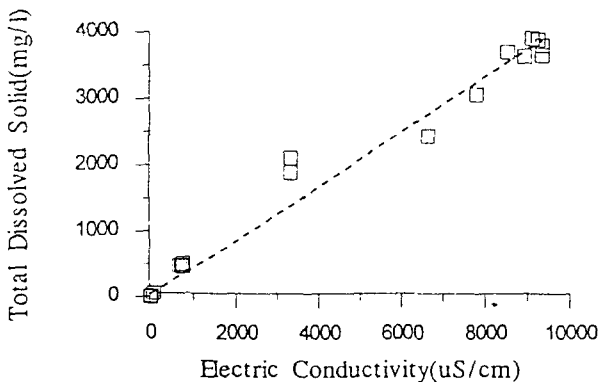


Figure 5. Relation between Electric conductivity and TDS of contaminated groundwater by leachate.

라 서남단의 한강변에 분포된 침출수도 그 동수구배를 따라 남남서향으로 흘러 한강의 충적층 내로 유출되어 최종적으로는 한강으로 배출된다. 따라서 한강은 난지도 매립지에서 발생된 침출수의 최종 배출지이다.

매립지와 하부 지하수환경의 오염특성

난지도 매립지는 매립물질이 매우 불균질하기 때문에 폐기물의 분해상태가 불규칙하고 침출수가 매립층을 통과할 때 매립층의 구성물질이 일정치 않아 그 반응현상도 매우 불규칙하여 침출수의 농도는 채취지점과 채취심도 및 채취시기에 따라 다르다.

Figure 7은 매립층 상부에서 시굴한 50 m 시추공과 PT-1 시험정에서 측정된 COD, Cl^- 및 온도의 수직분포를 합성하여 도

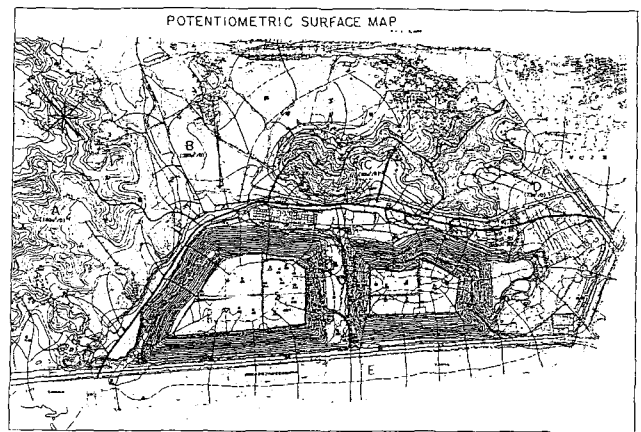


Figure 6. Potentiometric surface map of Nanji landfill site and its environs(1994. 2. 16).

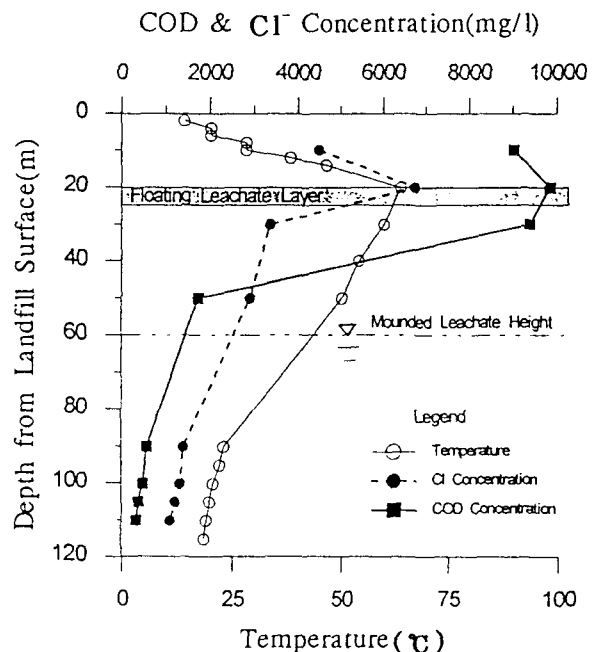


Figure 7. Vertical distribution of specific chemical components and temperature.

식한 것으로 매립지를 폐쇄하기 직전에 매립된 지표면하 30 m 구간은 전술한 바와 같이 분해가 확실히 진행되어 그 온도가 64°C에 이르고 오염물질의 용출이 활발히 진행되고 있다.

고농도의 침출수는 지표면을 통해 하방침투되는 강수와 함께 매립층 내로 하향이동을 하면서 지표하 50 m 하부 구간부터는 비교적 안정된 상태를 보이나 지표하 50~85 m 구간은 주로 연탄재와 토사류로 이루어져 있어 대부분의 오염물질이 흡착, 여과 내지 세척되어 지표하 85 m 하부구간의 충적층 구간에 침출수가 도달했을 때는 침출수의 농도가 상당히 희석된 상태이다.

오염물질의 수평적인 분포

PM map에 의하면 매립지에서 발생된 침출수는 대부분 한강변과 상암동 방면으로 유출되어 결국은 한강으로 배출된다. 이러한 침출수의 방사흐름에 따른 매립지 중심부로 부터의 거리별 오염물질의 농도변화를 규명하기 위하여 1994년 3월에 난지도 매립지의 침출수와 그 주변 지하수의 시료를 채취하여 분석한 수질분석 결과는 Table 3과 같다.

Figure 8은 매립지의 중심부(IB-2)를 기점으로 하여 지하수 유선방향으로 측정된 각 관측지점의 수평거리별 지하수의 농도를, 침출수의 농도를 1로 취했을 때 상대농도로 표시한 것이다.

이중 유기물질을 대표하는 성분중 COD와 TOC, 용존물질을 대표하는 성분인 전기전도도와 이온성물질을 대표하는 Cl 이온농도를 이용하여 매립지로부터 이격거리에 따른 오염물질의 농도를 비교하였다.

Figure 8에 의하면 비반응물질인 Cl이온은 매립지 중심으로부터 수평 이격거리에 따른 상대농도가 타 오염물질에 비해 가장 크며 그 다음이 온도, 전기전도도, TDS이고 반응물질인 COD, TOC 및 BOD는 가장 낮다.

이러한 현상은 COD, BOD 및 TOC로 표현되는 유기물질은 단순한 희석에 의한 농도감소 이외에 매체에 의한 흡착, 생분해에 의한 농도감소 요인이 있는 반면 용존성 오염물질을 대표하는 전기전도도는 오염물질의 흡착, 치환 및 침전 등에 의한 감소 요인이 유기물질보다 적게 일어나기 때문이고 Cl이온은 비반응 물질로서 매체와 타유체와 전혀 반응을 하지 않기 때문이다.

또한 매립지로부터 각 관측지점의 수평 이격거리에 따른 오

염물질의 농도가 어떻게 변하고 있는지를 알아보기 위하여 각 관측지점에서 측정된 성분별 농도와 배경수질(S-4)의 각 성분별 농도를 비교하였다. S-4 관측지점의 배경수질의 각 성분농도를 1로 취했을 시 침출수와 각 관측지점의 상대농도를 도표화한바 그 결과는 Figure 9와 같다(Table 3).

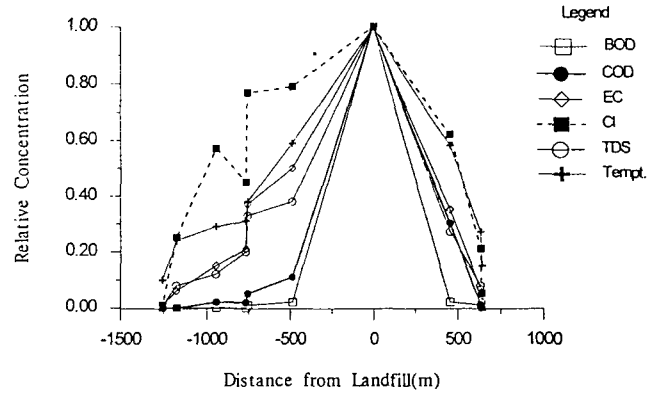


Figure 8. Horizontal distribution and relative concentration of contaminants.

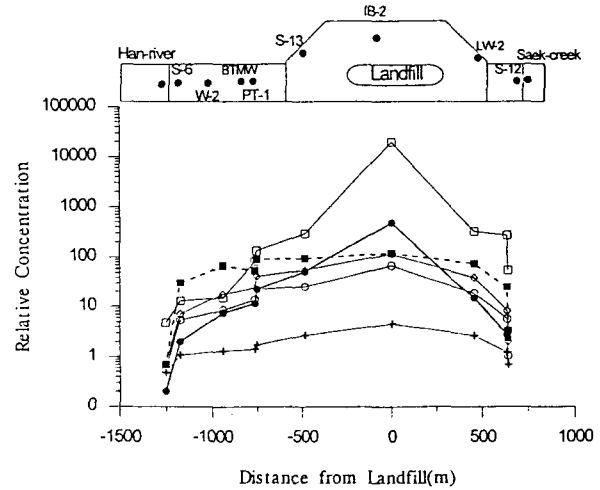


Figure 9. Relative concentration of observation point compared with background quality of S-6.

Table 3. Contaminant concentration of leachate and contaminated groundwater along with distance from center of landfill

Monitoring well	Distance (m)	Temp. (°C)	EC (μS/cm)	TDS	COD	TOC	Cl	BOD	Fe	Remark
IB-2	0	64	43,400	19,650	19,000	6,980	2,905	11,850	3	leachate
S-13L	486	38	21,600	7,400	2,090	580	2,305	180	2.23	leachate spring
PT-1	756	24.5	16,160	6,387	887	509	2,223	81.5	3.6	contaminated groundwater
BTMW	766	20.1	9,120	3,888	451	420	1,320	50	1.57	contaminated groundwater
W-2	945	18.6	6,660	2,431	301	174	1,654	9	63.7	contaminated groundwater
S-6	1175	15.4	2,730	1,560	75.2	40	738.2	7.7	203.5	contaminated groundwater
Han river	1255	6.6	258	154	7.8	20.6	16.7	2.9	0.18	surface water
LW-2	456	37	15,010	5,210	570	132	1,790	194	1.46	leachate spring
S-12	634	17.4	3,080	1,634	111	49	608	162	17.4	contaminated groundwater
S-stream	640	9.8	770	303	94	46.6	80.6	33	1.16	surface water
S-4	-	14.1	381	287	39.6	8.8	24.3	0.6	2.79	background water

Figure 9에서 나타난 바와 같이 매립지로 부터 이격거리에 따른 오염물질의 농도는 Figure 8과 마찬가지로 매립지중심으로 부터 거리가 멀어질수록 농도는 비선형으로 감소한다. 이러한 사실은 난지도의 침출수가 매립지 중심부에서 방사상으로 이루어지며 그 주변 지하수환경으로 거동되고 있으며 최종적으로는 한강과 샛강으로 유출되고 있음을 뒷받침 해주고 있다.

대체적으로 매립지에서 동일거리에 위치한 관측지점에서 각 오염성분별로 농도는 한강쪽이 샛강보다 높는데 이는 한강쪽으로 유출되는 침출수의 유출량이 샛강쪽보다 많기 때문이다.

Figure 10은 매립지에서 한강쪽으로 위치한 각 관측지점에서 수평거리별로 각 오염물질의 농도분포를 도식한 그림인데 오염물질의 함양은 선형으로 감소한다. 이를 이용하여 이격거리별 농도감쇄 관계식을 유도한 바 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4와 같이 매립지의 침출수 성분중 COD는 매립지로부터 약 648 m, TOC는 약 784 m, Cl⁻은 약 654 m 정도 거동된 것으로 계산되며 전체 평균 오염거리는 약 695 m 정도이다.

이러한 사실은 매립지에서 한강까지의 평균거리가 350 m 내외이므로 한강주변의 하류구배구간에 분포된 총적층은 이미 침출수에 의해 상당히 오염된 것으로 해석되었다.

Fe의 농도변화 특성

침출수내에 함유된 Fe의 함량을 1로 취했을시 매립지 주변 지하수내에 함유된 Fe의 함양을 상대농도로 표시한 결과는 Figure 11과 같이 매립지 주변의 한강수와 샛강의 지표수를 제외한 전체 관측지점에서 채취한 지하수중 철의 함양은 침출수보다 훨씬 높고 침출수가 가장 낮았다.

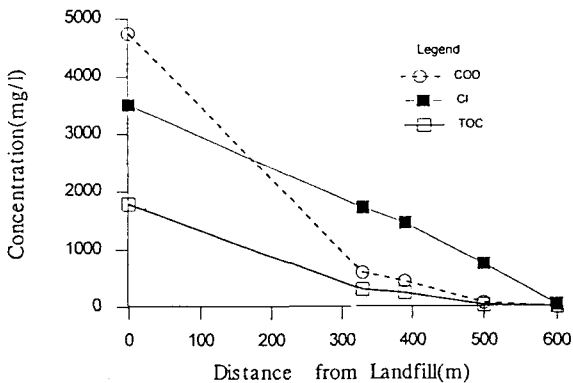


Figure 10. Concentration of main contaminant vs distance from landfill.

Table 4. Experimental regression equation between contaminant concentration and distance from landfill

Contaminant	Equation	상관도	Affected distance(m)
COD	$7515 \times \text{EXP}(-9 \times 10^{-3} \cdot d)$	-0.96	648
TOC	$2424 \times \text{EXP}(-6 \times 10^{-3} \cdot d)$	-0.96	784
Cl	$3477 - 5.14d$	-0.98	654
average			695

일반적으로 매립지의 침출수에 의해 오염된 영향거리 이내에서는 매립지로 부터 거리가 먼 곳에 위치한 지점일수록 Fe의 함량이 높는데 한강변에 위치한 S-6 관측점의 Fe함량은 침출수의 Fe 함량보다 10배 정도높다.

매립지내의 Fe 함량이 낮은 이유는 매립지내 침출수는 알칼리도가 높고, DO가 비교적 낮아 대부분의 철성분은 공극내에 침전하여 Limonite(Fe(OH)₃)와 Siderlite(FeCo₃) 및 Pyrite(FeS₂)로 존재하거나 다른 중금속 성분과 공침 상태로 존재하는데 반해 주변 지하수환경내에서 Fe의 함량이 증가되는 이유는 매립지로 부터 거리가 멀어질수록 pH는 낮아지고, DO는 증가하여 산화환원력이 증가하므로 산화대를 이루기 때문이다 (Figure 12). 난지도 매립지의 철성분 공급원은 대부분 철근을 포함한 건설폐자재와 기타 부식성이 있는 철재 가전제품이다.

BTMW와 완전스크린설치점에서 측정된 오염물질의 수직 분포

완전스크린설치점에서 각 심도별로 Bladder 펌프나 ø 2" REDA 펌프를 이용하여 물시료를 채취한 후 시료내에 함유된 COD, TOC, Cl⁻ 및 전기전도도를 측정하여 완전스크린설치점내에서 각 오염물질의 농도변화를 규명하였다.

Figure 13은 완전스크린설치점중 S-6, W-2, PT-1 및 S-10 관측점을 이용하여 각 심도별로 채취 분석한 COD, TOC, Cl⁻ 및 전기전도도를 침출수의 해당 성분 농도를 1로 취했을시 그 상대농도를 표시한 것이다.

일반적으로 완전스크린설치점에서 수직구간별로 측정된 오

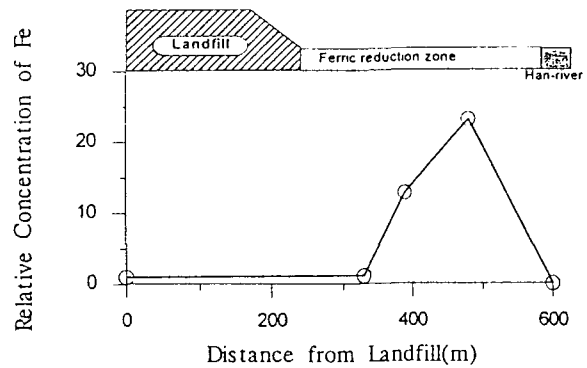


Figure 11. Fe concentration vs distance from landfill.

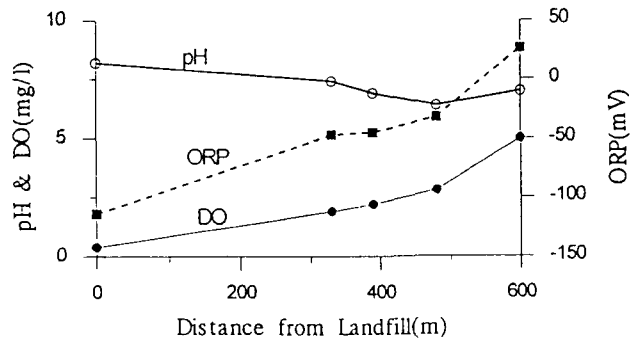


Figure 12. The condition of pH, DO and ORP.

염물질의 농도는 전구간이 동일하였다.

오염원인 침출수는 항상 상부구간에 존재하고 있으므로 관측정 내에서 오염물질의 수직분포는 공내에서 상부구간이 높고 하부구간으로 갈수록 감소해야 한다. 그러나 완전스크린설치정내에서는 이러한 현상을 전혀 발견할 수 없었는데 그 이유는 상하구간이 완전히 관통 연결된 완전스크린설치정내에서는 오염물질의 온도차에 의한 순환작용이나 밀도차이 및 침출수의 수직흐름 때문에 공내에서 오염물질의 농도가 평준화 되었기 때문이다. 이러한 사실을 확인키 위하여 각 대표지층별로

벤토나이트층에 의해 격리된 BTMW정과 BTMW와 2 m 상거하여 설치된 완전스크린설치정인 S-8 관측정 내에서 동일한 심도에서 물시료를 채취하여 각 오염물질의 농도를 측정 비교해 보았다.

Figure 14는 BTMW정의 지표하 2 m, 6 m, 14 m 및 20 m와 S-8 관측정의 동일심도와 지표하 30 m 지점에서 TOC, COD, 전기전도도 및 Cl를 측정된 결과를 도식한 그림으로서 각 지층이 수리적으로 격리된 BTMW에서 측정된 오염물질의 농도는 심도가 깊어짐에 따라 점이적으로 감소하는데 비해 S-8 관측정

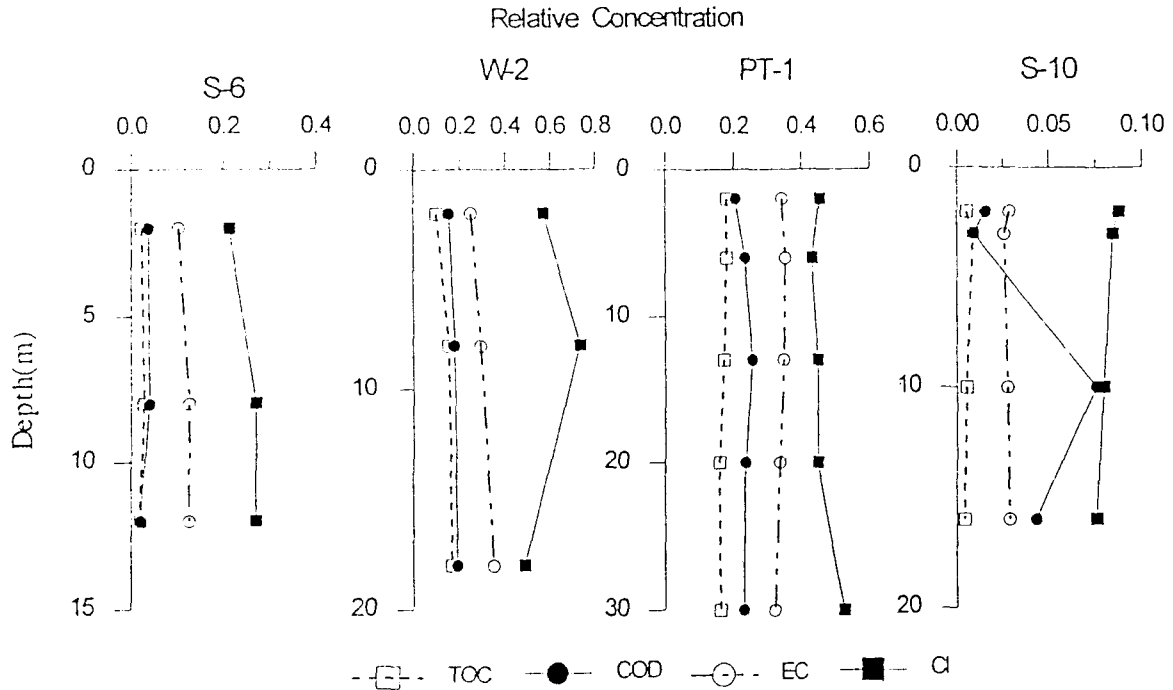


Figure 13. Relative concentration of contaminant measured at the each depth of observation hole compared to leachate concentration of each component.

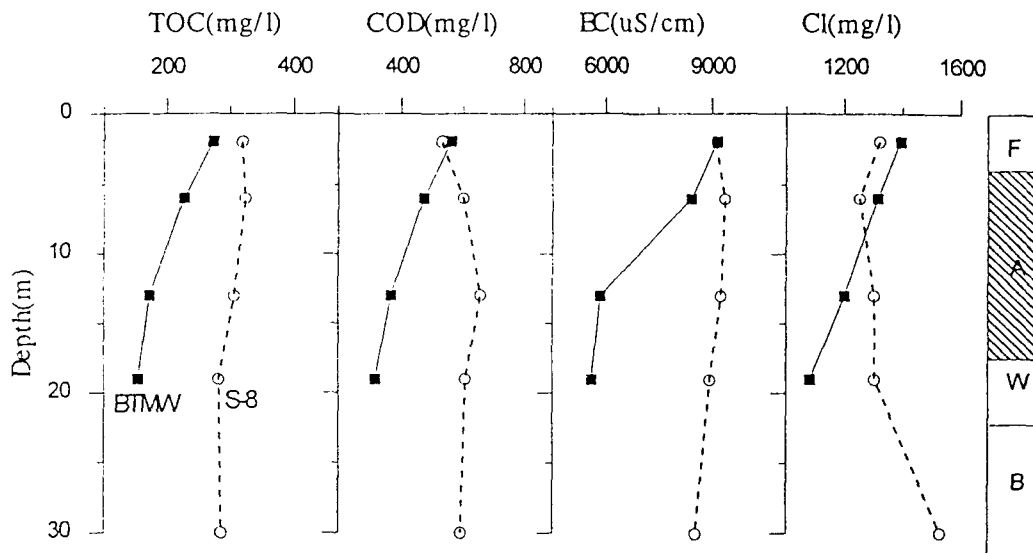


Figure 14. Vertical concentration of contaminant of BTMW and fully screened well(S-8).

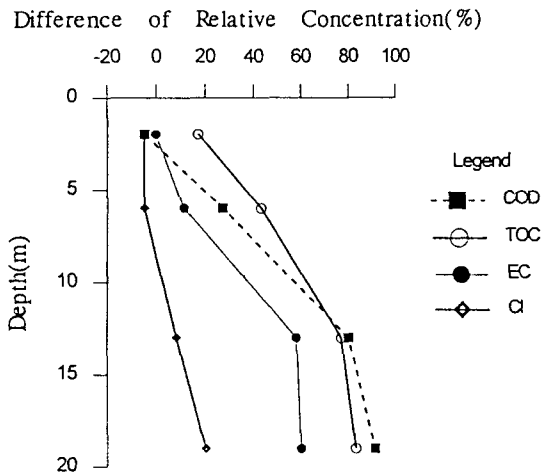


Figure 15. Relative concentration of contaminants with depth.

에서 심도별 각 오염물질의 농도는 거의 일정하다.

BTMW나 S-8 관측정의 지표하 2 m 지점에서 측정된 오염물질의 농도는 거의 동일하다. 그러나 BTMW와 S-8 관측정 내에서 지표하 20 m 지점에서 측정된 COD와 TOC의 농도는 BTMW 관측정이 S-8 관측정에 비해 80~90%, 전기전도도는 약 60%, Cl이온은 20% 정도 낮다.

특히 BTMW 관측정의 심도별 농도감소현상을 파악하기 위하여 BTMW의 2 m 지점에서 측정된 COD, TOC, Cl 및 전기전도도를 1로 취했을시 각 심도별 오염물질의 상대농도를 도식하여 Figure 15에 나타내었다.

Figure 15에 의하면 지표하 20 m 지점에서 순수한 회석작용에 의한 Cl의 농도차이는 2 m 지점에 비해 약 22% 인데 비해 COD와 TOC는 약 45%, 전기전도도는 약 40% 농도가 낮다.

이러한 현상은 COD 및 TOC는 회석작용이외에 생분해작용이나 기타 흡착작용과 같은 제반 반응에 의해 농도가 감소되었기 때문이다.

특히 BTMW에서 측정된 각 지층의 수두는 매립지층이 가장 크고 기반암이 가장 적었으며 그 차이는 0.74 m에 이른다. 따라서 매립층 내에서 생성된 침출수는 상부지층에서 하부지층으로 수직이동되고 있음을 Figure 15는 잘 나타내고 있다.

따라서 매립지나 그 인근지역에서 침출수의 수직거동과 오염물질의 수직적인 분포상태를 규명하기 위해서는 반드시 수직구간의 수두를 측정할 수 있고 격리된 지층에서 물시료를 채취할 수 있는 BTMW나 다점시료 채취정을 이용해야만 한다.

결 론

1. 본 연구지역에서 작도한 PM map에 의하면 매립지에서 생성된 침출수는 방사상으로 흘러 대부분이 한강변과 상암동쪽으로 유출한 후 한강분류로 배출된다. 이러한 침출수의 방사흐름에 따른 매립지 중심부로부터의 거리별, 심도별 오염물질의 농도변화 상태를 규명하였다.

2. 매립지 내부에 분포된 침출수의 온도와 전기전도도는 각각 50°C~64°C와 43,400 μS/cm인데 반해 상류구배구간에 분

포되어 있는 비오염 배경지하수의 온도와 전기전도도는 각각 14°C와 200~270 μS/cm이다. 매립지를 중심으로 하여 거리별로 설치한 관측정에서 거리별 수온과 전기전도도 변화를 측정할 때 매립지에서 가까운 지점이 먼 지점보다 월등히 온도와 전기전도도가 높으며 심도별로(PT-1) 측정된 온도변화는 $T = 26.5 \times e^{-0.0095Z}$ (Z는 심도)의 관계식을 나타내며 본 역의 배경온도인 14°C가 분포하는 심도는 지표하 약 85 m 지점이다. 따라서 난지도 매립지 주변에서 수온과 전기전도도는 오염원 탐지의 지시인자이다.

3. 매립지 중심으로 부터 이격거리에 따른 오염물질의 수평적인 분포특성을 파악키 위하여 각 관측정별로 Cl, 전기전도도, TDS, COD, TOC 및 BOD의 순이다. 이는 COD, TOC 및 BOD는 회석에 의한 농도감소 요인 이외에 매체에 의한 흡착, 생분해 작용 등에 의해 농도가 감소될 수도 있기 때문이다. 또한 매립지에서 동일한 거리에 위치한 관측지점에서 각 오염물질의 성분별 농도를 측정할 때 한강쪽에 위치한 관측정에서의 농도가 셋강쪽의 그것보다 높는데 이는 한강쪽으로 유출되는 침출수량이 셋강보다 약 1.6배 많기 때문이다.

4. 매립지 주변에서 침출수에 의해 이미 오염된 오염지하수의 Fe함량은 침출수 자체의 Fe함량보다 월등히 높으며 매립지로부터 원거리일수록 Fe함량이 높다. 이는 매립지내 침출수는 알카리도가 높고 DO가 낮아 대부분의 Fe성분이 $Fe(OH)_3$, $FeCO_3$, FeS_2 로 존재하거나 타 중금속과 공침상태로 존재하기 때문이며 오염된 주변 지하수의 Fe함량이 높은 이유는 매립지로부터 거리가 멀어질수록 pH는 낮아지고 DO는 증가하는 산화대에 존재하기 때문으로 판단된다.

5. 매립지와 그 인근지역에 분포된 지하지질은 매립층이 최상위층을 이루고 있고 그 다음이 상·하위 충적층, 풍화대 및 파쇄기반암의 순으로 이루어져 있다. 각 지층별로 피조미터를 설치한 BTMW에서 측정된 각 층별 수두는 최상위층인 매립층의 수두가 최하위층인 기반암보다 약 0.74 m 높다. 이는 매립층에서 생성된 침출수가 하부지층으로 쉽게 이동할 수 있음을 의미한다.

6. BTMW나 완전스크린설치정에서 수직적인 수질변화상태를 파악키 위하여 BTMW와 동일한 심도(30 m)로 2 m 상거하여 완전스크린설치정을 설치한 후 각 관측정에서 TOC, COD, 전기전도도 및 Cl을 심도별로 측정하였다. 그 결과 완전스크린설치정에서 측정된 오염물질의 심도별 농도는 전구간이 거의 동일하거나 하부구간이 약간 높는데 비해 벤토나이트로 각층을 격리시켜 설치한 BTMW에서 측정된 오염물질의 농도는 BTMW가 완전스크린설치정에 비해 80~90% 낮고, 전기전도도는 60%, Cl은 20% 낮았다. 이러한 이유는 상하구간이 완전히 관통 연결된 완전스크린설치정내에서는 오염물질이 온도 차에 의한 순환작용이나 밀도차 또는 침출수의 수직흐름 때문에 공내에서 오염물질의 농도가 평준화되었기 때문이다.

7. 따라서 매립지나 그 인근지역에서 침출수의 수평 및 수직적인 분포상태나 거동을 규명하기 위해서 물시료를 채취할 때는 반드시 수직구간의 수두를 측정할 수 있고 각 지층의 시료를 채취할 수 있는 BTMW나 다점시료 채취정을 이용해야 할 것이다.

참고문헌

- Chrestensen, T.H., R. Cossu and R. Stegmann, 1992, *Landfilling of Waste*, p.7-20.
- C.H. Lee, 1994, *Characteristics of Groundwater Contamination by Leachate in Nanji Landfill Site*, M.S. Thesis, Seoul National University, p.5-8.
- Hans Engineering Co., Ltd., 1994, *Hydrogeologic Characterization and Flow and Transport Modeling of Nanji Landfill*, p.36-137.
- Hem, J.D., 1959, *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, USGS Water Supply Paper 1473, p.38-41.
- Samsung Construction Co., Ltd., 1994, *Basic Design of Remediation of Nanji Landfill*, p.30-40.
- Seoul City Government, 1992, *Basic Design Report on Prevention of Contamination and Remediation Action of Nanji Landfill*.
- Kjeldsen, P and T.H. Chrestensen, 1984, *Soil Attenuation of Acid Land Leachate*, *Waste Management and Res.*, 2, p.247-263.