

매립지 근처에서 산성오염물로 인한 토양오염의 지연에 대한 수치적 연구

윤도영, 한춘, 김민찬*,
광운대학교 화학공학과, *제주대학교 화학공학과

요약문

산성침출수에 의한 광산폐기물 매립지 근처의 지하 환경의 오염 및 대처 방안의 효과를 수치적으로 예측하였다. 이를 위하여 지하토양에서 Darcy 법칙을 사용한 침출수의 흐름과 이산-분산에 의한 오염물질의 이동현상을 예측하기 위하여 Galerkin 유한요소법을 활용하였다. 토양오염의 지연을 위하여 석회석 차수막을 연직형과 수평형을 도입하여 그 효과를 조사하였다. 수평차수막에서의 수착이 오염물질의 이동을 지연시키는데 상당한 효과가 있는 것으로 나타났다. 반면에 연직차수막은 지하수의 우회유동으로 인한 오염물질의 확산이 가중되고 있는 것으로 예측되었다. 전반적으로 침출수의 흐름은 광산매립지 제방 근처에서 강하게 일어나는 것으로 나타났다. 이를 근거로 차수막의 효과적인 설치방안이 고안되어야 할 것으로 보인다.

주제어: 매립지, 침출수, 석회석차수막, 이산-분산모델, Galerkin 유한요소법

1. 서론

폐광산을 비롯한 광산폐기물 매립지를 통해서 배출되어지는 중금속 오염물질은 산성비 또는 산성 폐수에 의해 용출되어 인근토양을 심각히 오염시키고 있다. 산업의 고도화와 함께 생활수준의 향상으로 식용수의 문제에서 양 뿐만 아니라 질이 중요하게 되므로, 토양오염의 억제와 양질의 지하수의 보존에 대한 관심이 집중되고 있다. 따라서 공업, 농업, 도시활동으로 인한 지하수 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위해 지하수 오염기구의 규명과 오염물질의 이동에 대한 신뢰성있는 예측은 중요한 연구의 대상이 되어 왔다.[1]

오염물질의 이동에 대한 연구에 초기에는 주로 간단한 계에 대한 해석적인 방법이 사용되었으나, 최근에는 컴퓨터의 발달과 함께 좀 더 복잡한 계를 해석하기 위해서 수치적인 방법이 사용되고 있다. Freeze 와 Cherry [1]는 분산 및 지연의 효과를 무시한 대류 및 확산에 의한 오염물질의 전달을 유한차분법을 사용하여 예측하였다. 유한차분법을 사용한 연구로는 대류 및 분산의 효과를 포함하는 오염물질의 전달 모델링과 선형 등온선 형태의 가역적 수착에 의한 지연의 효과를 포함하는 오염물질의 전달현상해석이 포함되기도 한다. 반면에 Pickens 와 Lennox [2]는 유한요소법을 사용하여 지하에서의 오염물질의 전달현상을 해석하였다. 최근 Kim 과 Yoon [3]은 Darcy 법칙에 의한 지하수의 유동현상과 오염물질의 화학

반응과 이산-분산현상을 설명할 수 있는 유한요소법에 의한 코드를 개발하여, 수도권매립지를 대상으로 하여 인근토양오염 현상 과 차수막의 효과를 해석하였다.

본 연구에서는 광산매립지에서 산성 침출수에 의한 지하 환경 오염 메카니즘을 검토하고 오염 방지 및 교정 대안의 효과를 정량화 하기 위한 방안을 고찰하였다. 이를 위하여 본 연구는 침출수에 의한 지하 환경의 오염을 방지하기 위하여 매립지에서 발생하는 산성침출수의 이동을 차단하는 방법으로 석회석 차수막을 도입하였다. 지하수의 흐름과 오염물의 이동은 Kim 과 Yoon [3]에 의하여 개발된 코드를 사용하여 해석하였다. 이를 통하여 산성 침출수의 토양과의 흡착반응을 이용한 산성침출수의 중화를 통하여 중금속오염물질의 용출에 대한 지연의 효과를 살펴보았다. 이와같은 연구는 최근 폐기물 매립지 주변의 침출수 유출로 인한 환경 관리 방안으로서의 인근 토양오염을 억제하기 위한 공학적 자료 확보에 있어서 중요한 역할을 하게 될 것이다.

2. 지하수와 오염물의 이동현상

지하 토양에서의 지하수의 흐름 및 오염물질의 전달을 유한 요소법으로 모델링하기 위하여 본 연구에서는 Kim 과 Yoon [3]이 사용한 바 있는 일반적인 가정을 사용하였다. 정상상태의 지하수의 흐름은 Darcy 법칙이 적용되는 범위에 있고, 오염물질과 지하토양과의 수축은 항상 평형 상태에 있는 것으로 가정된다. 침출수의 흐름에 대하여 오염물질의 이동은 이산(advection), 분산(dispersion), 수착(sorption), 변환(transformation)에 영향을 받는다. 이산은 Darcy 식에 주어지는 지하수의 흐름의 평균속도로 오염물질이 이동하는 것을 나타낸다. 그러나 오염물질은 수력학적으로 기대되는 흐름 방향으로부터 이탈하여 퍼지는 분산현상이 나타난다. 이러한 분산에는 분자확산과 기계적 분산으로 구분되며, 이들을 고려한 분산 tensor 가 사용되어 진다. 수착은 흡착과 탈착으로 나누어지며, 오염물질의 전체 농도에는 영향을 주지 않는다. 일반적으로 침출수에서 나오는 오염물질과 지하 토양사이의 수착은 매우 빨리 일어난다. 오염 물질의 농도가 높지 않은 경우에는 넓은 농도 범위에 걸쳐서 평형 관계가 성립한다. 본 연구에서는 선형 등온식을 사용한다. 화학적 반응 등의 변환이 무시될 경우, 포화된 지하 토양에서 오염물질의 이동을 지배하는 방정식이 적용된다. 이때 화학반응은 1차반응으로 제한된다. 이와같은 가정하에 지배방정식들을 적절히 Galerkin 수식화하면 본 연구에서 사용되는 유한요소법 코드의 기본식이 유도될 수 있다. 이에 대한 설명은 Kim 과 Yoon [3]에 자세히 나타나 있다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서 대상으로하고 있는 계는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2차원계이다. 그림에 보이는 바와 같이 광산매립지의 수위를 2m/yr, 매립지 밖의 수위를 0m/yr 로 가정하였다. 본 연구에서는 석회석차수막의 효과를 정량적으로 예측하기 위하여, 차수막이 없는 경우와 차수막이 있는 경우를 구분하였다. 한편 As 와 같은 중금속을 함유하고 있는 광미는 연직 방향으로 지표면으로부터 깊이 5m 그리고 기준축으로 부터 수평방향으로 20m 이내에 매립되어 있는 것으로 가정된다. 따라서, 차수막을 설치할 경우 중금속이 함유된 광미토양은 일반토양과 완전히 구분되어 있다. 지표면의 수평차수막의 주변 경계에는 두께가 2m 인 불투과성 제방이 설치되어 있는 것으로 가정되어 있다. 본 연구에서는 직사각형 element를 사용하였으며, element 의 528개 그리고 node 수는 588 개로 설정되었다. 본 연구에서는 유한요소법하에서 침출수의 수위와 속도분포가 우선적으로 구해진다. 구해진 수두와 속도

분포가 Fig. 2 와 3에 나타나 있다. 그림에서 수두의 등포텐셜선들이 지표면의 제방을 중심으로 대칭을 이루고 있으며, 이는 침출수의 이동을 보여준다. 한편, 토양의 투수계수가 변화되는 지점에서 등포텐셜선들의 변화가 나타나고 있어 투수계수의 변화가 유동의 변화에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다. 속도벡터의 그림을 보면 제방의 경계면에서 강한 흐름이 존재하고 제방에서 멀어지는 하부에서는 거의 평행한 흐름이 존재한다. 즉, 침출수의 유동을 나타내는 유동벡터는 투수계수가 큰 지역에서 크게 나타나고 있으며, 투수계수가 작은 지역에서는 작게 나타나고 있어 매립지의 제방의 하부에서 침출수의 유동이 빠르다는 것을 보여주고 있다. 이와같은 속도장하에서 구한 1, 5, 10년후의 산성침출수의 오염물질의 농도분포를 Fig. 4에 도시하였다. 그림은 차수막이 설치되어 있지 않은 경우이다. 농도분포는 시간이 흐를수록 점점 하부로 그리고 우측에서 수두가 낮은 좌측으로 점점 확산되어 가고 있음을 볼 수 있다. 오염물의 이동은 초기에 지표면에서 토양의 하부로의 이동이 진행되나, 점차 시간이 흐르면 지하수의 유동방향으로의 진행이 확산과 함께 일어나게 될 것이다. 그림에서 보듯이 10년후에 오염물질의 농도가 1%가 되는 점이 이미 제방의 상당 부분까지 도달하므로, 궁극적으로는 오염물질이 매립지 제방을 완전히 통과하고 침출수의 유동에 많은 영향을 받아 농도분포가 침출수의 흐름과 유사하게 나타날 수 있음을 짐작할 수 있다. 본 연구에서는 직사각형의 석회석차수막을 설치하여 광미토양을 일반토양과 격리하였을 경우에 대한 전체토양내의 산성 오염물질의 분포를 Fig. 5 에 나타내었다. 그림에서 보듯이 차수막 설치초기인 10년이내에는 대부분의 오염물질이 수평차수막 근처에서 벗어나지 못하고 있음을 알 수 있다. 분배계수가 커지게 되면 수축에 의한 영향이 점차 증가되어지고 오염물질이 지하토양으로의 전달력이 저하되는 경향을 보여주게 된다. 또한 수축으로 인한 토양오염물의 이동에 대한 지연요인들이 전체적인 농도분포를 크게 감소시키게 되므로 분배계수(K_d)가 비록 작다고 할지라도 수축에 의한 지연 효과는 매우 클 것으로 예측된다. 수평차수막을 연직방향으로 통과한 오염물은 토양의 성질이 다소 다른 광미토양과 접하게 되며, 이때에는 지하수의 흐름방향이 제방의 하부방향으로 우회되기 때문에 수직차수막으로의 유동량이 전체적으로 증가하게 된다. 이 경우 오염물의 지하로의 이동이 수직과 수평차수막의 모서리로부터 발생되어지게 될 것이다. 전반적으로 시간이 경과할수록 오염물은 제방의 하부를 통과하여 점차 지하 및 하부로의 방향으로 이동하고 있다. 10년 경과이후 차수막의 모서리로부터 비롯된 오염물질은 제방하부를 이미 통과하였으며, 이와 같은 결과는 시간이 흐를수록 점점 심각해짐을 알 수 있다. 반면에 제방하부로의 지하수 유동에 의한 오염물의 확산은 차수막이 설치되어 있지 않은 경우와 유사하지만, 지하로의 오염물 이동은 다소 지연되는 것으로 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 침출수에 의한 지하 환경의 오염 메카니즘을 검토하고, 침출수에 의한 지하 환경 오염을 방지할 수 있는 방안을 고려하여 그 효과를 정량화 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 새로이 구축된 Galerkin 유한요소법을 근거로 지하토양에서의 오염물의 이동 현상을 예측하였다. 본 연구의 결과에 의하면 수축이 침출수중의 오염 물질의 이동에 강한 영향을 미침을 알 수 있으며, 이를 활용한 석회석 차수막의 설비로 인한 광미지역의 격리효과는 탁월한 것으로 나타났다. 지표면으로 부터 깊이가 1m 인 수평차수막의 경우에는 설치후 50년정도에 교체가 고려되며, 반면에 두께가 1m 인 연직 차수막의 경우에는 지하수의 흐름으로인한 오염물의 확산효과가 점차 가중되므로 교체년한이 단축될 것으로 보인다.

이와 같은 토양오염요인들은 흡착반응 및 이동현상에 따른 효과들을 엄밀히 예측하여 2차적인 처리방안들이 고려되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. Freeze, R.A. and Cherry, J.A., Groundwater, Prentice-Hall (1979).
2. Pickens, J.F. and Lennox, W.C., *Water Resour. Res.*, 12, 171 (1976).
3. Kim, M.C. and Yoon, D.Y., *HWAHAK KONGHAK*, 35, 557 (1997).

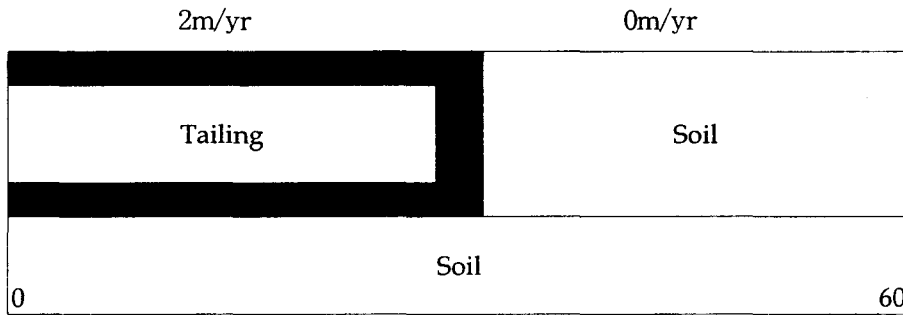


Fig. 1. Schematic diagram of landfill of mining wastes.

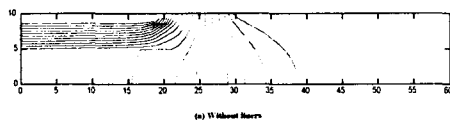


Fig. 2. Head distribution.

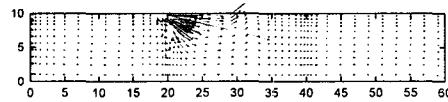


Fig. 3. Velocity profile.

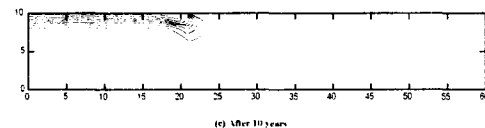
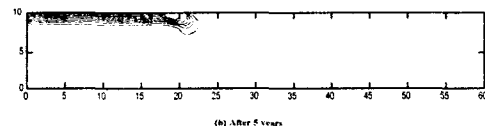
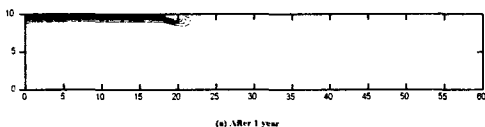
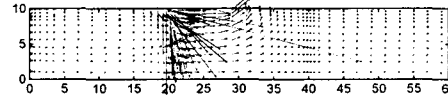
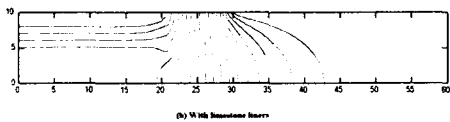


Fig. 4. Concentration profile without limestone chamber.

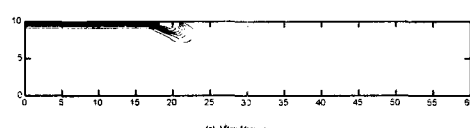
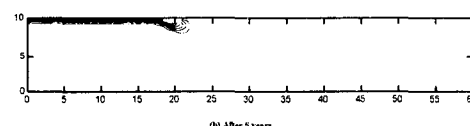
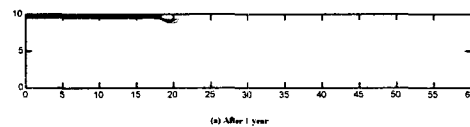


Fig. 5. Concentration profile with limestone chamber.