

난지도 매립장 지반을 통한 오염이동 특성과 제어

The Characteristic and Control of Contaminant Transport through the Subsurface of Nanjido Landfill

장연수 (Yeon-Soo Jang)* · 이광열 (Kwang-Yeol Lee)**

요 약 : 난지도 매립장 하부지반을 통한 오염이동 특성을 2차원 유한 요소 오염이동 모델을 이용하여 알아 보고 부분적인 차폐벽을 매립장 주위에 설치하였을 경우 초래되는 매립장내 침출수 누적 효과를 유한 차분 지하수흐름 모델을 이용하여 분석하였다. 분석에 사용된 입력계수는 현장에서 측정된 오염농도 자료를 이용 검증한 후 향후 30년 동안에 한강변으로 누출될 수 있는 오염농도 변화를 분석하고 매립장내 침출 수두와 확산계수의 증가가 오염물 이동에 미치는 민감도를 알아 보았다. 오염이동 해석 결과 한강주변의 난지도 매립장 침출수로 인한 염소이온농도 최대값은 1488 mg/l로서 매립장 폐쇄후 17년만에 이루어 지는 것으로 나타났다. 매립장내 침출수위와 확산계수의 변화는 모두 침출수 이동을 촉진하나 침출수위면이 증가 할수록 침출수 농도 증가 폭은 커져가는 반면 확산계수 증가에 대한 침출수 농도 증가 폭은 작아져서 일정 농도로 수렴하는 경향을 보였다.

Abstract : The contaminant migration through the subsurface of Nanjido landfill is studied using a 2-D finite element model of contaminant transport. The leachate mounding caused by the installation of partial slurry wall around the peripheral area of the Landfill is analysed using the finite difference model of groundwater flow. Model parameters were validated using in-situ concentration data and the behavior of the transport next 30 years is predicted. The sensitivities of chloride concentration by the change of model parameters, e.g. leachate mounding in the Landfill and the dispersivity are analysed. The results of the analyses show that the maximum chloride concentration level near Han River caused by the leachate of Nanjido Landfill would be 1488mg/l and comes 17 years after the landfill closure. Increase of the leachate concentration is caused by the increase of both the leachate mounding and the dispersivity. However, the rate of concentration increase becomes higher with the rise of leachate mounding level, while it tends to converge a certain concentration with the increase of the dispersivity.

서 론

난지도 매립장은 우리나라의 지나간 이십여년 동안의 경제성장과 인구 도시집중 현상으로 부터 급격하게 증가한 쓰레기가 별다른 차수시설 없이 매립되어진 곳이다. 본 매립장의 위치는 서울시 마포구 상암동 482번지 일원으로서 한강변에 위치하고 있으며(Figure 1), 매립지의 면적은 약30km²이고 1992년 말 매립장 폐쇄시의 최대 매립고는 70m에 달하였다. 본 매립장은 그 규모에 비하여 차수 대책이 없는 투기형식의 매립으로 인하여 주변 환경오염이 우려되는 곳임에도 매립장내의 침출수 성분조사와 수리지질조사는 80년대에는 거의 없었다. 1990년대에 들어와 본격적인 안정화 사업

이 추진되어 서울시 청소사업본부의 1991년 11월 부터 1992년 12월까지 1년간 난지도 안정화 대책 기본계획사업 및 1994년 8월 현재 기본 설계 그리고 후속 사업으로 실시 설계가 이루어질 예정이다.

본 논문은 이러한 난지도에 대한 최근의 활발한 지반조사와 향후 오염방지를 위한 방안 수립에 대한 기초적인 도움을 주고자 차수재를 설치하지 않은 본 매립장의 바닥지반을 통한 오염물 이동특성을 2차원 오염물 이동 유한요소모델을 이용하여 분석하고 매립장 주변에 차수재 설치시 여러 설치방안에 따른 매립지내 침출수 누적 형태에 대한 분석을 실시하였다. 분석을 위한 첫단계로서 현장 침출수 성분 데이터를 이용하여 모델검증을 수행한 후 향후 30년간 난지도 침출수로 인하여 한강오염이 최대에 달하는 시기와 그 크기를 예측하였다. 분석을 위한 입력자료는 현재까지 수집가능한 현장 지반 조사자료를 이용하였으며 자료가 없는 매립장내 수위 높이, 시간에 따른 오염원 변화, 확산계수 등은 합리적으로

*동국대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Dongguk University, Seoul)

**선경건설주식회사 기술연구소 (Geotechnical and Geo-Environmental Division, Sunkyong Engineering and Construction Co. Ltd)

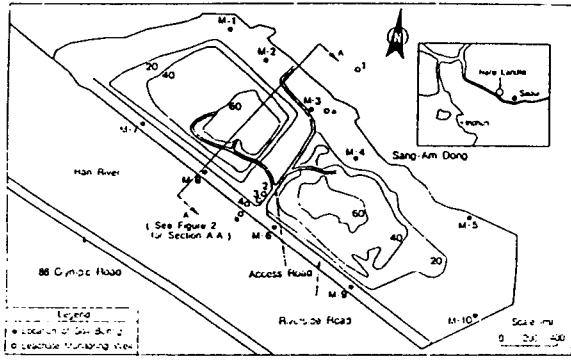


Figure 1. Plan view of Nanjido landfill with the location of soil boring and leachate monitoring well

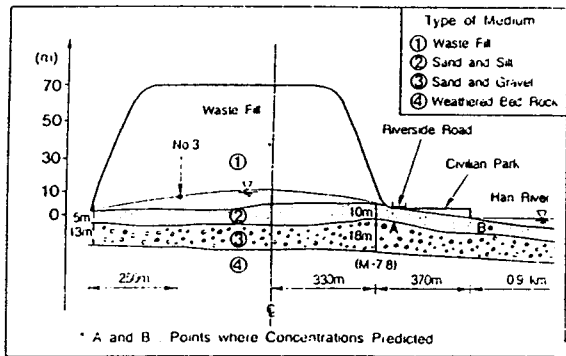


Figure 2. Vertical section of Nanjido landfill

가정하여 이들 값에 대한 오염물 이동의 민감도를 분석하였다. 분석의 둘째단계로서 난지도 매립장의 오염물 확산을 방지하기 위해 적합한 차수재 설치 방안 도출을 위하여 유한차분 침투 흐름 수치모델인 MODFLOW를 이용 차수재 설치 위치에 따른 매립장내 침출수두 분포를 분석하였다.

매립장의 지질 및 수리 특성

본 매립장의 토층은 상부의 쓰레기 매립층, 중간하상 퇴적 모래층과 자갈층, 하부 풍화 기반암층으로 이루어져 있다. 상부 쓰레기층의 두께는 한강변쪽이 10.5-13.1m 북쪽 상암동쪽이 1.1-1.6m 이며 중간의 상부 모래층의 두께는 8.6m, 하부 자갈층은 10m이다(Figure 2).

매립장 바닥지반의 수리지질 특성을 본 매립장을 조사한

관계문헌을 통하여 정리하여 보면 Table 1과 같다. 대체로 양수시험을 통하여 구한 투수계수는 시추공내 주수시험이나 실내투수시험을 통하여 구한 값보다 10배 이상의 큰 값을 보이고 있다. 후자 시험이 적은양의 흙을 상대로 수행되고 실내시험의 경우는 현장의 흙의 밀도를 실내에서 재현하기 어려운 점을 감안하면 양수시험에 의한 투수계수가 현장상태를 잘 대표할 것으로 사료되어 침출수 이동성 분석에 사용된 값을 $2.0 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ 으로 하였다. 현장에서 주입 및 관측공을 7m격리시켜 수행한 추적자시험에 의하면 종단분산 계수는 5m이었다. 분산계수는 실험의 규모(scale)에 따라 값이 차이가 나므로 본 현장과 같은 큰 규모의 경우는 5m이상의 값을 가지는 것으로 사료되어 분석에는 5m이상 25m까지의 값을 사용하였다.

Table 2에는 최세영(1992)에 의해 발표된 비반응성 염소 농도 분포를 보인 것인데 한강변에 위치한 관측공(위치 번호 2,3,4)의 염소농도가 상암동(위치번호 a와 1)보다 훨씬 큰 값을 보이고 있어 한강이 오염되는 정도가 상암동 보다 큰 것으로 나타나고 있다. Table 2의 관측공 2, 3의 염소농도는 오염물 이동해석의 정확도를 검증하기 위하여 사용되었다.

해석에 사용된 입력계수의 검증

본 매립장의 매립이 수행되는 동안의 주변 환경오염에 대한 고려가 되어 있지 않았던 관계로 현장에 대한 특성치 조사가 거의 되어 있지 않아, 매립장내의 지하수 위치, 매립장내의 오염원의 농도 등은 현장에서 입수가 가능한 데이터로부터의 추정이 불가피 하였다. 지하수면의 높이는 1985년 최대 쓰레기 매립고가 25m 였을때 15m에 달하였으므로 매립장내의 지하수면의 높이가 쓰레기 매립고의 높이증가와 비슷한 경향을 보일 것으로 가정하여 약 15-25m 사이에 위치할 것으로 추정하였다(Figure 3). 장래오염원 농도의 변화는 쓰레기 매립장이 폐쇄된 1992년까지 선형적인 증가를 보이다가 그후 30년동안 계속 감소하는 것으로 가정하였다.

Table 2에서 구해진 입력치와 추정치를 사용 유한요소 수치해석 프로그램 CTRAN (Geo-slope, 1991)으로 구한 1992년 당시의 매립장 지반의 염소 농도 분포는 Figure 4와 같다. 1992년 매립장내에서 측정된 염소농도가 2400mg/l 이었으며(최세영,1992), 이를 이용 오염물 이동 수치해석 프로그램을 수행하여 구한 관측점 2와 3 부근의 오염물농도 추정치($C/C_0=0.62$) 1448mg/l 은 Table 2의 관측공 2, 3 부근의

Table 1. Hydrogeological properties of the landfill

description	soil	measurement type	measured value	reference
hydraulic conductivity (m/sec)	surface sand/silt layer	slug test	4.0×10^{-5}	Choi(1992)
		slug test	1.03×10^{-5}	Hans Eng. (1992)
	deep sand/gravel layer	pumping test	5.5×10^{-4}	Hans Eng. (1992)
		laboratory test	4.6×10^{-6}	Saegil Eng. (1992)
longitudinal dispersivity	deep sand/gravel layer	laboratory test	2.1×10^{-5}	Saegil Eng. (1992)
		tracer test	> 5m	Hans Eng. (1992)

Table 2. The concentration of chloride(Cl) in the landfill(after Choi,1992)

location	1	a	2	3	4	b
concentration (mg/l)	125	140.2	1406.1	1397.1	1250.6	26.6

*Measurement location is shown in Figure 1.

*Location a. b: surface water sampling site : 1, 2, 3, 4 : monitoring well

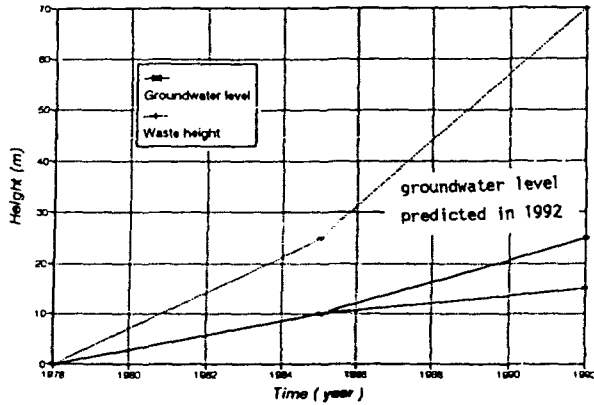


Figure 3. A predicted change of groundwater level based on the change of waste height through the period of waste disposal

측정농도와 근접하고 있어 본 논문에서 사용한 오염물 이동 모델이 현장의 오염물 농도 분포 상태를 잘 대표하고 있음을 알 수 있다.

오염물이동의 추정

본 절에는 매립장 폐쇄후 30년동안 오염물 분포 상태를 조사한 분석결과를 보인 것이다. 본 분석의 주안점은 다음과 같은 사항에 주어졌다.

(1)매립장 사면 선단부에 설치된 관측공 A와 한강변 근처의 관측공 B(Figure 2)에서 시간경과에 따른 농도 변화의 매립장내 오염원 농도 변화와의 비교 검토

(2)매립장 내 침출수면과 분산계수의 변화가 한강변에 위치한 관측점 B에서의 농도 변화에 미치는 영향의 분석

Figure 5는 첫번째 경우에 대한 해석 결과를 보였는데 두 관측 지점에서의 시간 경과에 따른 오염농도의 변화는 오염원 농도의 변화와 비슷한 경향을 보이거나 최대농도가 이루어지는 시간은 매립장 사면부 A지점에서는 오염원의 최대농도가 형성된 1992년에 비교하여 10년, 한강변 B지점에서는 17년 이후에 도래되는 것으로 나타났다. Figure 6에는 관측 지점 A와 B에서의 매립장내 지하수위와 지반의 종단 분산계수 변화에 따른 농도를 도시하였다. 두 매개변수의 증가에 따라 두 지점에서의 농도 증가가 이루어졌다. 지하수면의 증가에 따른 오염물 농도 증가 비율은 지하수면의 높이가 커짐에 따라 증가하는 반면 분산계수의 증가에 따른 오염물 농도 증가는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있어 매립장

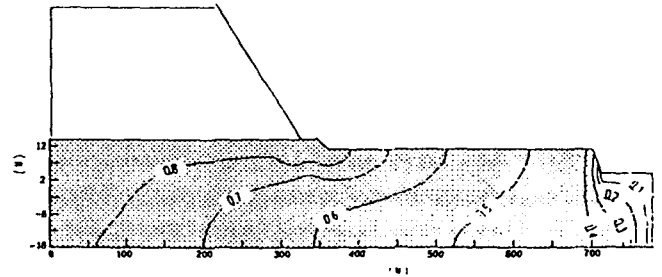


Figure 4. Contours of relative concentration (C/C₀) at 1992 for Nanjido landfill

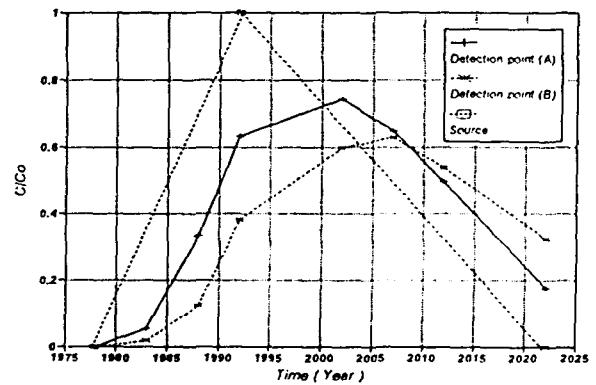
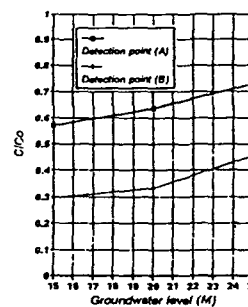
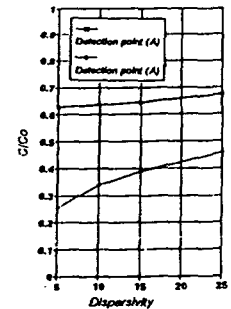


Figure 5. Relative concentration versus time at the toe of the landfill (point A) and at riverside (point B)



(a) Groundwater level



(b) Dispersivity (α)

Figure 6. Effects of hydraulic heads and dispersivity on the relative concentration for Nanjido landfill

오염물 이동 농도 분석에 있어 정확한 지하수면 위치 추정이 분산계수 추정에 비하여 상대적으로 더 중요함을 알 수 있다.

지하수 흐름 모델을 이용한 침출수 차수 효과 분석

한강 및 샛강으로의 침출수로 인한 오염을 저감하기 위하여 매립장 상부에 불투수 커버층을 형성하여 침출수를 줄이거나 매립장 주위로 차수벽을 설치하여 침출수 이동을 막는 방안, 매립장내에 수직 또는 수평 침출수 추출공을 설치하여 침출수를 양수 또는 자연동수경사로 인하여 흘러 나와 제거

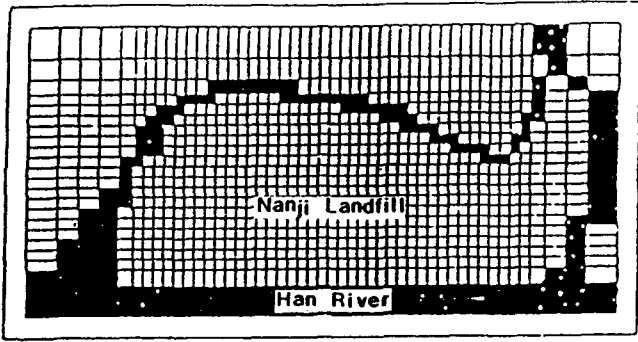


Figure 7. Finite difference meshes and boundaries

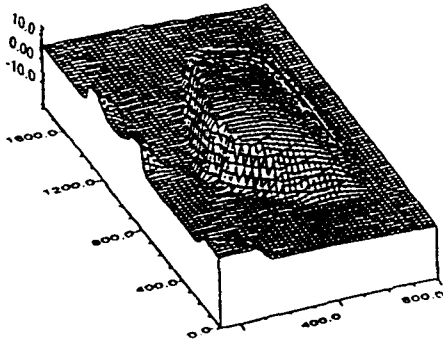


Figure 8. Hydraulic head distribution with the wall at the upgradient (No final cover)

하는 방안 등 여러가지를 생각하여 볼 수 있다. 이들중 침출수의 이동을 직접적으로 차단하는 방안은 매립장 주변으로 차수막을 설치하는 것이며 다른 방안들은 차수막설치 방안과 병용하거나 차수막설치 방안에 대한 대안으로 고려하여 볼 수 있을 것이다. 차수막을 설치하는 경우에도 매립장 주변을 완전히 차단하는 완전차수와 한강변 또는 상암동 쪽만을 부분차수하는 방안등 여러가지 방법이 있을 수 있다.

매립장 주변 지반에 차수막을 부분 설치할 경우를 가상하여 차단벽을 한강변에 설치할 경우와 상암동쪽에 설치할 경우에 대하여 최종 불투수 덮개가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 분석 하였다. 매립장 주변지반을 차단벽으로 완전 차수하는 경우는 침출수의 발생원이 매립장 상부로부터의 침투수만으로 제한되므로 이들을 유효하게 차단한다면 공학적인 문제점이 발생하지 않을 것으로 사료되어 본 분석에서는 제외하였다.

본 해석에 사용된 수치해석 모델은 수리지질 분야에서 보편적으로 사용되는 지하수흐름 유한차분 수치모델인 MODFLOW를 사용하였다.

입력계수 결정

해석영역의 경계는 지하수의 흐름방향을 광역적으로 관찰하기 위하여 매립지를 중심으로 북쪽과 서쪽의 구릉지와 동쪽의 지천수계 그리고 남쪽의 한강 수계로 하였다. 모델시험

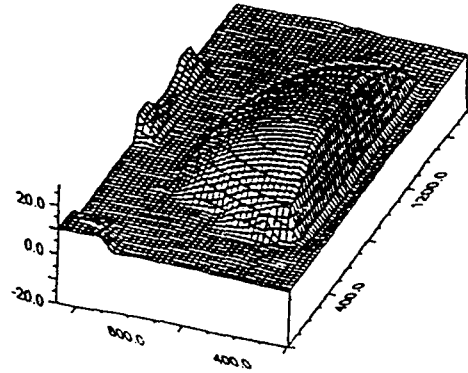


Figure 9. Hydraulic head distribution with the wall at the downgradient (No final cover)

을 위한 격자망은 X방향 49, Y방향 23으로 총 1,127개의 요소로 구성하였으며, 요소의 크기는 최대 125m, 최소 31.25m로 하였다. 매립지 내에서의 지하수위 변동을 모델시험하기 위한 경계조건은 셋강 수위(2.5m-6.0m)와 한강 수위(2.5m)를 일정 수두로 기반암층(EL -20.0m)은 불투수층으로 경계조건을 지정하였다(Figure 7).

이 해석을 수행하는데 있어서의 조사자료의 부족으로 인하여 매립지내로의 침투량과 차단벽의 제원에 대하여는 다음과 같이 가정하였다.

- 매립지내에서의 침투율은 0.229 cm/day이다.(이로 인한 매립지 중앙부의 최고수위는 17m를 형성)
- 차단벽의 폭은 1m, 투수계수는 10^{-9} m/sec이며, 외력에 의한 변형이 없고 화학적반응에 의한 손상이 없다.

최종덮개를 설치하지 않을 때의 차단벽 효과

최종덮개를 설치하지 않았을때 매립지 상부로부터의 침투수는 매립장 내부에 형성된 지하수면에 도달하여 지하수위 상승의 원인이 된다. 본 해석에서는 경제적인 측면과 매립지 주변지반의 수리지질 조건 들을 감안하여 최종덮개가 없는 경우에 대한 차단벽을 매립지를 중심으로 지하수 흐름방향의 상류측 셋강변에 설치했을 경우와 하류측인 한강변에 설치했을 경우로 나누어 수두분포의 변화와 흐름방향을 분석 하였다.

차단벽을 상류측에 셋강을 따라 기반암까지 설치하고 계산을 수행한 결과, Figure 8과 같은 수위분포를 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 차단벽 주변에서의 수위는 28m까지 상승하였는데 이는 원래의 수위보다 11.2m 상승한 것이며, 이 수위상승은 전반적으로 차단벽 주변으로 치우치고 있다. 이러한 현상의 이유는 지하수의 분기점이 본래 매립지 지반중에 있었으며, 침투수는 분기점을 중심으로 저수두 방향으로 흐르게 되는데 상류측에 설치된 차단벽의 영향으로 배수가 되지 않고 지체되어 수위가 상승하는 결과를 초래한다.

하류측인 한강을 따라 매립지쪽에 차단벽을 설치하고 해석한 경우 Figure 9에 보여진 수두분포와 같이 상류측에 차단벽을 설치했을 경우와 같은 현상을 보이고 있는데 이때의

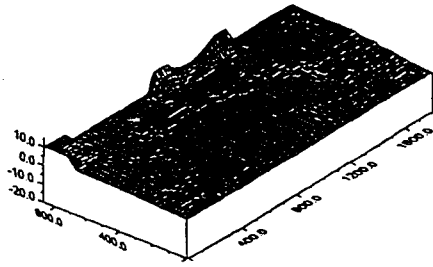


Figure 10. Hydraulic head distribution with the wall at the upgradient (With final cover)

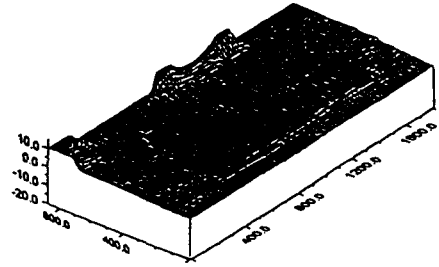


Figure 11. Hydraulic head distribution with the wall at the downgradient (With final cover)

최고수위는 역시 28m에 달하고 있다. Figure 8과 Figure 10에서 알 수 있듯이 차단벽을 하류측인 한강쪽에 설치했을 경우가 상류측에 설치했을 때의 수위상승효과는 거의 같게 나타나지만, 매립지 내부에서의 전체적인 침출수량은 상류측에서 흘러 들어오는 지하수를 차단하게 되어 상류측에 설치(Figure 8) 했을 때 적게 발생한다.

최종덮개를 설치했을 때의 차단벽 효과

매립지의 표면에 불투수층의 최종덮개를 설치하여 강우의 침투를 방지하고 침출수의 발생을 억제한 후 지하수의 유입을 차단하기 위하여 매립지를 중심으로 지하수 흐름의 상류측과 하류측에 각각 차단벽을 설치한 경우를 비교하였다. 본 경우에는 침투수량이 없는 조건외에 차단벽 규모 및 수리특성, 매립지반 주변 수리지질특성 등 다른 모든 조건은 최종덮개를 설치하지 않았을 경우와 동일하다. 상류측에 차단벽을 설치한 후의 수두분포는 차단벽 주변의 4m에서 한강변의 3.5m로 아주 완만한 분포를 보이고 있다 (Figure 10).

이 경우 지하수의 흐름은 전체적으로 한강쪽을 향하고 있으며, 동쪽(셋강 상류)으로부터 매립지쪽으로 약간 지하수의 유입이 있는 것으로 나타나고 있다. 하류측에 차단벽을 설치했을 경우의 수두분포 역시 아주 완만한 분포를 보이고 있는데 지하수의 흐름 방향은 한강변에 설치한 차단벽의 영향으로 북동쪽에서 남서쪽으로 향하고 있는데 수위차는 상류 6m에서 하류 3m에 이른다. 이 경우의 수두분포는 Figure 11에서 보여진 바와 같다.

결 론

본 논문에서는 유한요소 오염이동 수치모델(CTRAN/W)을 이용하여 난지도 매립지의 침출 폐쇄이후 지반을 통한 침출수 이동상황을 검토하고 유한 차분 지하수 흐름 모델(MODFLOW)을 이용하여 침출수 이동을 차단하기 위한 차수벽 설치시 설치 위치 및 매립장 상부의 최종 저투수 복토재 설치여부가 매립장내 침출수위에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 침출수 이동 모델 해석 결과 매립장에서 발생한 침출수로 인하여 한강오염이 최대에 도달하는 시기는 매립장 폐쇄 후 17년 후가 될 것이며 이때 비반응성인 염소의 농도는 1488mg/l로 추정되었다.

2. 침출수 이동에 영향을 미치는 매개 변수인 매립장내의 침출수 높기와 확산계수가 증가 할 경우 한강으로 흘러드는 침출수의 농도도 증가한다. 그러나 침출수위면이 증가 할수록 침출수 농도 증가 폭이 커져가는 반면 확산계수의 크기 증가에 대한 침출수 농도 증가 폭은 작아져서 일정 농도로 수렴하는 경향을 보인다. 이는 본 매립장의 오염물 이동이 침출수 확산(dispersion)보다는 이류(advection)에 의해 지배되며 침출수위의 정확한 측정이 확산계수의 정밀치 보다 본 매립장의 침출수 거동 해석에 있어 상대적으로 더 중요함을 보여준다.

3. 슬러리벽을 이용한 부분차수 효과를 분석한 결과 매립장 상층부 쓰레기층으로부터 침투로 인한 침출수 발생이 많지 않을 경우 상류 구배인 상암동쪽의 차수가 그 방향을 통하여 흘러드는 지하수의 영향으로 인하여 한강변에 차수벽을 설치하는 경우보다 매립장내 침출수 높기를 저감하는데 효과적임을 보여 준다. 매립장 상부에 저투수 또는 불투수성의 최종복토 층을 설치하는 것은 매립장 주변으로 차수벽을 설치하는 일과 마찬가지로 중요한 요소임을 보여 주며 매립장 지반을 통한 침출수의 이동에는 이러한 여러요소들이 복합적으로 고려되어 검토되어야 함을 보여 준다.

참고문헌

세길 엔지니어링, 1992, 난지도 매립장의 지반조사 보고서, 보고서 최세영, 1992, 매립장 침출수에 의한 지하수 오염에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문
한서 엔지니어링, 1992, 난지도 매립장의 수리지질 보고서, 보고서 Geo-slope International Ltd, 1991, Finite element contaminant transport analysis(CTRAN/W), Ver.2 Calgary, Alberta, Canada
Michael G. McDonald and Arlen W. Harbaugh, 1993, A modular three dimensional finite difference groundwater flow model