

난지도 매립지의 수리지질학적 자료를 이용한 데이터 베이스 구축 및 활용

Construction and Interpretation of a Hydrogeologic Data Base for the Nanjido Landfill

김윤영(Yoon - Young Kim)* · 이강근(Kang - Kun Lee)* ·
정상용(Sang - Yong Chung)** · 이철효(Cheol - Hyo Lee)***

요 약 : 난지도 매립지는 매립층의 불균질성과 고온의 침출수 및 가스의 흐름이 동시에 복합적으로 일어나는 현상 때문에 수리지질학적으로 매우 복잡한 지역이다. 난지도 매립지의 복잡한 수리지질학적 시스템을 해석하기 위하여 조사 지역의 수리지질학적 자료를 수집하고 이를 바탕으로 지리정보시스템에서 데이터 베이스를 구축하고 이 데이터 베이스를 이용하여 몇 가지 현상들을 분석하였다. 필요한 데이터를 수집하기 위해 디스크-장력 침투계(Disc Tension Infiltrometer)로 불포화대 수리 특성을 추정하였으며 가스 거동 현상을 이해하기 위해 지온을 측정하였다. 불포화대 수리특성과 기상자료를 바탕으로 매립지로의 순침투량을 추정하였다. 이것을 근거로 총 침출수 발생량을 추정하였으며, 기저 지하수면 상부에 분포하는 포화 침출수대, 소위 부유침출수의 생성 메커니즘에 대한 연구도 수행하였다.

Abstract : The Nanjido Landfill has recently become one of the most important environmental sites for a hydrogeological study. Hydrogeological study was performed by understanding the current situation, analyzing hydrogeological information, and constructing a hydrogeological data base. The constructed data base was used for the analyses of several important phenomena in the Nanjido Landfill. Saturated hydraulic conductivity and underground temperature were measured. Based on the hydraulic conductivity and rainfall data, net infiltration rates were estimated. Leachate production rates are estimated by using the data base. The data base and a hydraulic model were used to understand the formation of the so called floating leachate layer.

서 론

1978년부터 1993년까지 서울특별시에서 발생한 각종 도시형 고체, 액체 폐기물들을 난지도에 투기하였고, 그 결과 해발 100 m 높이의 거대한 매립지가 형성되었다. 서울특별시의 인구는 매립 초기인 78년 780만명에서 매립 말기인 92년에는 1,097만명이었으며, 이러한 거대도시에서 발생하는 쓰레기가 이 매립지에 투기되었다. 난지도 매립지는 단일 규모로 세계에서 보고된 어떤 매립지보다 매립량이 많고 또 침출수나 가스 처리시설을 갖추지 않은 불량 매립지로 알려져 있다. 그러나 매립지의 기본 설계, 복토층의 성질, 지하수위 변화, 온도 변화, 가스 발생, 침출수 발생량과 오염 정도 등의 수리지질학적 특성은 데이터 베이스되어 있지 않다. 그래서 가스와 침출수의 이동과 수리지질학적 메커니즘을 체계적으로 이해하는데 어려움이 있다.

이 연구에서는 난지도 매립장의 수리지질학적인 정보 취합 및 정리, 매립지 최상부 불포화층에서 다중-장력 침투계를 이용한 침투 실험, 지하수위 변동 및 가스 분출 추정, 매립장 주변의 지하수 및 침출수의 화학분석, 매립장의 온도 분포 측정 등을 통하여 취합된 자료를 수리지질학적 전·후처리를 거쳐 PC ARC/INFO에서 지원하는 SML(Simple Macro Language)의 형태로 VSFTM(Variable Saturated Flow and Transport Model)이라는 데이터 베이스를 구축하고 항공사진은 IDRISI for Windows에서 데이터 베이스로 저장하였다. 이 연구의 목적은 난지도 매립장의 수리지질학적 자료를 어떤 체계로 데이터 베이스화 하고 기존 지하수와 불포화대 수분이동 모델과 연결하여 구축된 데이터 베이스를 이용해 침출수와 가스의 거동과 관련된 몇 가지 현상을 분석하는 것이다.

연구 지역 특성 자료

매립장의 역사

폐기물 매립이 시작되기 이전 난지도의 모습은 1974년 항공사진에서 관찰된다(Figure 1). 난지도는 한강의 퇴적작용으로 형성된 섬으로 대부분 논과 밭으로 이용되었으며 항공사진 분

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

**부경대학교 응용지질학과(Department of Applied geology, Pukyong National University, 599-1, Daeyeondong, Nam-Gu, Pusan, Korea)

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

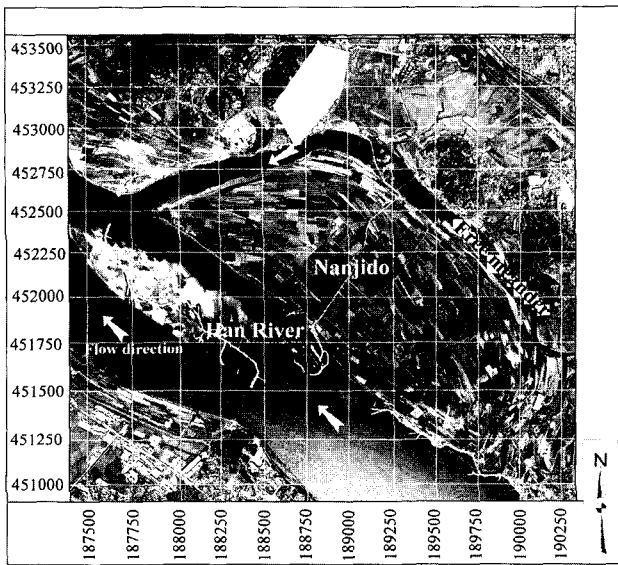


Figure 1. The Nanjido shown in a 1974 airphoto exhibits a flat land surrounded by Han River and a free meander.

석과 토양도에 따르면 난지도의 충적층은 대부분 가는모래로 구성되어 있다. 한강의 하류는 비교적 유속이 완만하며 퇴적작용으로 인해 하상이 높다. 난지도의 쓰레기 매립 전의 고도는 상암동 방향이 해발 10~12 m, 한강 방향은 5~8 m 정도의 높이로 홍수 발생시에는 범람하였다(Korea Ministry of Construction, 1989). 1987년의 항공사진에서는 난지도에서 쓰레기 매립이 제1, 2매립장으로 나누어져 진행되는 것을 관찰할 수 있는데, 이 때 제1매립지 높이는 30~35 m 정도이고 제2매립지는 매립이 진행되지 않고 잔디밭이 조성되어 있다. 80년대 초에 한강 개발 사업으로 난지도와 한강 사이에 자유로가 개통되었으며, 1992년 항공사진에서는 제2매립지의 매립고가 100 m를 넘어선 것을 볼 수 있다. 16년 동안 과다한 매립으로 난지도 매립지는 포화상태에 도달하여 1993년 3월부터는 난지도 매립지에서 쓰레기 매립을 중단하고 서울특별시 생활쓰레기 전량을 김포수도권 매립지에 매립하고 있다.

매립지 매립물의 부피는 항공사진 판독 및 측량 자료 등을 기초로 작성한 정밀 지도를 바탕으로 GIS(Geographic Information System)에서 활용되는 면적과 부피를 계산하는 방법으로 추정하였고, 추정된 면적과 체적은 매립량의 연도별 변화량을 말해준다(Figure 2).

매립물의 형태

난지도 매립장은 그 형태로 볼 때 2개의 쓰레기 봉우리로 되어 있는데 서북쪽 한강 하류 방향의 규모가 큰 쓰레기 봉우리가 제 1매립지이고, 동남쪽의 상류 방향의 것이 제 2매립지이다. 생활폐기물이 주를 이루고 산업폐기물과 하수슬러지가 혼합된 전형적인 불량 매립지이다. 매립 방법은 쓰레기차가 다닐 수 있는 길을 만들고 그 주변에 투기를 하는 형태이다. 이를 불도저가 평탄화를 하면서 매립고를 높여 가면서 매립하였다.

매립층의 하부에는 연탄재, 토사류, 신문지 등이 주를 이룬다.

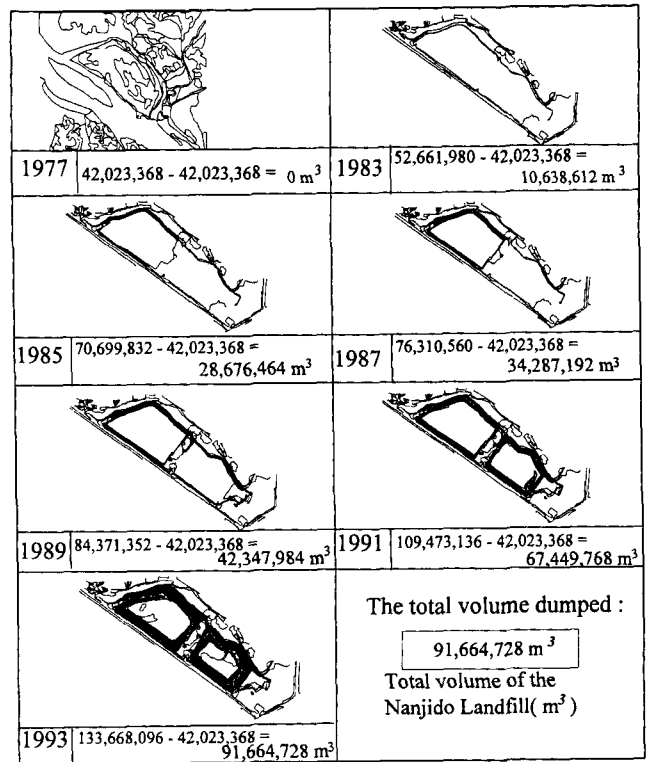


Figure 2. Annual volume change of the waste estimated from the analyses of aerial photographs.

매립지내의 하부의 가정쓰레기들은 모두 부패하여 거의 흔적을 찾아볼 수 없고 생분해는 현재 거의 일어나지 않는 것으로 분석되어 있다. 매립층의 중앙부에는 생활폐기물을 중심으로 각종 산업폐기물이 매립되고 하수슬러지도 일부 매립되었다. 고철, 콘크리트 등의 건축폐기물도 생활폐기물과 같이 매립되었다. 매립지 상부의 생분해 반응에 의한 열과 가스 및 수증기 분출이 있는 지역에서는 지표 온도가 국부적으로 섭씨 67°C까지 상승하는 것을 볼 수 있었다.

복토층의 성격

매립지 중앙부에는 생활폐기물을 중심으로 각종 산업폐기물이 매립되었고 하수폐기물도 일부에 매립된 기록이 있다(Samsung Engineering & Construction, 1994). 이들 위에 고철, 콘크리트 등의 건축폐기물이 토사와 함께 섞여서 매립되었다. 매립중에 복토를 위해 외부 토양을 반입하였고 이들 입자 크기는 점토(Clay)에서 역(Pebble)까지 다양하며 대부분은 모래입자 크기이다. 따라서 난지도 매립지의 상부 토사층은 일반적으로 저투수성의 최종 복토층으로 볼 수 있다.

매립지의 자연환경 특성 자료

난지도 매립지의 자연환경 특성은 매립지 인근 지역의 기후, 지형, 지질, 토양, 수계 등의 특징이 주로 결정한다. 주로 가는모래로 구성된 충적층 위에 바로 쓰레기를 매립하였기에 오염물질의 지하수계 유입을 차단할 시설이 필요했으나 별다른 시설을 하지 않았다. 이러한 관점에서 매립지로 인한 주변 자연

환경, 특히 지하 환경의 변화가 중요하게 취급되고 파악되어야 한다.

가. 기 후

서울기상청의 자료에 따르면 서울지역의 년 평균기온은 12°C이고, 1987년부터 10여년간 년평균 강수량은 1,275.7 mm이다. 특이한 것은 6~8월에 750 mm 정도로 전체의 59%의 강수량을 보인다는 것이다. 겨울의 12~2월에는 75 mm로 전체의 6%에 불과한 강수량을 보인다.

나. 지 형

서울특별시의 서북부에 위치한 난지도는 원래 한강 하도의 충적층과 밀접한 관계가 있는 제4기의 하천 범람지로 이루어져 있었다. 기반암은 선구조들이 발달하는 선캄브리아기의 편마암으로 되어 있다. 인근에서 가장 가까운 산으로 백련산, 인왕산, 북악산이 동북방향에 있다. 인근에는 고도 150~200 m의 구릉성 산지가 발달하였다. 이들 산지 사이에 한강의 지류인 홍제천은 북악산에서 시작하여 서쪽으로 흘러 난지도의 셋강으로 유입되고, 불광천과 녹번천은 은평구에서 남쪽으로 흘러 셋강으로 흐른다. 이들은 모두 한강으로 유입되어 약 50 km 떨어진 서해로 유입된다.

1974년의 항공사진으로 관찰된 한강과 평행하게 흐르는 셋강의 폭은 지금의 셋강의 폭보다는 훨씬 넓은 100~140 m 정도이다. 현재 난지도 매립지의 높이는 제 1매립지는 최고 97 m, 제 2매립지는 최고 104 m 정도이다. 매립지 사면의 경사도 범위는 수평거리와 수직거리의 비가 2:1 정도이고 각도로는 25~27도를 이룬다.

다. 토 양

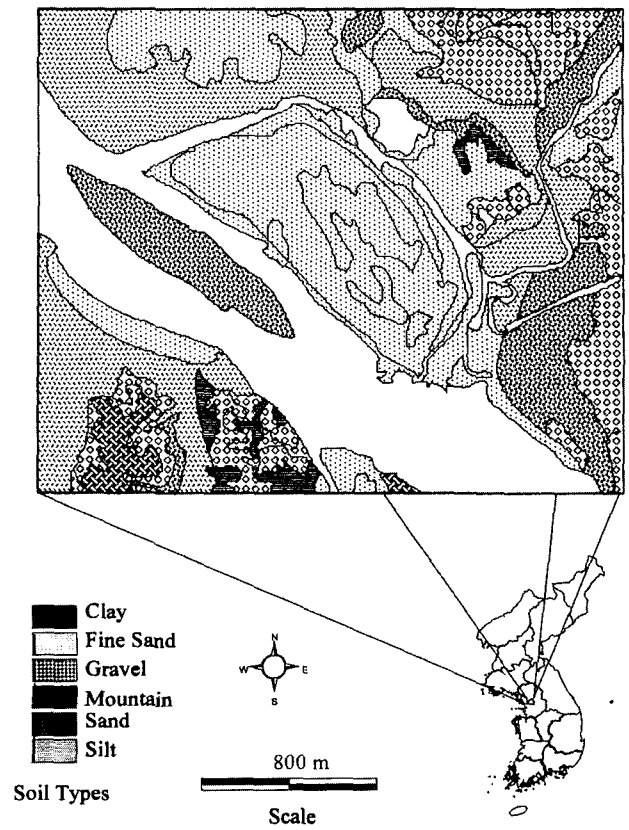
매립전의 항공사진에서 관찰한 토양 분포와 토양도에 따르면 매립지의 하부 충적층은 가는모래로 구성 되어 있고, 한강쪽은 모래 크기의 입자들이 주를 이룬다. Figure 3은 1974년의 매립지 인근의 토양도를 나타낸 그림이다. 투기가 시작되고 매립장내의 복토를 위해서 타지역의 토양을 매립장내로 반입하였다. 이들 입자들의 크기는 점토에서 모래까지 다양하다.

수리지질학적 특성 자료

가. 이전 조사

난지도의 매립이 포화상태에 도달하여 서울특별시는 1993년 3월부터 일반폐기물을 수도권 김포 매립지에 매립하고 있다. 그 이후에 난지도에서 오염 방지 대책과 안정화, 토지이용 등의 사후 환경관리 필요성이 대두됨에 따라 난지도 매립지 환경오염 방지 및 안정화대책 기본 계획을 1992년 12월에 발표하였다. 이에 따라 매립지의 안정화를 위한 기본적인 조사를 시작하였다.

이 조사의 일환으로 1993년 지하수와 가스의 감시정을 설치하고 메탄과 이산화탄소의 발생 및 침출수에 관한 조사가 시작되었다. 토양의 특성 조사를 위해 각종 실내외 실험을 실시하였고 지하수 감시정을 설치하고 수리지질 조사를 실시하였다(Daewoo Corporation, 1993). 이어서 1994년에 삼성건설(주)은 수리지질 조사를 위해 14개의 다목적 관측정과 가스 감시정을 설치하고 침출수 및 가스 발생 특성 등을 조사하였다. 이와 병행하여 하수슬러지 매립장의 매립량 및 성상 등에 대해서 조사가 이루어졌다. 매립지의 유해성 검토를 위해 침출수와 가스



Source : Soil map (1974)
Figure 3. Soil distribution around the Nanjido Landfill before the dumping started.

의 유해성, 부하량 등을 조사하였다. 지하수와 침출수의 관계를 조사하기 위해 순간충격시험, 양수시험, 추적자시험 등이 수행되었다. 이렇게 많은 시험에도 불구하고 복잡한 수리지질시스템과 데이터 베이스의 구축 미비로 자료의 종합과 이에 근거한 수리지질학적인 해석이 이루어지지 못하였다.

1995년에도 난지도 안정화를 위한 침하량 계산, 매립지 전역의 관측정 설치 및 침출수와 지하수의 관계, 추가적인 감시정 설치 및 양수시험, 추적자 실험 등 일련의 수리지질조사를 실시하였다.

야외 조사를 통해 난지도 매립지가 매우 심각한 수리지질학적 환경오염 문제를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이 연구는 난지도에서의 침출수 생성 과정 해석과 지하수 시스템에 유입되는 침출수의 양을 정량적으로 계산하기 위해서 매립장 전반의 수리지질정보를 데이터 베이스로 저장하고 이를 이용하여 불포화 매립층의 수리지질 특성에 대한 분석을 시도하였다.

나. 매립지와 그 주변의 지하수위 변화
 지하수위는 양수정(PT-1)과 다중-수위 감시정(MLMW)에서 측정하였다(Figure 4). 기압영향율(Barometric efficiency)은 대기압에 대한 지하수위의 반응으로 나타낼 수 있다. 이 연구에서 기압영향율에 대한 수위 변화폭은 관측정의 심도에 따라 다르게 나타난다. 거의 자유면대수층에 해당하는 얇은 심도에 스크린을 설치한 MLMW5는 기압영향율이 49.0%이고, 기

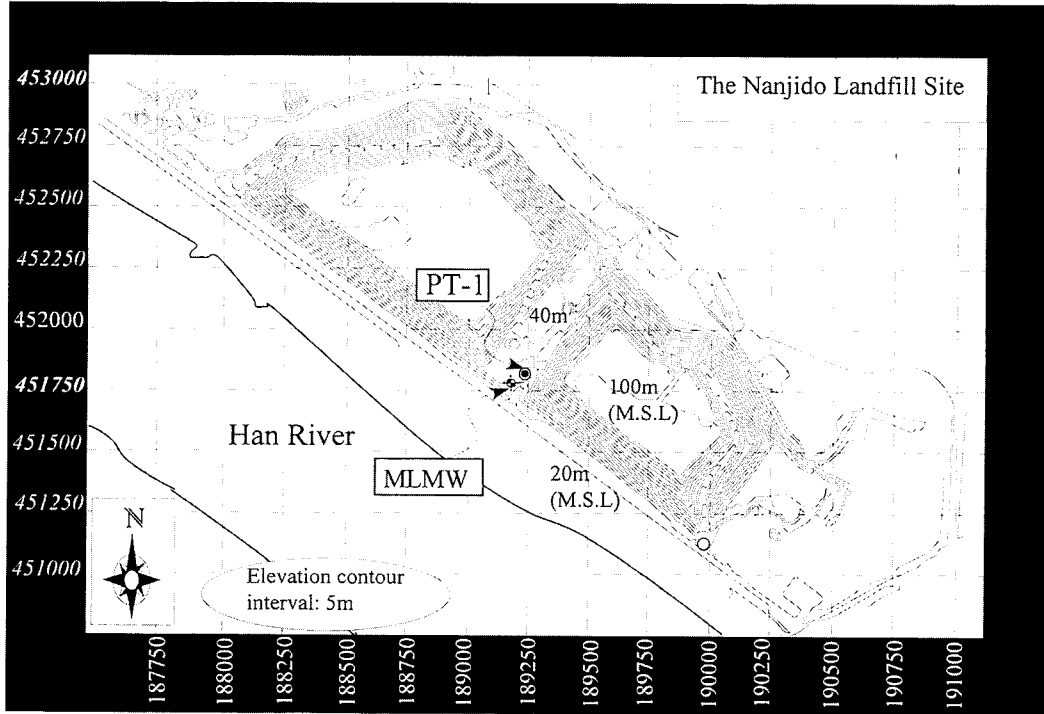


Figure 4. The site map of the PT-1 and MLMW(Multi-Level Monitoring Well).

반암(45 m)에 속하는 심도에 스크린을 설치한 MLMW1은 74.5%까지 나타난다. 반면 매립층에서 기반암까지 전구간에 스크린을 설치한 양수정(PT-1)에서는 62.7%의 값을 나타낸다 (Figure 5).

다. 온 도

매립지내의 온도 분포의 시간과 공간적인 변화를 파악하기 위해 매립지내 121지점을 격자 형태로 선정하여 심도 100 cm의 구멍을 뚫고, 각각 30 cm, 100 cm 깊이에서 지온을 측정하였다. 그리고, 시간에 따른 변화를 측정하기 위해서 하루 동안 온도 변화가 심한 2지점을 선택하여 한시간 단위로 이동식 기압계로 현장기압과 수온 온도계로 대기온도, 그리고 휴대용 온도 측정기로 깊이를 달리하며 지온을 측정하였다.

매립지 전역의 온도 분포를 파악하기 위해 121지점에서 온도를 측정하였으며, 시간적 온도 변화의 영향을 줄이기 위해 각 지점간의 온도측정 시간 간격을 최대한 줄였다. 깊이 30, 100 cm에서 측정한 온도 분포에서 보면 100 cm 심도에서의 최고 온도가 85°C까지 상승하는 지점도 볼 수 있다(Figure 6). 이 지점은 가장 많은 수증기가 발생하는 지역이고 매립 사면이 불안정하고 균열도 발견되는 곳으로 높은 온도는 고온의 매립가스 및 수증기의 영향으로 보인다. 매립지의 지온 분포 양상은 아주 국지적인 분포가 특징적으로 보이는데, 높은 온도를 보여주는 곳은 매립지 표면에서 지하로 발달된 수직 불연속면의 분포와 밀접하게 관련되어 있다. 약 2년 동안 이러한 수직 불연속면을 관찰한 결과는 매립지 전역에 걸쳐서 시간에 따라 그 위치가 변하고 있음이 관찰되었다.

시간적인 변화를 측정하기 위해 온도 차이가 심하게 나는 두 지점을 선택하였다. 온도가 낮은 지점, 즉 가스 발생이 없는 지

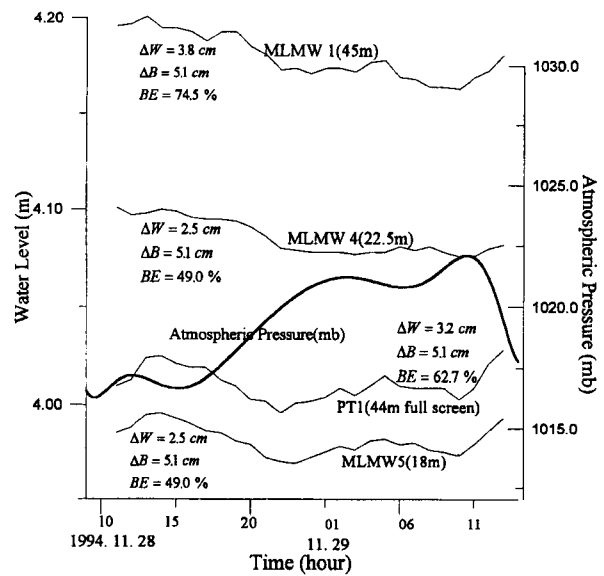


Figure 5. Barometric efficiency calculated from water levels and atmospheric pressure data.

점(Point 1)과 온도가 높게 상승하면서 쪼개진 면에 위치한 가스 분출 지점에서 30 cm떨어진 곳(Point 2)에서 수온 변화를 측정하였다(Figure 7). 깊이 10, 50 cm까지 구멍을 뚫고 온도 측정기의 센서를 문었다.

하루의 온도변화를 토양에서 깊이별로 측정한 결과는 Figure 8(a, b)에서 볼 수 있다. Point 1에서는 온도변화는 깊이가 증가함에 따라 변화폭이 작아진다. 즉 깊이가 10 cm일 때는 대기온도 정점과 세시간의 지연 시간을 보이면서 최고 온도 분포

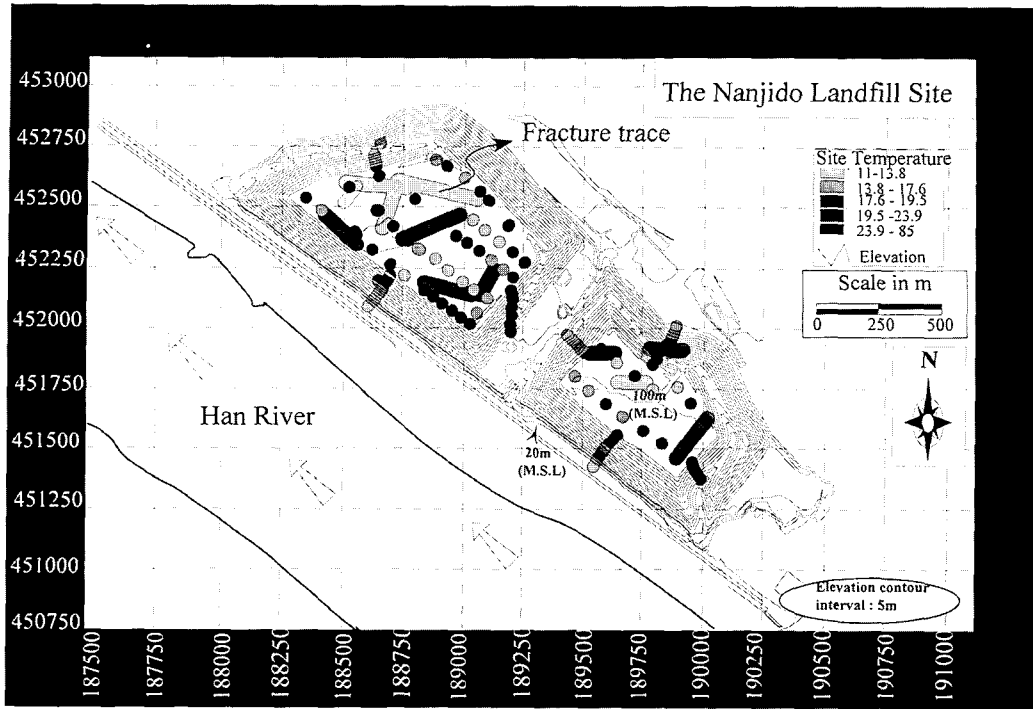


Figure 6. Ground temperatures measured at 1 meter depth and fracture traces on the landfill surface.

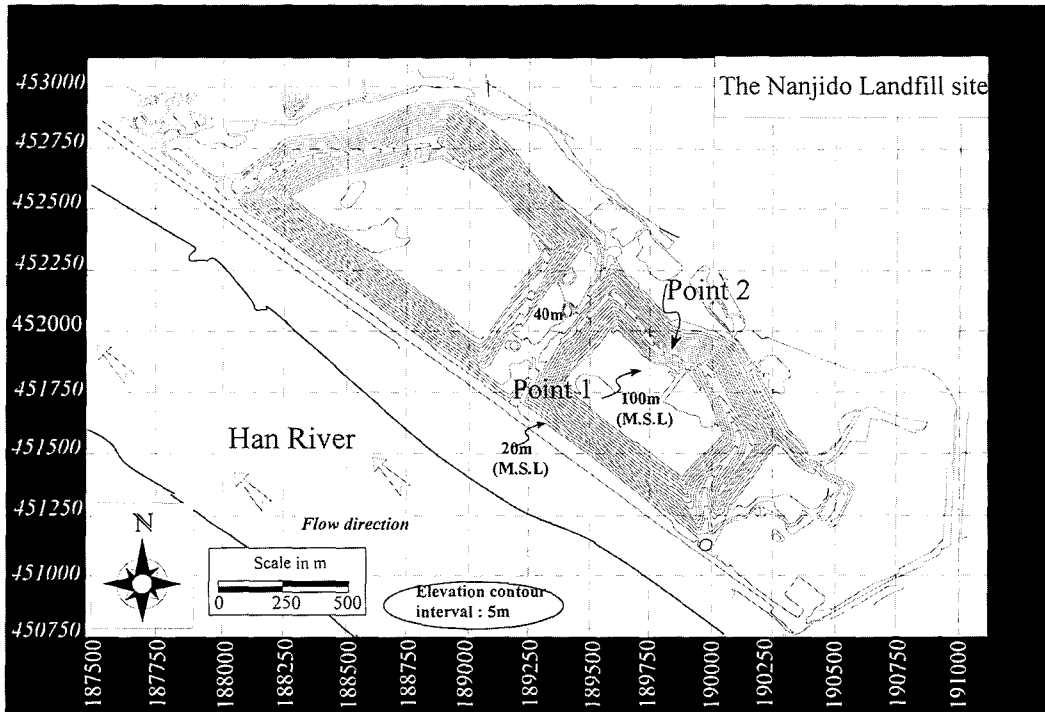


Figure 7. Measurement sites of ground temperature.

를 보이고 변화폭이 크게 나타난다. 깊이가 50 cm일 때는 온도 변화를 관찰하기가 어렵다. 지연시간도 인지가 어렵다. 그러나 Point 2에서는 10 cm, 50 cm에서는 온도가 지표 온도 변화에 영향을 거의 안받는 것을 볼 수 있다. 즉 가스가 분출되는 지역

에서는 깊이 50 cm일 때는 온도의 범위가 시간이 변함에도 불구하고 76°C에서 거의 일정한 값을 보이고 10 cm에서도 40°C에서 일정한 값으로 나타나 지표 온도변화에 영향받기 보다는 가스의 분출에 지배를 받는 것으로 보인다.

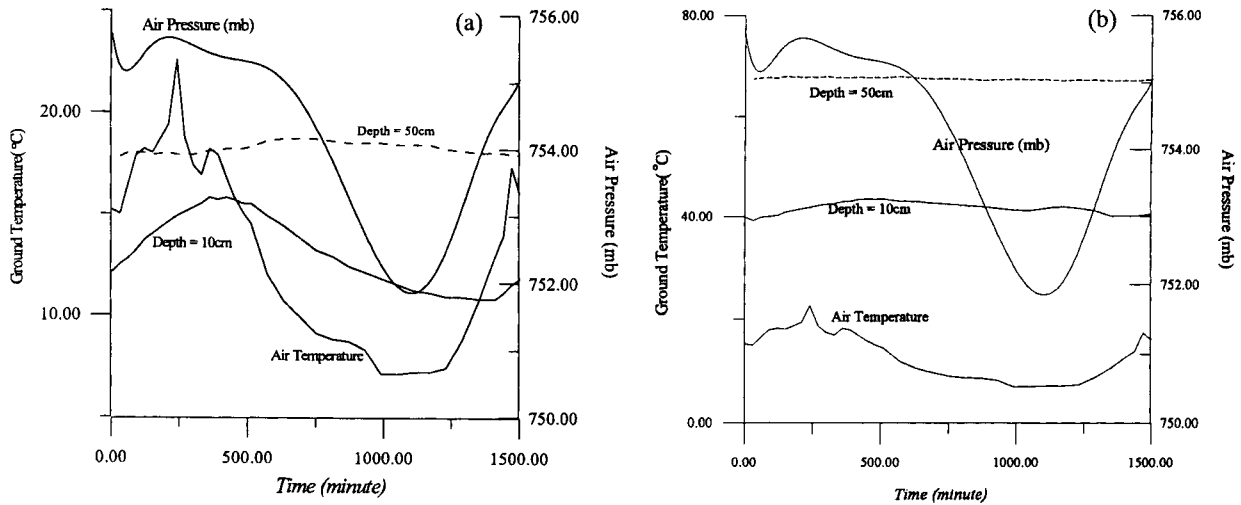


Figure 8. Diurnal variations of ground temperature measured at different depths in the Nanjido Landfill ((a) Point 1, (b) Point 2).

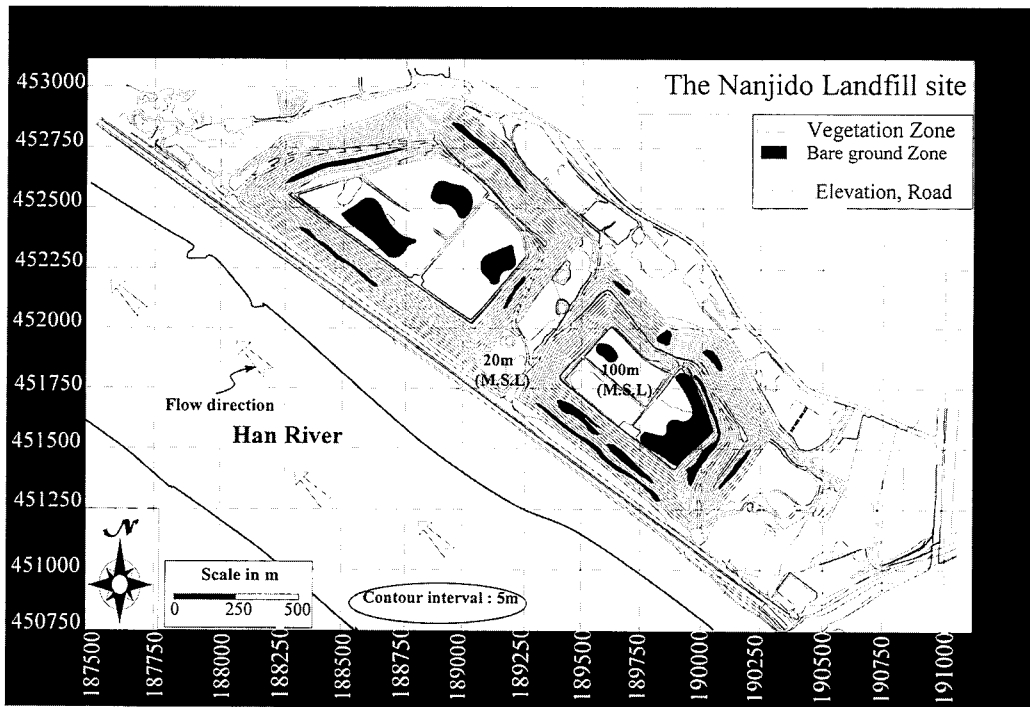


Figure 9. Surface vegetation distribution at the Nanjido landfill.

라. 식 생

1995년 5월 현재 매립지 사면의 침출수 유출지, 가스 발생 지역, 높은 지중 온도 지역에서 주로 식물 성장 정도를 파악하였다. 그 결과 온도 분포가 높은 지역과 침출수가 흘러 나오는 위치에서는 식물이 잘 성장하지 못함을 관찰할 수 있었다 (Figure 9).

기저 지하수와 침출수의 수질분석 자료

Sliding scale Stiff diagram은 이온 성분 분포의 모양의 차이를 비교함으로써 아주 적은 지하수 오염 경향도 분석할 수 있다 (Tonjes et al., 1995). 그리고 같은 수리적 특성을 갖는 지하수

질을 비교하는데도 잘 적용된다.

난지도 매립지의 지하수 오염의 범위가 수평, 수직적으로 변하는 정도를 보기 위해 상류구배 지역의 지하수 및 가정용 우물(K2, K4, K8), 침출수, 그리고 하류구배 지역의 지하수(K14)를 채취하여 분석하였다. 상류구배의 지하수는 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 의 분포 양상이 침출수의 모양과 다를 수 있다. 오염 정도를 많은 자료를 이용해 분석하고자 1994년에 삼성건설(주)에서 분석한 결과를 이용하여 Sliding scale Stiff Diagram에 나타내었다. 일곱 개의 지하수와 한강의 난지도를 기준으로 상, 중, 하류의 지표수, 그리고 네 곳의 침출수 자료를 사용하였다. 심도별 분석을 할 수 있는 관측정에서의 심도별 측정자료와 상

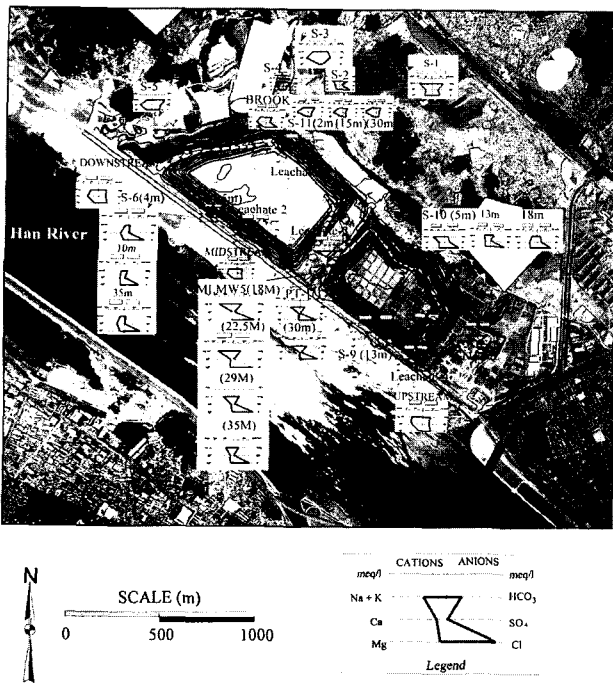


Figure 10. Sliding Stiff diagrams for chemical data of leachate, groundwater, and river water shown on a background aerial photograph (sampled in May, 1994).

하구배 지역의 지하수 및 침출수, 그리고 한강물 등 22개 지점의 총 32개 물 시료에 대한 분석 결과를 사용하였다. 주성분 이온들을 당량 비로 환산해서 Sliding scale Stiff diagram(Figure 10)과 Piper diagram(Figure 11)으로 나타내 보았다. 매립지의 침출수는 매립된 폐기물의 분해 산물이므로 하류구배의 지하수 분석결과는 침출수에 직접 오염 받았음을 알 수 있다. 오염되지 않은 상류구배의 모양은 S-3의 위치에서 볼 수 있듯이 SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} 가 많은 특징을 볼 수 있으며 다른 지점에서는 주변의 생활하수 등의 영향으로 다양한 모습을 보이고 있다. 침출수는 매립지의 환원 환경에 의한 낮은 SO_4^{2-} 와 생분해 결과에 의한 높은 HCO_3^- 와 우리 나라 쓰레기 매립장에 많은 고농도 Cl^- 의 특성을 보이고 있다.

난지도 매립지에서 발생하는 침출수가 지하수계로 유입되어 하류구배의 지하수를 오염시킨 후 한강으로 흘러간다고 볼 수 있다. 매립지에서 멀어질수록 K^+Na^+ , HCO_3^- 의 함량비가 줄어든다. Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 는 침출수에서 가장 적고 매립지에서 멀어질수록 상대적으로 증가하는 모양을 보인다.

불포화대 수리특성 자료

난지도 매립지의 오염된 침출수 거동을 조사하기 위해 불포화대내의 수리 특성을 조사하였다. 침출수의 분출 지점은 크게 두 경우로 나눌 수 있는데, 해발 60~70 m의 비교적 높은 지역과, 40~45 m의 매립지 중간 지점에 주로 위치한다. 이에 비해 매립지 경계부위의 기저지하수의 높이는 해발 6~9 m에 위치한다. 다시 말해 매립지내 불포화대안에 포화대가 부분적으

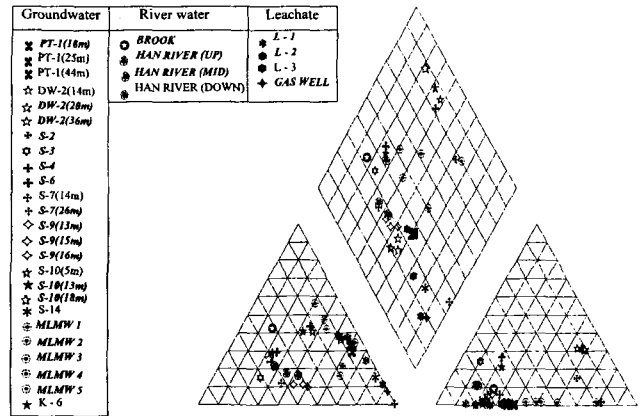


Figure 11. Piper diagram for chemical data of leachate, groundwater, and river water.

로 존재함을 알 수 있다. 이런 시스템을 이해하기 위해 매립지의 불포화대 수리 특성을 조사하였다.

디스크-장력 침투계는 지표면 부근 불포화대의 수리 특성을 결정하기 위해 고안된 것이다(White and Sully, 1987; Hussen and Warrick, 1993a, b). 불포화 수리전도도(K_{wet}), 포화 수리전도도(K_s), 수차도(S; Sorptivity), 토양의 미세공극 모관수 길이(λ_c) 등을 결정하기 위해 디스크-장력 침투계를 이용할 수 있다. 이 연구에서는 매립지내에 불포화대의 수리 특성을 추정하기 위해서 디스크-장력 침투계를 이용하여 침투량 측정 실험을 하였다.

디스크-장력 침투계를 이용한 수리상수 추정

불포화대의 물의 흐름은 3차원이다. 다시 말해, 중력 때문에 발생하는 아래 방향으로 작용하는 힘과, 모든 방향으로 작용하는 모세관력이 있다. 그러나 단순화 한다면 불포화대 흐름을 1차원의 Philip의 침투 방정식으로 취급할 수 있다(Philip, 1969). 즉

$$I = St^{0.5} \quad (1)$$

여기서 $S(LT^{-0.5})$ 는 수차도, I 는 단위 면적 당 누적 흡수(L), t 는 시간이며, 수차도는 실험 초기에 I 대 $t^{0.5}$ 관계에서 기울기로 결정된다.

Wooding(1968)은 단위 면적 당 정상류에서의 침투율 Q (LT^{-1})의 형태를 제시하였다.

$$Q = K_{wet} \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0} \right] \quad (2)$$

여기서 r_0 는 침투계에서 디스크의 반경(L)이며, λ_c 는 미세공극에서의 모관력 범위(L), 그리고 K_{wet} 는 포화 된 상태에서의 수리전도도이다. 식 2에서 오른쪽 항의 첫번째 식은 중력에 의한 힘으로, 두 번째 식은 입자의 기하학적 힘과 모관력의 분포로 나타낼 수 있다. Wooding(1968)은 토양의 크기는 균질하고, 일정하며, 다져진 상태에서 수리전도도는 지수함수로 나타낼 수 있다고 가정하고 아래의 식을 제시하였다(Gardner, 1958).

$$K = K_s \exp\left(\frac{h}{\lambda_c}\right) \quad (3)$$

여기서 K는 불포화 수리전도도이고, K_s는 포화 수리전도도이다. 만약 두 번만의 장력을 주고 실험 했을 때는 λ_c는 다음의 식으로 얻을 수 있다.

$$\lambda_c = \frac{|h_2 - h_1|}{|\ln(Q_2/Q_1)|} \quad (4)$$

여기서 Q₁과 Q₂는 두개의 다르게 공급되는 장력(압력 수두)인 h₁과 h₂에서 정상류에 도달했을 때의 침투율이다. 같은 장소

Table 1. Cumulative infiltration data collected from disc tension infiltrometer at h_{wet}=-15.3, -9.1, -3.0 cm, Site 5

Infiltrometer measurement (1995. 11. 18)					
Tension = -15.3 cm		Tension = -9.1 cm		Tension = -3 cm	
time (sec)	label value (mm)	time (sec)	label value (mm)	time (sec)	label value (mm)
0	97	0	146.5	0	217.5
30	98	20	146.9	60	218
60	99	60	148.1	120	218.6
120	99.6	120	148.9	180	223.5
180	100.1	150	150.5	240	226.3
240	101	180	152	300	229.4
270	101.4	240	153	360	231.2
300	101.6	300	154.2	420	231.9
360	102.1	360	158	480	232
390	103.2	390	159.2	540	233.6
420	103.5	420	160.3	600	234.5
480	103.7	450	162.8	660	239.5
540	103.8	480	163	720	242
600	103.9	540	165.3	780	253.5
660	104	600	168	840	270
720	104.1	660	170.1	900	285
780	104.2	720	172.6	960	299
840	104.3	780	174.7	1020	311.6
900	104.5	840	176.7	1080	323.5
960	105.7	900	178.8	1140	334.8
1020	106.1	960	180.9	1200	346
1050	107.4	1020	182.6	1260	357.1
1080	107.8	1080	184.7	1320	367
1110	108	1140	186.7	1380	377.1
1140	108.2	1200	188.7	1440	387.2
1200	108.4	1260	190.6	1500	397.1
1260	108.6	1320	192.2	1560	407.1
1290	108.7	1380	194	1620	417.2
1320	108.8	1440	195.6	1680	426.9
1380	109.7	1500	197.7	1740	435.6
1410	111.5	1560	199.5	1800	444
1440	112.5	1620	201.3	1860	453
1470	112.6	1680	203.1	1920	462.9
1500	114.3	1740	204.9	1980	472
1530	115.1	1800	206.7	2040	481.2
1560	115.3	1860	208.6	2100	490
1590	115.7	1920	210.4	2220	508.1
1620	116.1	1980	212	2520	553

에서 두 번 이상의 장력을 주고 한번의 장력을 줄 때마다 정상류에 도달한 후의 흐름을 측정한다.

식 (3)에서 Gardner의 식을 이용할 때 Wooding의 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Q = K_s \exp\left(\frac{h}{\lambda_c}\right) \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi_0}\right] \quad (5)$$

만약, 3개 이상 장력에 대해 실험을 수행하면 그 결과가 비선형 관계로 주어지므로 식(4)를 이용해 λ_c과 K_{wet}의 가장 적합한 값을 정할 수 있다. 가장 적합한 K_s의 값은 λ_c값에 의해 결정된다(Hussen and Warrick, 1993b).

Table 1는 누적된 침투량과 시간 사이의 관계에서 나타난 결과값이다. 여기서 정상류의 흐름은 실험 마지막 부분의 연속적으로 읽은 값 중에서 기울기가 일정한 값을 말한다.

디스크-장력 침투계 조사 자료 해석

매립지를 덮고 있는 토양 특성, 매립물의 노출 정도, 입자 크기 등을 근거로 매립지 전역을 대표하는 12개 지점을 선정하였다. 12개 지점의 포화 수리전도도를 구하기 위해 디스크-장력 침투계를 사용하였다. 디스크-장력 침투계 실험에서는 세단계의 장력을 물 주입압력으로 사용하였고 대체로 -15.4, -9.2, -3.1 cm의 장력(압력수두)을 주었다(Figure 12(a), (b), (c)).

이 연구에서는 다중-장력 침투법을 이용하였다. 두 번 이상 다른 장력을 주어 불포화 수리전도도를 구하는 것이다. 두 번 이상 실험에서 나온 결과를 비선형으로 최적화 할 수 있도록 식 (5)를 이용한다.

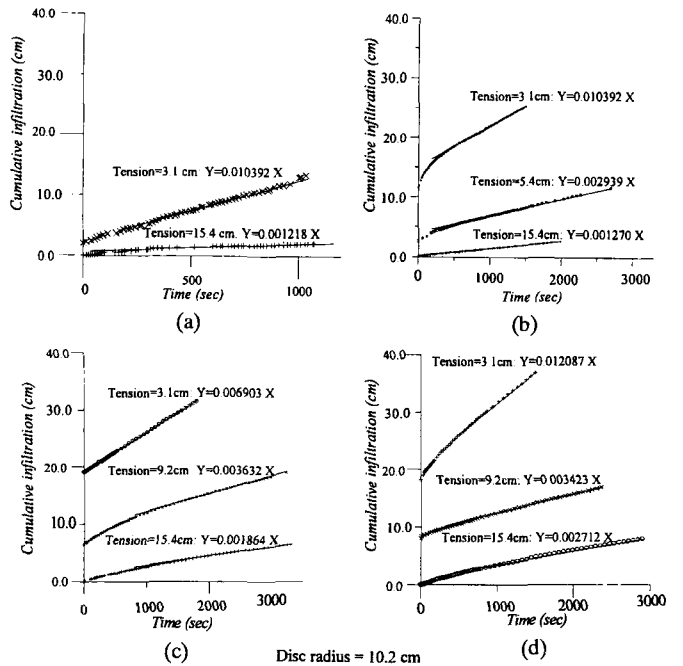


Figure 12(a). Cumulative infiltration versus time. The dot lines represent field data and the solid lines represent simulated flow rates: (a) Site 1, (b) Site 2, (c) Site 3, (d) Site 4.

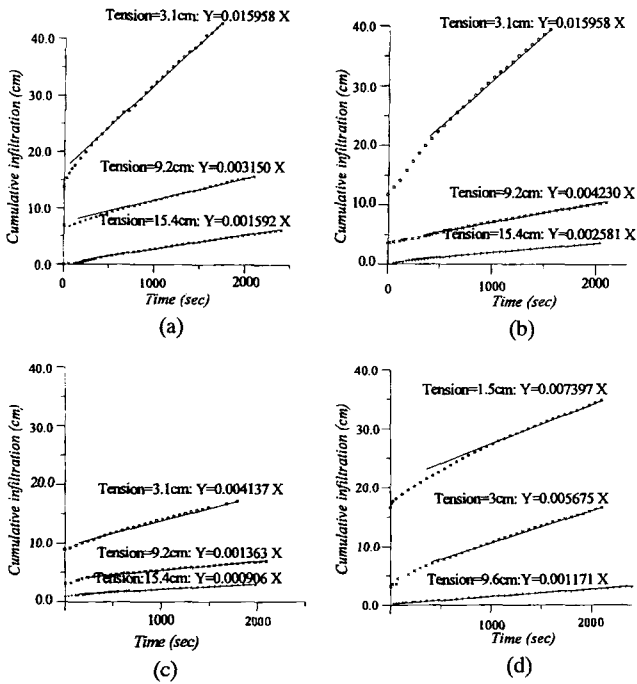


Figure 12(b). Cumulative infiltration versus time. The dot lines represent field data and the solid lines represent simulated flow rates: (a) Site 5, (b) Site 6, (c) Site 7, (d) Site 8.

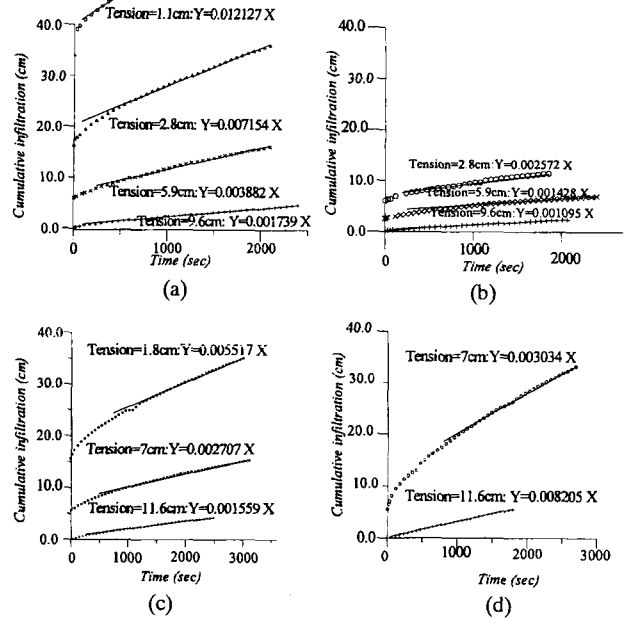


Figure 12(c). Cumulative infiltration versus time. The dot lines represent field data and the solid lines represent simulated flow rates: (a) Site 9, (b) Site 10, (c) Site 11, (d) Site 12.

Table 2는 디스크-장력 침투계를 사용하여 계산한 수리전도도 값을 보여 준다. 추정된 포화 수리전도도의 실험값의 분포가 $9.511 \times 10^{-5} \sim 1.13 \times 10^{-3}$ cm/sec까지 분포한다. 포화 수리전도도의 범위와 난지도 상부의 상태에 대한 야외 관찰을 기초로 Figure 13와 같이 포화 수리전도도의 분포를 3개의 영역(zone)으로 나누어서 매립지내로의 물 침투량 계산에 이용하였다.

GIS 이용한 데이터 베이스 구축

데이터 베이스 구축

난지도 매립지에서 기 조사된 자료들과 이번 연구에서 얻어진 수리지질학적 자료들을 PC ARC/INFO로 데이터 베이스를 구축하였다. 데이터의 영역은 크게 두가지 형태로 나눌 수 있다. 시간 변화에 따른 자료와 시간 변화에 무관한 공간 자료로 크게 나눌 수 있다. 난지도 매립지와 관련된 지형도, 항공사진, 측량 자료, 관측정 위치, 온도 분포, 토양도, 강수량 등을 입력, 저장하고 필요한 영역의 자료를 추출해서 GIS의 핵심 기능으로 데이터를 조작 분석하고 이를 그래픽으로 표현할 수 있게 하였다. 난지도 매립지에 대한 수리지질학적 해석을 위해 필요한 자료를 입력하고 데이터 관리 시스템에서 필요한 자료를 추출하여 침출수 및 가스거동 해석을 시도하였다.

가. 시간에 따라 변하는 자료

시간 변화에 영향 받는 자료는 지하수 시스템의 시간적 거동을 분석하기 위해 필요하다. 이러한 자료로는 관측정에서 시간에 따른 지하수위, 지하수 농도, 온도, 강수량 등이 있다(Table 3). 매립지와 관련한 이러한 자료들을 시간 종속적인 데이터 베

이스에 입력하였다.

나. 시간 변화에 무관한 공간 자료

대수층의 특징을 나타내는 자료의 대부분은 시간과 무관하다. 대수층의 일반적인 수리지질학적 특성, 즉 지질학적 층서, 수리전도도, 공극률 분포, 토양도, 토지 이용도 등 시간에 따라 크게 변하지 않는 모든 공간적인 영역의 값 등이 여기에 속한다(Table 4). 다만 매립고가 높아지고 매립층 물질의 생화학적 반응을 통해 매립층의 수리지질학적 특성, 예를 들어 공극율, 수리전도도 및 저류계수들이 바뀌었을 가능성이 클 것으로 판단되나 이 연구에서는 이런 부분은 고려하지 않았다.

데이터 베이스와 수분거동 모델

Kool and van Genuchten(1992)는 불포화대의 모형화를 통해 다양한 공극매체를 통한 일차원적 흐름과 용질 이동을 모사하는 모델인 HYDRUS를 개발하였다. HYDRUS는 불포화대내의 수분 흐름을 시뮬레이션할 수 있다. 이 연구에서는 HYDRUS의 입출력 기능과 경계조건 처리 방법을 일부분 수정하여 수분 거동 모사에 사용하였다.

데이터 베이스를 내장한 VSFTM(Variably Saturated Flow and Transport Model)

VSFTM은 PC ARC/INFO 환경에서 사용되는 언어인 SML(Simple Macro Language) 프로그램이다. VSFTM은 난지도 매립지의 수리지질학적인 자료를 점, 선, 다각형 형태의 커버리지를 종합 관리하고 필요한 계산을 수행하는 시스템이다.

Table 2. Calculation of hydraulic conductivity from disc tension infiltrometer test

	Q (cm/sec)	Tension (10^3 atm)	Gradient	λ (cm)	K_s (cm/sec)	K_s (cm/hour)	K_s (cm/day)
Site 1	0.000058218	15.4	0.001218	5.74	4.968×10^{-4}	1.788	42.925
	0.000496716	3.1	0.010392				
Site 2	0.000060703	15.4	0.001270	3.04	4.966×10^{-4}	1.787	42.910
	0.000140478	5.4	0.002939				
	0.000327464	3.1	0.006851				
Site 3	0.000089095	15.4	0.001864	9.44	2.104×10^{-4}	0.757	18.184
	0.000173602	9.2	0.003632				
	0.000329949	3.1	0.006903				
Site 4	0.000129628	15.4	0.002712	5.95	5.512×10^{-4}	1.984	47.628
	0.000163612	9.2	0.003432				
	0.000577734	3.1	0.012087				
Site 5	0.000076094	15.4	0.001592	4.04	1.091×10^{-3}	3.926	94.244
	0.000150564	8.2	0.003150				
	0.000762760	3.1	0.015958				
Site 6	0.000123367	15.4	0.002581	5.19	8.348×10^{-4}	3.005	72.132
	0.000202185	9.2	0.004230				
	0.000762760	3.1	0.015958				
Site 7	0.000043305	15.4	0.000906	6.46	1.749×10^{-4}	0.629	15.114
	0.000065149	9.2	0.001364				
	0.000197740	3.1	0.004137				
Site 8	0.000055971	9.6	0.001171	4.68	3.125×10^{-4}	1.123	26.956
	0.000271253	3.0	0.005675				
	0.000353562	1.5	0.007397				
Site 9	0.000083121	9.6	0.001739	4.05	4.929×10^{-4}	1.771	42.508
	0.000185552	5.9	0.003883				
	0.000341947	2.8	0.007154				
Site 10	0.000052339	9.6	0.001095	7.03	9.511×10^{-5}	0.342	8.028
	0.000068255	5.9	0.001428				
	0.000122936	2.8	0.002572				
Site 11	0.000074517	11.6	0.001559	7.55	1.718×10^{-4}	0.615	14.774
	0.000129389	7	0.002707				
	0.000263701	1.8	0.005517				
Site 12	0.000145019	11.6	0.003034	4.62	1.130×10^{-3}	4.068	97.632
	0.000392182	7	0.008205				

VSFTM은 PC ARC/INFO에서 수리지질 자료의 데이터 베이스를 구축하고, 데이터 베이스의 일부 자료를 HYDRUS 모델의 입력 자료로 사용하기 위해서 PC ARC/INFO의 Dump 명령을 사용해 ASCII로 자동 변환할 수 있다. Figure 14는 VSFTM 모델의 기본 개념도를 보여 준다. 자료와 정보는 각각 점, 선, 다각형 형태로 digitizing, scanning 되어 입력되었다. 대수층의 구성 요소, 강수량, 불포화대의 수리전도도, 매립층의 두께, 매립물의 종류, 난지도 매립지의 기하학적 배경 등이 VSFTM에 저장되고 HYDRUS에서 나온 결과값은 다시 PC ARC/INFO 입력 형태로 이 시스템에 저장하였다.

VSFTM의 응용

가. 순침투량(Net Infiltration Rate) 계산

난지도 매립지에서 순침투량과 침출수량의 총량을 추정하기 위해서 불포화대에서의 수리전도도와 매립지 전역의 일강수량 등의 자료를 VSFTM의 자료로부터 불러온다. Figure 13에서와 같이 매립지 상부에서 침투계로 계산된 포화 수리전도도의 값을 VSFTM 형식에 맞게 저장하고 매립지 상부에 이를 중첩하여 면적을 구한다.

포화 수리전도도의 값은 편이상 3 cm/hour 이상 지역, 1.77 ~ 3.0 cm/hour 지역, 그리고 1.77 cm/hour 미만인 지역으로 분류하였다. 매립지 사면에 해당하는 지역은 수리전도도가 가장 높은 지역과 비슷하여 3 cm/hour로 계산하였다. 사면과 매립상부 복토층을 크게 4개 영역으로 분류하였다.

각 영역에서의 포화 수리전도도 값은 모델에서 입력 값으로 사용된다. 평균 수리전도도는 매립지 상부의 평균값으로 낮은

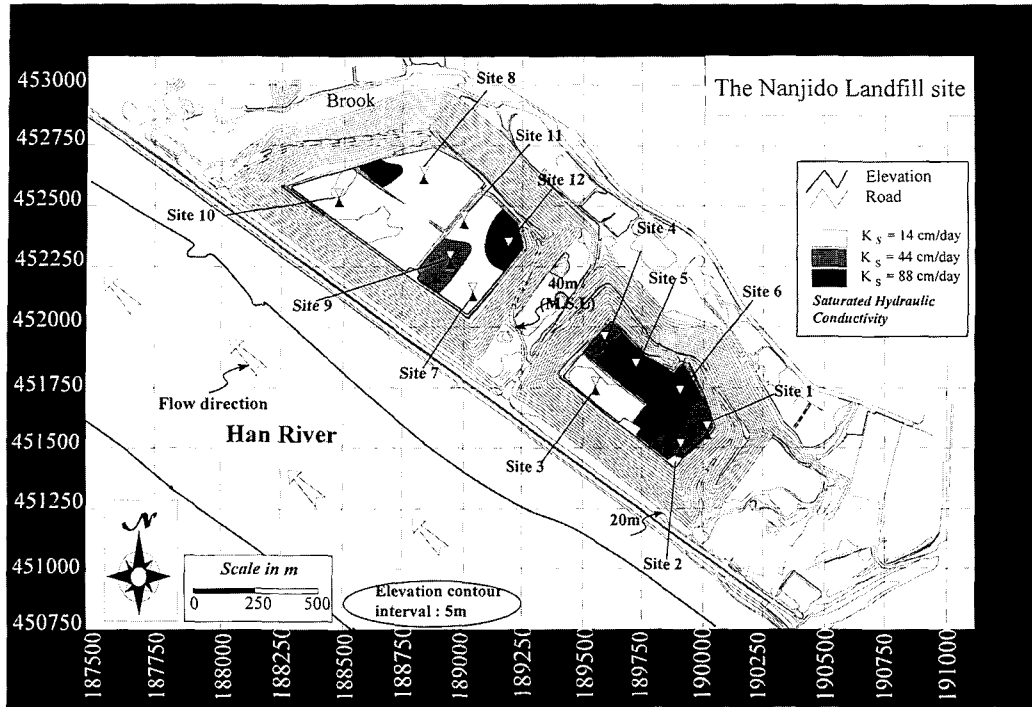


Figure 13. Infiltration test sites and hydraulic conductivity distribution discretized into 3 zones.

Table 3. Fluctuation of the depths to water table at wells (unit: meter)

YYYY/MM/DD HH:MM	PT-1	MLMW1	MLMW2	MLMW3	MLMW4	MLMW5
1994/11/28 10:00	16.280	15.991	15.705	15.867	15.819	15.318
1994/11/28 11:00	16.277	15.988	15.709	15.868	15.814	15.317
1994/11/28 12:00	16.266	15.981	15.708	15.862	15.809	15.313
1994/11/28 13:00	16.265	15.980	15.706	15.860	15.810	15.319
1994/11/28 14:00	16.269	15.983	15.707	15.861	15.812	15.319
1994/11/28 15:00	16.270	15.986	15.710	15.863	15.814	15.321
1994/11/28 16:00	16.271	15.990	15.711	15.865	15.818	15.326
1994/11/28 17:00	16.271	15.991	15.711	15.867	15.820	15.321
1994/11/28 18:00	16.280	15.995	15.712	15.870	15.821	15.321
1994/11/28 19:00	16.287	15.997	15.715	15.872	15.825	15.329
1994/11/28 20:00	16.288	16.004	15.720	15.877	15.829	15.333
1994/11/28 21:00	16.294	16.006	15.726	15.880	15.832	15.341
1994/11/28 22:00	16.289	16.007	15.727	15.881	15.830	15.340
1994/11/28 23:00	16.288	16.004	15.728	15.880	15.829	15.343
1994/11/28 24:00	16.286	16.001	15.728	15.878	15.827	15.340
1994/11/28 01:00	16.281	15.998	15.728	15.879	15.826	15.340
1994/11/28 02:00	16.285	16.000	15.729	15.880	15.828	15.342
1994/11/28 03:00	16.280	15.995	15.728	15.875	15.821	15.337
1994/11/28 04:00	16.275	15.994	15.728	15.872	15.821	15.336
1994/11/28 05:00	16.280	15.997	15.725	15.873	15.823	15.345
1994/11/28 06:00	16.281	15.996	15.727	15.870	15.823	15.346
1994/11/28 07:00	16.281	16.000	15.725	15.875	15.826	15.350
1994/11/28 08:00	16.281	16.001	15.728	15.874	15.828	15.350
1994/11/28 09:00	16.287	16.003	15.730	15.880	15.830	15.351
1994/11/28 10:00	16.281	15.997	15.730	15.878	15.823	15.345
1994/11/28 11:00	16.269	15.990	15.726	15.874	15.819	15.341
1994/11/28 12:00	16.262	15.983	15.724	15.868	15.812	15.333

값에서부터 $K_s=14, 48$ 과 88 cm/day , 사면에서는 88 cm/day 로 이 값들을 HYDRUS를 이용한 수분 이동 모사에 적용하였다. 또 다른 입력 값으로는 강수 자료를 입력하였다. 강수자료는 1988년부터 1994년까지의 일 강수량이며, 이러한 강수기록을 입력 값으로 사용하였다. 이 기간동안 서울 지역의 연평균 강수량은 1275.5 mm 를 보였다.

입력 값을 기초로 네 영역에서 각각의 수분 이동 모사 결과를 얻었다. 입력 값에 따라 나타난 순침출량을 출력 값으로 나타낼 수 있다. 각 영역의 순침투율은 HYDRUS 계산 결과(TRAIN~TRUPTK)로 나타나는 값이다.

매립지의 면적과 체적은 UTM좌표로 입력한 정확한 고도를 나타내는 커버리지에서 계산할 수 있다. 계산된 총면적은 2,

$715,000 \text{ m}^2$ 이고, 매립장 상부의 면적은 $608,903.3 \text{ m}^2$ 이다. 사면의 면적은 $2,103,019 \text{ m}^2$ 으로 나타나고 각 영역의 면적과 순침투율을 곱하여 총침투량으로 $2,841 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 값을 얻었다.

나. 부유 침출수의 시물레이션

침출수 누수 지점은 계절에 따라 위치와 양이 변하지만 조사

Table 4. Time invariant spatial data of saturated hydraulic conductivity

Site No.	K_s (cm/sec)
Site 1	4.986×10^{-4}
Site 2	4.966×10^{-4}
Site 3	2.104×10^{-4}
Site 4	5.512×10^{-4}
Site 5	1.091×10^{-3}
Site 6	8.348×10^{-4}
Site 7	1.749×10^{-4}
Site 8	3.125×10^{-4}
Site 9	4.929×10^{-4}
Site 10	9.511×10^{-5}
Site 11	1.718×10^{-4}
Site 12	1.130×10^{-3}

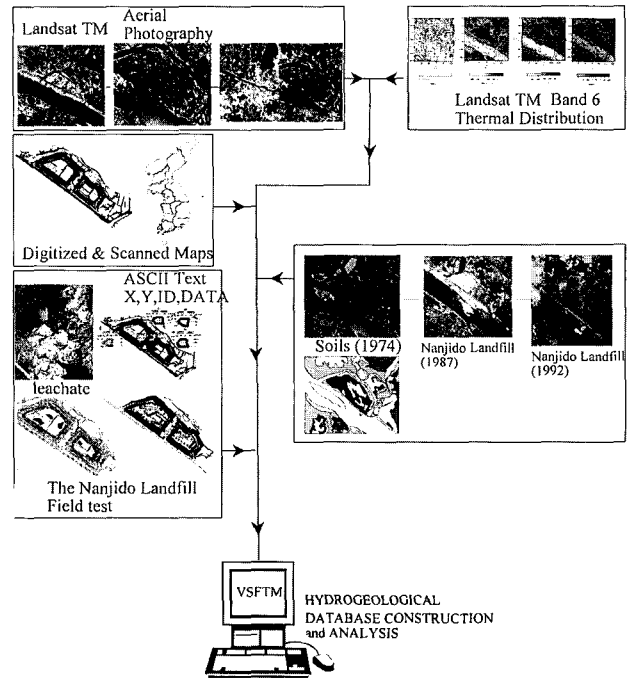


Figure 14. Schematic diagram of VSFTM.

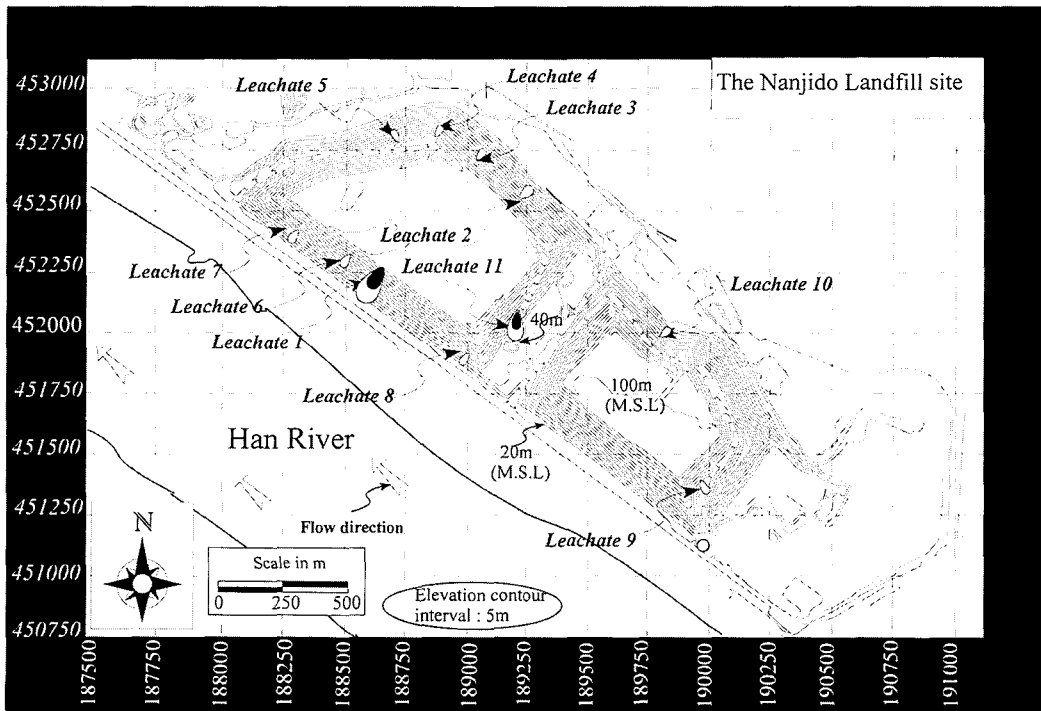


Figure 15. The sites of leachate seepages and springs.

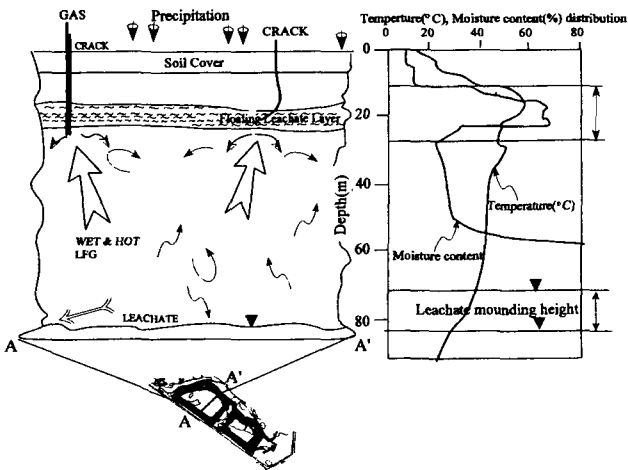


Figure 16. Vertical profiles of temperature and moisture content and a sketch of leachate evaporation-condensation mechanism.

기간에는 11개 지역에서 관찰되었다(Figure 15). 침출수가 누수되는 위치는 대부분 기저 지하수보다는 높은 해발 40 m에서 75 m까지 높이에서 나타난다. 이런 사실로부터 기저지하수면 상부의 매립지 일부분이 부분적으로 포화되어 있으며, 포화된 곳에 있는 침출수의 일부가 매립장 사면으로 흘러나오고 있음을 짐작할 수 있다.

Straka *et al.*(1993)는 빗물로 토양 속에 스며든 물은 매립지 내의 온도, 압력 조건에 의해 응축되며 내부에서 재순환에 참가해서 포화를 가증할 수 있고 이때 포화가 되면 매립지내의 물이 흐를 수 있는 통로로 직접 사면과 매립지 하부로 이동하게 되는 메커니즘을 제시하였다.

여기서 매립장 내의 부유 침출수층 형성에 대한 하나의 모델로서 유효 공극율, 수리전도도, 수증기 증발-응축 및 가스압력 변화 등의 복합 작용으로 일어날 수 있는 부유 침출수의 형성에 대한 시뮬레이션을 제시한다. 삼성건설(1994)의 온도 측정 결과를 보면 매립지 표면에서 아래 방향으로 약 15 m 이후부터 온도가 올라가는 것을 볼 수 있다. 또한 함수비도 약 15 m 이하로부터 급격하게 증가함을 볼 수 있다. Straka *et al.*(1993)의 부유 침출수 형성의 기본 메커니즘을 난지도에도 적용할 수 있다고 본다면 다음 해석이 가능하다. 난지도 매립지의 고온의 가스와 수증기는 매립지 하부에서 위쪽으로 이동하다가 매립지 표면을 통해 매립지로 침투한 물과 만나게 된다. 이 때 수증기는 응축하면서 위에서 내려오는 물과 함께 국부적인 포화층을 형성하고 매립지내의 수증기가 아래로부터 일정 수준으로 공급된다면 일정한 고도를 유지하게 된다(Figure 16).

부유 침출수의 형성 과정을 정량적으로 살펴보기 위해 수리전도도 및 유효 공극률의 수직적 분포, 그리고 물-수증기의 증발-응축 과정을 고려하거나 하지 않는 다섯개의 경우에 대한 매립지내 불포화대에서의 함수비 분포를 계산하였다. 함수비의 분포는 수정된 HYDRUS 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 각각의 경우에 대해 함수비 분포를 위한 시뮬레이션 결과는 Figure 17(a)~(e)로 나타낼 수 있다. Figure 17(a)는 물-수증기의 증발-응축이 없을 때 일정한 수리전도도와 유효 공극율을 보

일 때는 함수비는 0.25정도이다. Figure 17(b)는 (a)와 같은 조건에서 수리전도도의 불균질성을 고려할 때도 함수비는 0.30를 넘지 않는다. 증발-응축 현상을 고려할 때 함수비와 압력 수두 모두 영향을 받는다(Figure 17(c)). 증발과 응축을 고려하고 수리전도도의 불균질성이 있을 때 함수비가 증가하는 구간의 폭이 넓어진다(Figure 17(d)). 유효 공극률의 수직적 불균질성 증발-응축을 모두 고려할 때 일부 구간에서 포화도가 가장 큰 증가를 보인다(Figure 17(e)).

그러나 다섯가지 경우 어느 하나도 포화되는 현상을 보이지 않는다. 부유 침출수층을 설명하려면 포화도를 증가시킬 수 있는 다른 요소를 고려해야 할 것이다. 함수비의 증가는 가스의 투수성을 감소시킨다. 가스의 투수성이 감소하면 상층부로 향하는 가스압이 증가하게 된다(Park *et al.*, 1996). 위로 향하는 가스 압력은 아래로 향해 흐르는 물의 흐름을 중지시키고 수분의 함량은 더욱 증가할 수 있는 원인을 제공한다. 이런 메커니즘이 결합되면 결국 부분적으로 매립장내의 포화대를 만들 수 있다. 그래서 매립장 사면 주위에서 포화된 침출수의 누수가 계속 일어나는 현상을 관찰할 수 있다. 즉, 이런 현상은 불균질한 수직적인 수리전도도, 유효 공극율, 수증기 증발-응축, 그리고 상승하는 가스 압력의 상호 작용만으로도 일부 구간에서 부유 침출수의 형성을 설명할 수 있다.

결론

복잡한 수리지질학적 현상을 하나의 시스템에서 데이터를 저장, 관리, 분석해서 현장에서 일어나는 오염 현상을 예측하고 적용하는 하나의 방법으로 데이터 베이스를 구축하였다. 이 데이터 베이스의 이용 예로써 난지도 매립지에 적용한 몇가지 연구 내용 및 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 난지도 매립지와 관련된 항공사진으로부터 매립사를 조사하고, 기 조사된 수리지질조사 자료와 이 연구에서 실시된 침투 실험, 매립장 전역의 표면 온도 분포 조사, 그리고 가스의 분출구를 따라 발달하는 균열조사 등의 결과 자료를 데이터 베이스로 구축하였다.
2. 침출수로 인한 한강 오염의 정도를 시각적으로 보기 위해 매립장을 중심으로 지하수 흐름의 상류 및 하류로 크게 나누어 분석하여 그 결과를 Sliding scale Stiff diagram과 Piper diagram에 나타내고, 대수층 특성을 파악하기 위해 지하수위 변화를 구해서 대기압에 의한 영향도 조사하여 데이터 베이스에 포함시켰다.
3. 매립장 온도 분포가 높은 지역은 대부분 가스와 수증기의 분출이 활발히 일어나는 지역으로 매립장 사면과 상부에 발달한 균열의 분포와 일치한다. 높은 온도는 가스의 출구를 중심으로 멀어질수록 낮아진다. 시간의 변화에 따라 균열의 위치가 변화하고 온도의 범위도 변함을 알 수 있었다.
4. 매립장의 기저 지하수의 기압영향율은 얇은 심도의 관측정(MLMW 5)에서의 49.0%로부터 기반암에 속하는 심도에 설치된 관측정에서는 74.5%까지 나타나 지면에서부터 평균 스크린 심도까지의 밀폐도가 서로 다르게 나타난다.
5. 디스크-장력 침투계로 매립지 상부 12개 지점에서 포화 수

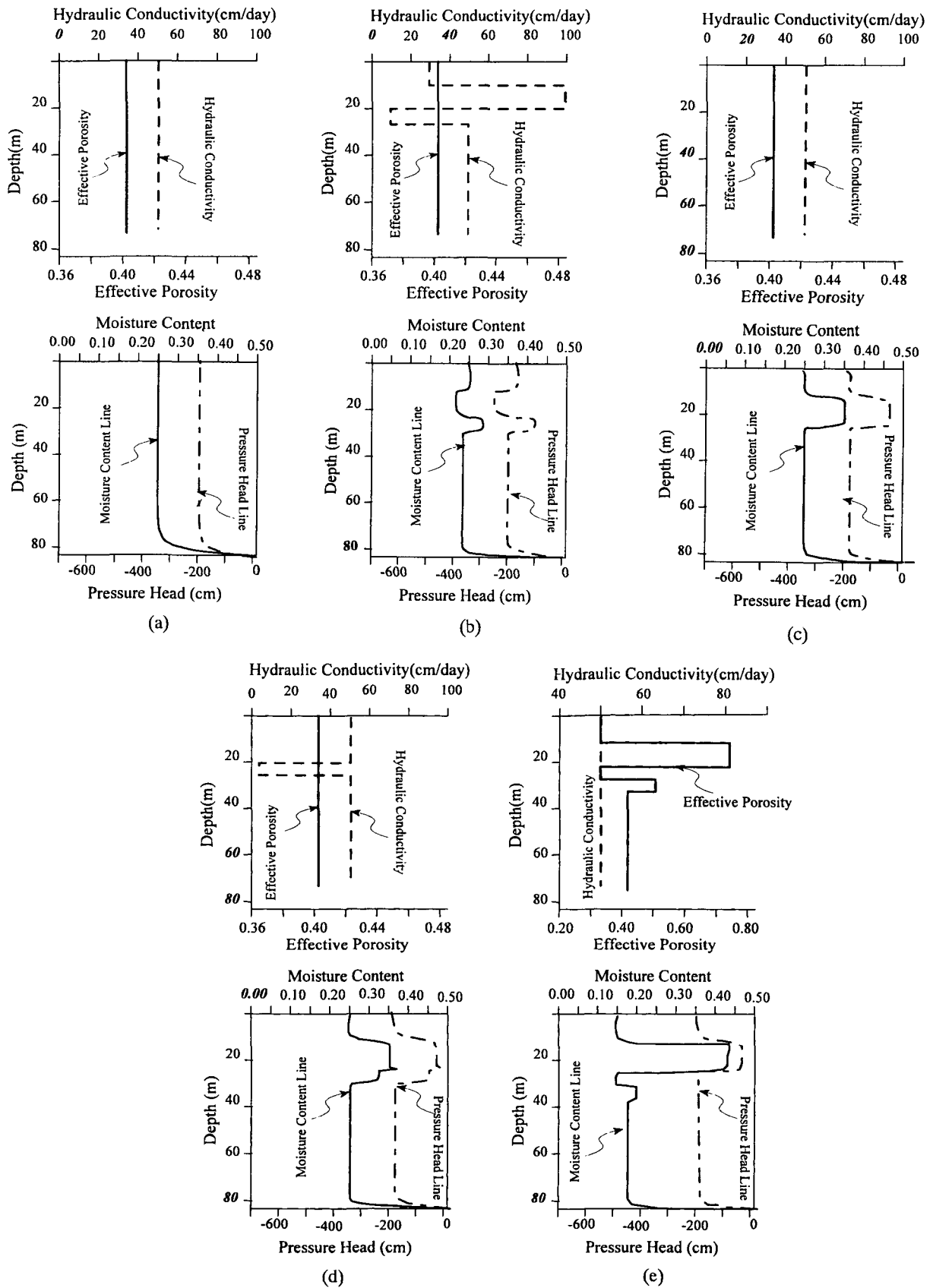


Figure 17. Computation of moisture content profiles for five models of hydraulic conductivity and effective permeability distribution with or without leachate evaporation-condensation.

리전도도를 추정하기 위한 실험 결과, 9.511×10^{-5} cm/sec에서 1.13×10^{-3} cm/sec의 값의 범위를 보였다. 이 값을 근거로 순침투량을 추론하면 $2,841 \text{ m}^3/\text{day}$ 이며, 매립된 쓰레기로부터 나오는 수분의 양을 고려하지 않는다면 순침투량을 침출수의 발생량으로 볼 수 있다.

6. 수리전도도와 유효공극율, 그리고 물-수증기의 증발-응축 관계를 고려하여 매립지내 불포화대에서의 수분 및 압력수두 분포 시뮬레이션을 통하여 부유침출수의 생성 메커니즘을 설명할 수 있다.

사 사

이 연구는 1995년 교육부 기초과학 학술연구 조성비에 의한 "생활 폐기물 매립지 및 그 주변의 지질환경연구"의 일환으로 수행 되었으며, 삼성건설(주)의 G7 Project "오염 토양/지하수 정화기술개발"의 일부 지원이 있었다. 항공사진을 제공해 주신 국립지리원 항공측과 관계관 여러분께 감사 드린다.

참고문헌

- Daewoo Corporation., 1993, Basic design of stabilization for the Nanjido Landfill, Seoul Metropolitan Government.
- Gardner, W. R., 1958, Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.*, 85, p. 228-232.
- GIS World, 1990, Special Report: The 1990 GIS World Software Survey, Colorado Springs, Col., USA.
- Hussen, A. A. and Warrick, A. W., 1993a, Algebraic models for disc tension permeameters, *Water Resour. Res.*, 29, p. 2779-2785.
- Hussen, A. A. and Warrick, A. W., 1993b, Alternative Analyses of hydraulic data from disc tension infiltrometers, *Water Resour. Res.*, 29, p. 4103-4108.
- Kool, J. B. and van Genuchten, M. Th., 1992, HYDRUS, One-dimensional variably saturated flow and transport model, including hysteresis and root water uptake, International Ground Water Modeling Center.
- Korea Ministry of Construction., 1989, 89 Report a development project on the lower Han River.
- Park, Y. C., Lee, K. K., Park, C. H., and Kim, Y. W., 1996, Development and application of a landfill gas migration model. *Economic Environmental Geology*, 29, p. 325-333.
- Philip, J. R., 1969, Theory of infiltration, *Adv. Hydrosci.*, Vol. 5, p. 213-305.
- Rifai, H. S., Hendricks, L. A., Kilborn, K. and Bedient, P. B., 1993, A geographic information system user interface for delineating wellhead protection areas, *Ground Water*, 31, p. 480-488.
- Samsung Engineering & Construction, 1994, Basic design of stabilization for the Nanjido Landfill. Seoul Metropolitan Government.
- Straka, F., Crha, J. and Kobrova, Y., 1993, Important changes in sanitary landfills during their aging, *Proceedings Sardinia 93 Fourth International landfill Symposium*, Environmental Sanitary Engineering Center, Cagliari Italy., Oct. p. 573-580.
- Tonjes, D. J., Heil, J. H. and Black, J. A., 1995, Sliding Stiff Diagrams: A sophisticated groundwater analytical tool. *Groundwater Monitoring and Remediation.*, 15, p. 134-139.
- White, I. and Sully, M. J., 1987, Macroscopic and Microscopic capillary length and time scales from field infiltration *Water Resour. Res.*, 23, p. 1514-1522.
- Wooding, R. A., 1968, Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resour. Res.*, 4, p. 1259-1273.