

# MODFLOW를 이용한 유류오염지역 지하수 유동 및 오염물질 이동 평가

전권호, 문철환\*, 이진용\*\*, 이재영\*

환경관리공단 토양보원팀 · \*서울시립대학교 환경공학부

\*\* (주)지오그린 21

e-mail : attest@emc.or.kr

## <요 약 문>

This study area has been contaminated by oils. To identify contaminated ranges and to assess the possibility of contamination dispersion, monitoring wells were installed and slug test, field soil permeability test, automatic or manual measurement of groundwater table, and groundwater quality analyses in field and laboratory were performed. In addition, a groundwater modeling program was used to assess the possibility of oil contamination dispersion, based on field data and groundwater quality data. The results showed that concentration of oil contaminants in groundwater have been decreased by dispersion and adsorption.

**key word** : MODFLOW, groundwater contamination, BTEX, TPH, JP-8

## 1. 서 론

유류 저장시설에서 유류가 누출되어 토양을 오염시킬 경우 중력에 의해 수직으로 이동하다가 지하수면을 만나면 지하수를 따라 이동한다. LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)과 같은 오염물질은 물에 잘 녹지 않으며 물보다 가벼워 지하수면위로 이동하게 되므로 오염범위 파악을 위해서는 지하수에 대한 정밀조사가 필요하다. 지하수를 따라 흐르는 오염물질은 지하수면의 변동 등에 의하여 다시 토양 오염을 유발하므로 토양오염과 지하수오염은 상호 밀접한 관계가 있다. 그러므로 오염물질로 추정되는 물질이 LNAPL의 성질을 가지고 있고 지하수에 의한 오염확산이 예상되는 지역에서는 지하수 모델링 등 여러 가지 방법을 사용하여 정확한 오염원 및 오염범위를 파악하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 유류로 오염된 지역으로 오염범위 및 오염확산 가능성을 평가하기 위해 지하수관측정 설치, 순간수위변화시험 및 현장토양투수시험, 지하수위의 수동 및 자동측정 그리고 지하수질 현장측정과 지하수 오염물질 분석을 수행하였다. 또한 현장조사 및 지하수질 분석자료를 바탕으로 MODFLOW를 이용하여 유류오염의 확산 가능성을 평가하였다.

## 2. 연구대상지역 및 방법

연구대상지역은 행정구역상으로 강원도 원주시 태장동에 위치하고 있으며, 연구지역 남쪽 산 정상부에 군기지가 있다(Fig. 1). 군기지의 유류 저장탱크로부터 유출된 유류(JP-8)에 의해 산 하부 농경지에서 최초로 유류 누출이 확인되었다. 이에 유류누출 주변의 지하수 거동 및 오염물질 확산에 관한 연구지역으로 선정하게 되었다.

연구지역에 총 13개소의 지하수 관측정을 설치하였다. 지하수 흐름방향을 고려하여 최초 유류 누출이 확인된 부근을 중심으로 11개 관정(MW1~MW9)을 설치하였으며, MW10과 MW11 관정은 지역의 하부에 설치하여 오염확산 범위 및 지하수 흐름을 추정할 수 있도록 하였다. 이와는 별도로 연구지역의 산등선을 따라 4개의 관측정을 설치하였다. 유류오염물질의 이동방향이 지하수 흐름 방향과 일치할 것으로 판단, 모델링은 현재 상태의 수리지질학적 조건을 재현하는 정류(steady state)모사와 정류모사 결과를 바탕으로 MT3D를 이용한 오염물질 이동을 모의하는 부정류(transient state)모사를 수행하였다.



Fig. 2. Equipotential lines distribution and groundwater flow direction

## 3. 실험결과

### 3.1 현장시험결과

등수위선 및 지하수 유동방향을 Fig.2에 나타내었다. 산 정상에서 조사지역으로 등수위선이 조밀하게 형성되어 지하수가 산 정상부에서 논쪽으로 비교적 빠르게 이동함을 알 수 있으며 논쪽에서는 남동쪽에서 북서쪽으로 상대적으로 느리게 이동한다. 순간수위변화 시험을 통한 수리전도도 추정은 Bouwer and Rice(1976) 직선법을 이용하여 측정된 자료에 각 방법이 제시하는 값을 최적화시킨 결과, 연구지역의 평균 수리전도도는  $1.6 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$  으로 나타났다.

앞서 산정한 수리전도도와 등수경사 관계식을 이용하여 지하수의 평균유속을 계산한 결과, 산 정상에서 산 하부로 지하수 선형유속은  $2.9 \times 10^{-1} \text{m/day}$ 로 농경지에서의 지하수의 선형유속  $5.7 \times 10^{-2} \text{m/day}$ 보다 상대적으로 빠르게 나타났다. Guelph Permeameter를 이용한 현장-수리전도도값은 산 하부에 위치한 GP-W-1지점에서의 현장-수리전도도는  $5.34 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 계산되었는데, 이 지점은 실트와 진흙 등 투수성이 좋지 않는 토양을 많이 가지고 있기 때문이며, 저수지부근에서는  $1.14 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 상대적으로 높은 값을 보여주고 있다.

지하수 관정에서 채취한 지하수내 용존상태로 존재하는 BTEX 및 TPH의 분석결과 BTEX 성분 중 톨루엔만이 3개 시료(관측정 MW1, MW3, MW7)에서 검출되었는데 범위는  $30 \sim 390 \mu\text{g/l}$ 이며, TPH는 관측정 MW1과 MW3에서 검출한계값 정도만을 보였다.

### 3.2 모델링 평가 결과

Fig. 3은 조사지역의 지하수위의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 4에는 조사지역의 지하수 흐름을 나타내었다. 전체적으로 산 정상부와 남동쪽 논의 지하수위가 높게 형성되어 북서쪽으로 이동하는 것을 알 수



Fig. 2. Equipotential lines distribution and groundwater flow direction

있다. 또한 MODPATH를 이용한 입자 추적 결과 산 정상부의 유류저장탱크에서 최초 유류누출지점이 있는 산 하부로 유류오염물질이 이동하는 것으로 예측되었다.



Fig. 46. Results of modeling :  
groundwater level distribution



Fig. 47. Groundwater flow direction  
and particle  
pathlines(MODPATH)

유류저장탱크에서 유류가 지속적으로 지하수를 오염시켰을 경우의 이동형태를 모의하였다. 모델링의 목적이 오염물질의 이동경로를 파악하는데 있으므로 흡착은 고려하지 않았다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 전체적으로 오염물질의 이동이 느리며 산 정상부의 유류저장탱크에서 최초 유류누출지점이 있는 논쪽으로 이동하는 것을 보여준다.

Fig. 6은 현재 오염상태에서 추가 오염원이 제공되지 않는 상황, 즉 산 정상부의 오염원인 유류저장 시설이 제거되었을 경우를 가정하여 오염물질의 이동을 모의한 결과이다. 오염물질 거동이 시작된 후 2년경과를 기점으로 하여 이후의 오염농도 분포는 모든 지점에서 검출한계 이하로 나타났다.



Fig. 5. Transport model of oil leaking from oil storage tank

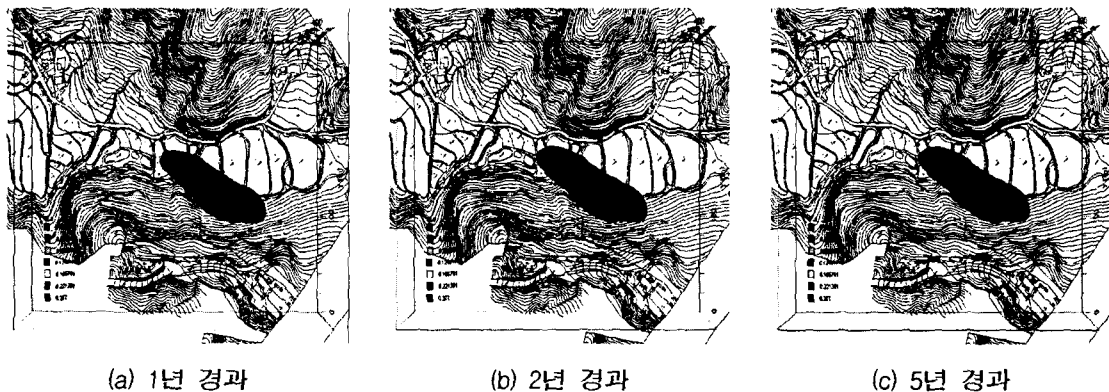


Fig. 6. Transient simulation of contaminant transport

## 4. 결 론

지하수 유동 방향 및 분포는 전체적으로 산 정상부와 남동쪽의 논외 지하수위가 높게 형성되어 있어 지하수의 유동방향은 북서쪽 방향으로 이동하는 것을 알 수 있으며, MODPATH를 이용한 입자추적 결과 산 정상부의 유류저장시설에서 최초 유류노출지점이 있었던 산 하부로 오염물질이 이동하는 것으로 나타났다. 추가적인 오염원이 제공되지 않았을 때 는 상황을 가정하였을 때 지하수내의 오염물질은 느리게 이동하는 것으로 나타났다.향후 유류오염이 시간경과에 따른 자연적 저감효과에 의한 농도 변화 및 토양미생물 분해에 의한 농도 변화를 예측할 수 있는 모델링에 대한 연구수행을 계속하고자 한다.

## 5. 참고문헌

- 1) Bouwer. H., Rice. R. C.(1976), A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resources Research, 12(3), 423-428