한국토양환경학회 1996년
추계 학술 발표회 논문집

난지도 매립지의 침출수와 가스 거동에 관한 수리지질학적 해석

김 윤영 · 이 강근
서울대학교 자연과학대학 지질과학과

요 약 문

난지도 매립지는 매립층의 불균질성과 고온의 침출수 및 가스의 흐름이 동시에 복합적으로 일어나는 현상 때문에 수리지질학적으로 매우 복잡한 지역이다. 난지도의 수문층서단위 조사와 디스크-장력 침투계(Disc tension Infiltrometer)로 불포화대 수리 특성을 추정하였으며 가스 거동 현상을 이해하기 위해 지온을 측정하였다. 매립지 주변의 지하수위 변화를 조사하기 위해 양수정과 다중-수위관측정(Multi-Level Monitoring Well)에서 수위변화를 관측하였다. 불포화대 수리특성과 기상자료를 바탕으로 매립지로의 순침투량을 추정하였다. 이것을 근거로 총 침출수 발생량을 추정하였으며, 기저 지하수면 상부에 분포하는 포화 침출수대, 즉 부유침출수의 생성 메카니즘에 대한 연구도 수행하였다.

1. 매립지의 수문층서단위 및 자연환경

난지도 매립지의 자연 환경 특성은 매립지 인근 지역의 기후, 지형, 지질, 토양, 수계 등의 특징이 주로 결정한다. 주로 가는 모래로 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 파악 되어야 할 지역이다.

난지도는 원래 한강하도의 충적층과 밀접한 관계가 있는 제 4 기의 하천범람지로 이루어져 있었다. 기반암은 선구조들이 발달하는 선캄브리아기의 편마암으로 되어 있다. 이들 산지 사이에 한강의 지류인 홍제천은 북악산에서 시작하여 서쪽으로 흘러 난지도의 샛강으로 유입되고, 불광천과 녹번천은 은평구에서 남쪽으로 흘러 샛강으로 흐른다. 이들은 모두 한강으로 유입되어 약 40km 떨어진 서해로 유입된다. 매립지는 침출수에 의한 지하수 오염 취약성이 매우 큰 충적층 위에 있으며 폐기물 매립지와 하부 충적층은 한강과 밀접히 관계하며 수리지질학적으로는 자유면 상태이다. 매립저면의 원지반은 해발고도 7-13m 정도이며 가는모래 또는 모래로 구성된 충적층의 평균두께는 20m로 분포한다. 충적층 하부에는 4m 정도의 풍화대가 존재하고 이층의 하부에는 2차 유효공극을 가진 파쇄구조가 발달하는 편마암으로 분포되어 있다.

현재 난지도 매립지의 해발고도는 제 1매립지는 최고 97m, 제 2매립지는 최고 104m 정도이다. 매립지 사면의 경사도 범위는 수평거리와 수직거리의 비가 2 : 1 정도이고 각도로는 25-27도를 이룬다. 서울기상청의 자료에 따르면 서울지역의 년 평균기온은 12℃이고, 1987년부터 10여년간 년 평균강수량은 1,275.7mm이다.

2. 지하수위 변화와 지중온도 분포

지하수위는 양수정(PT-1)과 다중-수위 감시정 (MLMW)에서 측정하였다. 기압영향율(Barometric efficiency)은 대기압에 대한 지하수위의 반응으로 나타낼 수 있다. 이 연구에서 기압영향율에 대한 수위변화폭은 관측정의 심도에 따라 다르게 나타난다. 거의 자유면대수층에 해당하는 얕은 심도에 스크린 처리된 MLMW5는 기압영향율이 49.0%이고, 기반암(45m)에 속하는 심도에 스크린 처리된 MLMW1는 74.5%까지 나타난다. 반면 매립층에서 기반암까지 전구간에 스크린 처리된 양수정(PT-1)에서는 62.7%의 값을 나타낸다. 이것은 주변 지질 매체에 의한 지하수 관정의 밀폐도 변화를 나타낸다.

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

깊이 30, 100cm에서 측정한 온도 분포에서 보면 100cm 심도에서의 최고 온도가 85도까지 상승하는 지점도 볼 수 있다. 이 곳은 가장 많은 수증기가 발생하는 지역이고 매립 사면이 불안정하고 쪼개짐도 발달하는 곳으로 높은 온도는 고온의 매립가스와 수증기의 영향으로 보인다. 약 2년 동안 이러한 수직 불연속면을 관찰한 결과 매립지 전역에 걸쳐서 시간에 따라 그 위치가 변하고 있음이 관찰되었다. 하루의 온도변화를 토양에서 깊이별로 측정한 결과 가스가 분출되는 지역에서는 깊이 50cm일 때는 온도의 분포가 시간이 변함에도 불구하고 섭씨 76도에서 거의 일정한 값을 보이고 10cm에서도 섭씨 40도에서 일정한 값으로 나타나 지표 온도 변화에 영향받기 보다는 가스의 분출에 지배를 받는 것으로 보인다.

3. 불포화대 수리 특성과 수분 이동 추정

난지도 매립장의 오염된 침출수 거동을 조사하기 위해 불포화대내의 수리 특성을 조사하였다. 침출수의 누수 또는 분출 지점은 크게 두 경우로 나눌 수 있는데, 해발 60-70m의 비교적 높은 지역과, 40-45m의 매립지 중간 지점에 주로 위치한다. 이에 비해 매립지 경계부위의 기저지하수위의 높이는 해발 6-9m에 위치한다. 다시 말해 매립지내 불포화대안에 포화대가 부분적으로 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. 불포화 수리전도도, 포화 수리전도도, 수착도(Sorptivity), 토양의 미세공극 모관수 길이 등을 결정하기 위해 디스크-장력 침투계를 이용할 수 있다. 이 연구에서는 매립지내에 불포화대의 수리 특성을 추측하기 위해서 디스크-장력 침투계를 이용하여 침투 작용을 수행하였다.

매립지를 덮고 있는 토양 특성, 매립물 노출 정도, 입자 크기 등을 근거로 매립지 전역을 12개 지역으로 나누었다. 12개 지역의 포화 수리전도도를 구하기 위해 디스크-장력 침투계를 사용하였다. 디스크-장력 침투계 실험에서는 세단계의 장력을 물 주입 압력으로 사용하였고 대체로 -15.4, -9.2, -3.1cm의 장력(압력수두)을 주었다. 계산된 포화 수리전도도의 실험값의 분포가 9.511×10^{-5}에서 1.13×10^{-3}cm/sec까지 분포한다. 포화 수리전도도의 범위와 난지도 상부의 상태에 대한 야외 관찰을 기초로 3개의 영역(zone)으로 나누어서 매립지 내로 침투량 계산에 이용

하였다. 이 연구에서는 Kool과 van 'Genuchten이 개발한 HYDRUS의 입출력 기능과 경계조건 처리 방법을 일부분 수정하여 수분거동 모사에 사용하였다.

4. 순침투량(Net Infiltration Rate) 계산

난지도 매립지에서 순침투량을 추정하기 위해서 불포화대에서의 포화 수리전도도의 값과 매립지 상부의 면적을 이용하였다. 포화 수리전도도의 값의 분포를 3cm/hour 이상 지역, 1.77 - 3 cm/hour인 지역, 그리고 1.77 cm/hour 미만인 지역으로 분류하였다. 매립지 사면에 해당하는 지역은 수리전도도가 가장 높은 지역과 비슷하여 3cm/hour로 계산하였다. 각 영역에서의 포화 수리 전도도 값은 모델에서 입력 값으로 사용된다. 평균 수리전도도는 매립지 상부의 평균값으로 낮은 값에서부터 K_s = 14, 48과 88 cm/day, 사면에서는 88cm/day로 주었으며, 이 값들을 이용하여 네 영역에서 각각의 수분이동 모사 결과를 얻었다. 매립지의 계산된 총면적은 2,715,000m^2이고, 매립장 상부의 면적은 608,903.3m^2이다. 사면의 면적은 2,103,019m^2으로 나타나고 각 영역의 면적과 순침투율을 곱하여 총침투량으로 2,841m^3/day의 값을 얻었다.

5. 부유 침출수의 시뮬레이션

침출수 누수 지점은 계절에 따라 위치와 양이 변하지만 조사 기간에는 11개 지역에서 관찰되었다. 침출수가 누수 되는 위치는 대부분 기저 지하수보다는 높은 해발 40m에서 75m까지 높이에서 나타난다. 이런 사실에서 매립지 중간에 어떤 형태로든 부유 침출수층이 있음을 알 수 있다. 매립층안의 일정 심도에 불투수층이 있다면 이런 현상을 설명할 수도 있을 것이다. 여기서는 매립장 내의 부유 침출수층 형성에 대한 하나의 모델로서 유효 공극율, 수리 전도도, 수증기 증발-응축 및 가스압력 변화 등의 복합 작용으로 일어날 수 있는 부유 침출수의 형성에 대한 가상 모델을 제시한다. 시추 시 매립층의 온도 측정 결과를 보면 매립지 표면에서 아래 방향으로 약 15m이후부터 온도가 급격히 올라가는 것을 볼 수 있다. 또한 함수비도 약 15m이하로부터 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 부유 침출수 형성의 기본 메카니즘을 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. 부유 침출수의 형성 과정을 정량적으로 살펴보기 위해 수리 전도도 및 유효 공극률의 수직적 분포, 그리고 물-수증기의 증발-응축과정을 고려하거나 하지 않는 다섯개의 경우에 대한 매립지내 불포화대에서 함수비 분포를 계산하였다. 함수비의 분포는 수정된 HYDRUS 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이 결과에 의하면 수리전도도나 유효 공극률의 변화 및 수증기 증발-응축의 복합작용으로 인해 매립층 일부 구간에서 포화도가 급격히 증가할 수 있음이 나타난다.

그러나, 완전히 포화된 부유 침출수층을 설명할려면 포화도를 증가시킬 수 있는 또 다른 요소를 고려해야 할 것이다. 함수비의 증가는 가스의 투수성을 감소시킨다. 가스의 투수성이 감소하면 상층부로 향하는 가스압이 증가하게 된다. 위로 향하는 가스 압력은 아래로 향해 흐르는 물의 흐

름을 중지 시키고 수분의 함량은 더욱 증가할 수 있는 원인을 제공한다. 이런 메카니즘이 결합되면 결국 부분적으로 매립장내에 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.