

토양에 유출된 Oil과 Benzene의 이동 및 확산에 대한 MOFAT Model을 이용한 Simulation과 그 분석
Simulation of Oil and Benzene Movement in Contaminated Soil Using MOFAT Model

도 덕 현¹, Doh, Duk Hyon
윤 춘 경², Yoon, Chun Gyeong

¹ 건국대학교 농공학과 교수, Full Professor, Kon-Kuk Univ. Department of Agricultural Engineering
² 건국대학교 농공학과 조교수, Assistant Professor, Kon-Kuk Univ. Department of Agricultural Engineering

Synopsis

The migration and diffusion process of the oil and benzene spilled on the soil surface was simulated using USEPA developed MOFAT model for the two different soils, Sand and Silty-Loam. It took seven days for the oil infiltration of 1 m³ through the 2 m x 1 m Sand soil surface, while 426 days for the Silty-Loam soil. This implies that reliable prediction of the contaminants in the subsurface can help proper selection of the treatment method. Even after the center of oil plume reached the groundwater surface, oil and benzene continued to flow into the groundwater for a extended period. The treatment of contaminated soil should also be considered as well as groundwater to restore the contaminated groundwater. Computer simulation of the oil movement in the subsurface is highly recommended in the selection process of the more appropriate treatment method.

1. 서 론

油類의 사용이 증가함에 따라 지하저유조에서의 누출이나 사고 등에 의해서 oil이 토양에 누출되는 사례가 증가하여 이로 인한 환경오염에 대한 관심이 고조되고있다. 토양에 유출된 oil의 이동 및 확산은 지하에서 토양입자 및 수분변화등과의 복잡한 상호작용, 그리고 이들 작용에 관련된 많은 변수들 때문에 정확한 파악이 어려워져서 실제로 부적절한 처리방법을 선택 적용하여 불필요하게 많은 비용이 소요하거나 또는 예상했던 것보다 처리효과가 미흡한 경우가 많다. 유출된 oil의 처리에 과거에는 지하수 수질의 회복에 역점을 두어왔는데 최근에 토양오염처리가 포함되지 않은 지하수만의 처리는 비효과적임이 인식되면서 토양과 지하수의 처리를 병행하는 것이 일반적이다¹⁾. 이러한 경우 유출된 oil및 그 안에 포함되어있는 오염물질들의 토양및 지하수에서의 움직임을 computer model을 이용하여 합리적으로 예측분석하여 그에 근거한 적절한 처리방법을 강구하는 것이 바람직하다.

토양에 유출된 oil은 토양공극을 통해서 vadose zone에서 완전히 재분포가 이루어지거나 또는 지하수면에 도착할 때까지 다른 물질들과 혼합되지 않은 상태로 이동하는데 이 과정은 oil의 유출량 및 점도, 토양의 특성, 지하수위등에 의해 영향을 받는다. 그 다음에 토양의 공극을 통해서 흘러내려오는 수분이 용해가능한 오염성분을 용해시켜서 지하수로 이동시키고, 지하수에 도착한 오염물질은 지하수의 흐름과 확산작용에 의해 지하수를 오염시켜간다²⁾. Oil의 화학적 성분은 원유의 생성과정과 정유방법에 따라 크게 다르나 일반적으로 많은 탄화수소물로 이루어져 있으며 이들 각각 성분에 대한 오염정도를 파악하는데 어려움이 있어서 그 중에 발암물질로 추정되고있고³⁾ 또 연구자료가 풍부한 benzene의 함유량을 측정하여 전체오염의 정도를 예측하는 방법이 사용되기도 한다⁴⁾. 본 연구에서는 미환경보호국(USEPA)에서 개발한 MOFAT model⁵⁾을 이용하여 토양에 유출된 oil및 그에 함유된 benzene의 움직임을 Sand와 Silty-Loam 두 가지 토양에 적용하여 예측하고 분석함으로써 oil이 토양에 유출되었을 경우에 그 처리방법을 결정하는데 도움을 주고자 시도하였다.

2. 재료 및 방법

주유소 주변의 oil에 의한 토양오염정도를 측정하기 위하여 채취한 토양의 시료들을 분석한 결과 그 중에 포함되어있는 Sand와 Silty-Loam의 토질을 선택⁶⁾하여 이들의 특성을 참고문헌을 통해서 Table 1과 같이 발췌하여 사용하였다. Table-1에서 a와 n은 아래와 같은 van Genuchten공식⁷⁾에 사용되는 상수들이다.

$$S_w = [1 + (a h_{aw})^n]^{-m} \quad (1)$$

S_w = effective water saturation

h_{aw} = airphase pressure head - water phase pressure head

a, n = porous medium parameters

$m = 1 - 1/n$.

본 연구의 simulation에 사용된 oil 및 그에 함유된 benzene의 특성은 Table 2에 요약되어 있으며, 유출된 oil의 10.5%가 benzene 성분으로 추정하였다. 사용한 모델은 MOFAT인데 이 모델은 1991년 USEPA가 Virginia Polytechnic Institute and State University와 함께 개발했으며 finite element method (FEM)을 이용한 2차원 해석을 통하여 지하에서 유체의 흐름과 이동을 추정할 수 있다. 3가지 유체상태 - 물, nonaqueous phase liquid (NAPL), 가스 - 의 흐름을 선택적으로 그리고 이들 사이의 평형을 고려한 이동에도 적용할 수 있다. 필요한 입력자료는 초기조건, 토양의 수리학적 성질, 유체의 성질, 시간요소, 경계조건, 그리고 FEM의 mesh에 관한 자료 등이다. 이 모델은 5개까지의 물질이 물, NAPL, 가스상태의 평형을 이루면서 수직평면이나 원주형 평면에서 이동확산되는 오염분포를 추정할 수 있다.

Table 1. Properties of two soils selected.

Properties	Sand	Silty-Loam
Saturated conductivity of water in vertical direction (m/day)	5.00	0.10
Saturated conductivity of water in horizontal direction (m/day)	10.00	0.20
Total porosity	0.35	0.45
Irreducible water saturation	0.05	0.05
Maximum residual oil saturation	0.20	0.16
van Genuchten parameter, a	5.00	2.00
van Genuchten parameter, n	2.80	1.40

Table 2. Properties of oil and benzene used for simulation.

Properties	vales used
Density ratio (Oil/Water)	0.832
Viscosity ratio (Oil/Water)	2.00
Equilibrium partition coefficient between oil and water for benzene	493.00
Equilibrium partition coefficient between air and water for benzene	0.24
Diffusion coefficient of benzene in water (m ² /day)	0.000094
Diffusion coefficient of benzene in oil (m ² /day)	0.0001132
Diffusion coefficient of benzene in air (m ² /day)	0.7629
Liquid density of pure benzene (g/m ³)	877,000.00

Simulation에 사용된 지역은 길이 20m x 깊이 10m 구간으로 양측 1m x 1m 간격의 element 숫자는 $10 \times 20 = 200$ 개이며 node 개수는 231개이다. 초기조건으로써 지하수위는 좌측에 5m 우측에 4.5m로 경사져있으며, simulation 구역 내에 oil은 처음에는 전혀 없었던 것으로 하였다. 지표상의 중앙부분의 길이 2m 구간에 1m^3 의 oil이 누유하는데 일정한 유입량 ($h = -0.1\text{m}$) 으로 전체 유입량이 폭 1m의 3차원으로 확산해서 1m^3 가 될 때까지 계속되며, oil과 benzene의 decay는 고려하지 않아서 model의 결과치는 실제보다 약간 높을 것으로 예상된다. Simulation은 oil의 지하에서의 움직임을 고려하여 다음과 같이 세 가지 stage로 구분하여 적용하였다.

Stage 1: Oil이 토양에 쏟아진 상태에서 전체유입량이 1m^3 이 되기까지의 기간.

Stage 2: Stage 1 후에 추가로 oil이나 물의 유입 없이 이미 지하에 유입돼 있는 oil이 재분포되는 기간 (30 일간).

Stage 3: Stage 2 후에 지표면에 물을 일정한 분량 ($q = 10 \text{ cm/day}$)으로 유입시켰을 경우(30, 60, 그리고 90 일간).

3. 결과 및 분석

Stage 1이 끝난 후, 즉 1m^3 의 oil이 simulation 구역 내에 모두 유입된 직후 oil의 포화 상태와 물-oil-gas 상태의 benzene 농도분포가 Sand와 Silty-Loam 토양에 대해서 Figures 1과 2에 각각 나타나있다. 전반적으로 두 가지 토양에 분포된 상태는 비슷하나 oil 포화상태의 분포가 Sand 토양에서 Silty-Loam 토양보다 약간 더 밀로 내려왔으며 농도도 더 높다. Stage 1에 소요된 기간은 Sand 토양이 7일이며 Silty-Loam 토양은 426일이 걸렸는데 그 이유는 투수계수의 차이 때문인 것으로 판단된다.

Silty-Loam 토양은 Stage-1에 많은 시간이 소요되어 Stage 2와 같이 물이나 oil의 추가유입없이 30일간 재분포시켜도 그 변화가 미비할 것이며 투수계수가 낮아서 $q = 10 \text{ cm/day}$ 의 물의 유입을 Stage 3에 적용하기 어려워서, Sand 토양에만 Stages 2와 3을 적용하여 그 결과는 Figures 3 - 6과 같다. Figure 3(a)는 외부로부터 oil이나 물의 추가 유입이 없이 Stage 1에서 유입되었던 oil이 지하에서 재분포되며 주로 중력에 의한 수직방향의 움직임으로 Stage 2 상태가 30일간 지난 후의 oil 분포이다. 지하수위가 약 5m인 점을 고려하면 oil front가 지하수면에 도착하기 시작한 것을 알 수 있다. Figures 3(b) - (d)는 물을 지표면에 일정하게 $q = 10 \text{ cm/day}$ 로 유입시킨 상태에서 물의 흐름에 힘입어 oil의 움직임이 용이해져서 (b)에는 oil plume의 중심이 지하수면에 내려와 있으며, (c)에는 상부 vadose zone으로부터 추가로 계속하여 oil이 물과 함께 빠른 속도로 흘러내려오는 반면 지하수의 흐름이 상대적으로 느려서 oil의 농도가 높으며, (d)에는 상부로부터 유입량이 감소하였고 지하수의 흐름에 따라 좌측에서 우측으로 oil plume이 이동하는 모습을 볼 수 있다.

이러한 oil plume의 움직임에 따른 benzene의 물-oil-gas 상태의 농도 분포는 Figures 4 - 5에 있는데, oil plume의 중심부가 지하수면에 도착한 후에도 상당기간 동안 계속 상부로부터 oil이 유입되어 지하수 바닥까지 benzene의 농도가 확산되는 것을 볼 수 있다. 이러한 상태는 vadose zone에 잔류해있는 오염물질이 물에 의한 세척이나 또는 중력에 의해 대부분 지하수로 이동할 때 까지 토양의 성질에 따라서는 몇 년 이상씩 지속되기도 할 것이다. Figure 6에서 볼 수 있는 바와 같이 gas 상태의 농도는 지하수위 밑으로 확산이 어려워 benzene 농도의 분포가 지표에서 지하수위 근처까지만 확산되어 있음을 볼 수 있다. 이상의 simulation 결과에 의하면 점도가 높아서 땅속에서의 흐름이 느린 oil이라도 투수계수가 높은 Sand같은 토양의 경우는 상당히 짧은 시간에 지하에 침투되어서 조속히 조치를 취하지 않으면 토양 및 지하수에 점차 확대되어 처리하는데 어려움이 따를 것이며, 투수계수가 낮은 토양에서는 oil의 움직임이 느려서 누출된 후에 오염 성분이 오염원에서 멀리 확산되기까지 상당히 많은 기간이 소요되므로 이 동안에 오염된 토양을 제거 또는 차단함으로써 지하수 오염을 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 어떠한 경우라도 일단 지하수가 오염되어 그의 회복을 시도할 때에는 지하수 처리뿐만 아니라 vadose zone의 토양 처리의 필요성도 함께 검토하여야 한다.

4. 결론

MOFAT model을 이용한 simulation 결과에 의하면 수직방향 투수계수가 10 cm/day 인 Silty-Loam 토양의 경우 1m^3 의 oil이 지하로 침투하는데 426일이 소요되는데 비해서 수직방향 투수계수가 5 m/day 인 Sand 토양의 경우는 겨우 7일 밖에 걸리지 않았다. 따라서 oil의 침투 및 확산속도가 큰 Sand 토양 같은 경우는 누출 후 조속히 조치를 취하지 않으면 오염물질이 신속히 이동 확산되어 지하수까지 쉽게 오염시킬 수 있으며, 그 속도가 느린 Silty-Loam과 같은 토양은 oil의 이동속도가 느려서 누출된 oil이 널리 확산되기 전에 오염된 토양을 제거 또는 차단하는 것이 용이하여 simulation등을 통해서 선택한 적절한 처리방법을 적용하면 오염물질의 추가확산 및 지하수 오염을 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 일단 오염물질이 지하수를 오염시킨 후에는 oil plume의 중심부가 지하수면에 도착한 후에도 상부의 vadose zone으로부터 상당기간 동안 오염물질의 유입이 계속되므로 이의 처리에 있어서는 지하수처리와 함께 토양처리의 필요성도 동시에 검토되어야 한다.

본 연구에서와 같이 토양에 oil이 유출되었을 때는 이물이 지하에서의 움직임을 예측할 수 있는 computer model의 사용이 지하수나 토양오염 처리방법을 결정하는데 절실히 필요하며, 아울러 이와 같은 처리방법의 개발도 중요하지만 개발된 방법들의 효과적이고 적절한 적용을 위해서 simulation 기법의 적극적인 활용이 요구되며 더욱 중요한 것은 oil의 누출을 사전에 예방하는 조치가 요망된다.

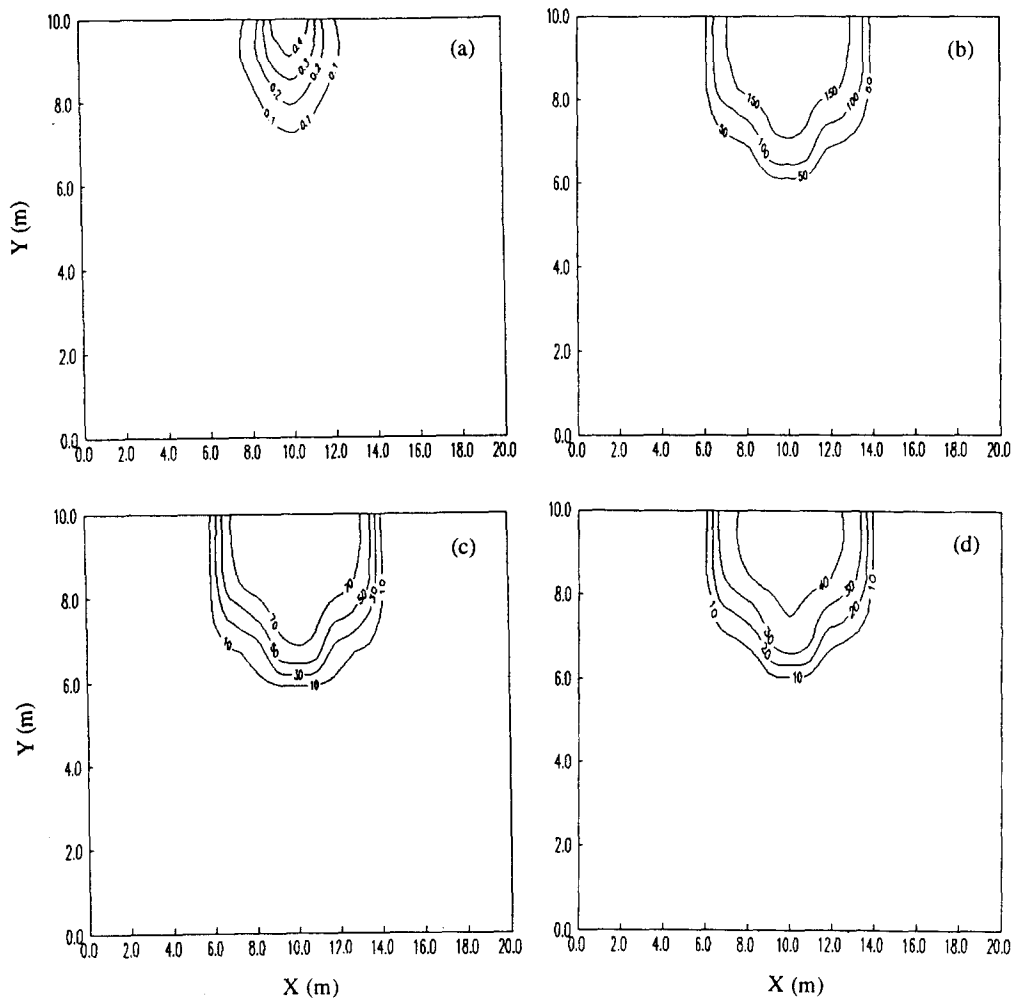


Figure 1. Contours at the end of Stage 1 for the Sand soil (7 days): (a) oil saturation, (b) benzene concentration in water phase(g/m^3), (c) benzene concentration in oil phase ($1000 \text{ g}/\text{m}^3$), and (d) benzene concentration in gas phase (g/m^3).

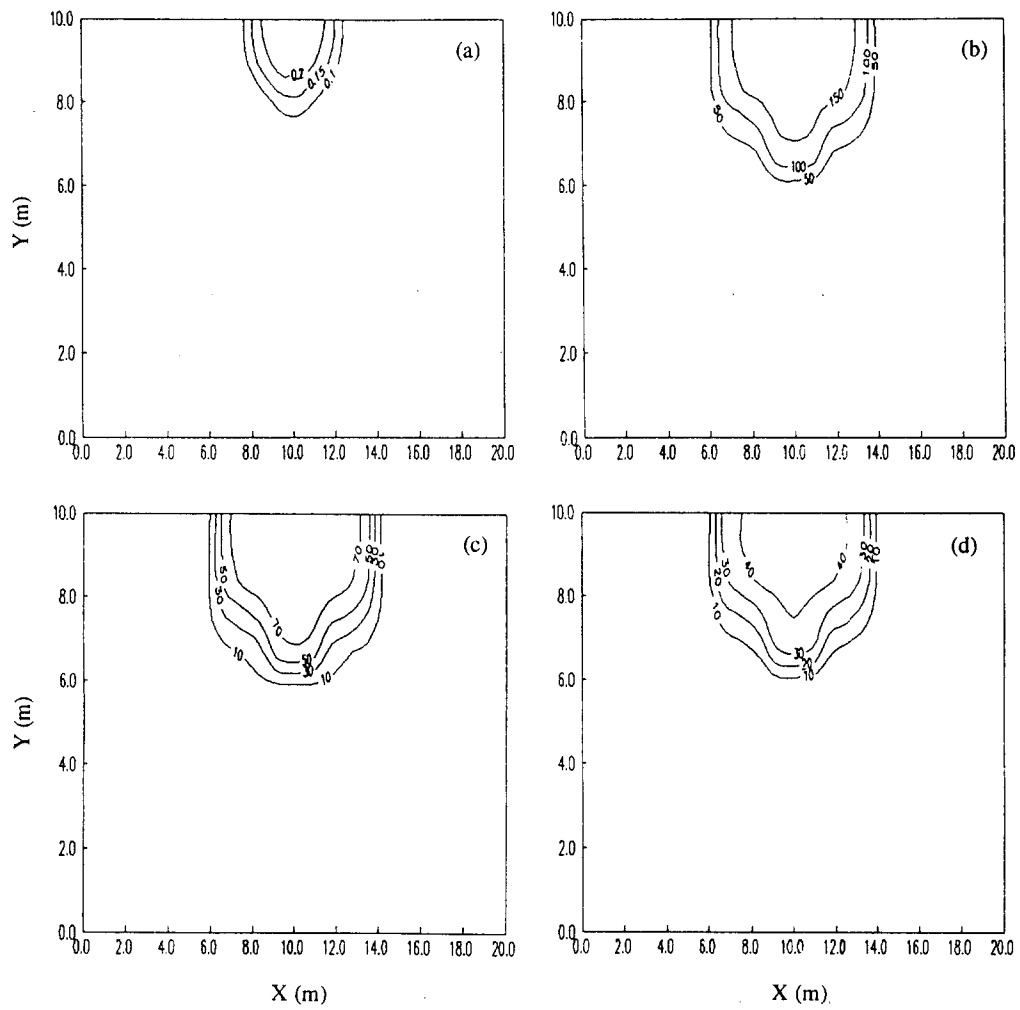


Figure 2. Contours at the end of Stage 1 for the Silty-Loam soil (426 days): (a) oil saturation, (b) benzene concentration in water phase(g/m^3), (c) benzene concentration in oil phase ($1000 \text{ g}/\text{m}^3$), and (d) benzene concentration in gas phase (g/m^3).

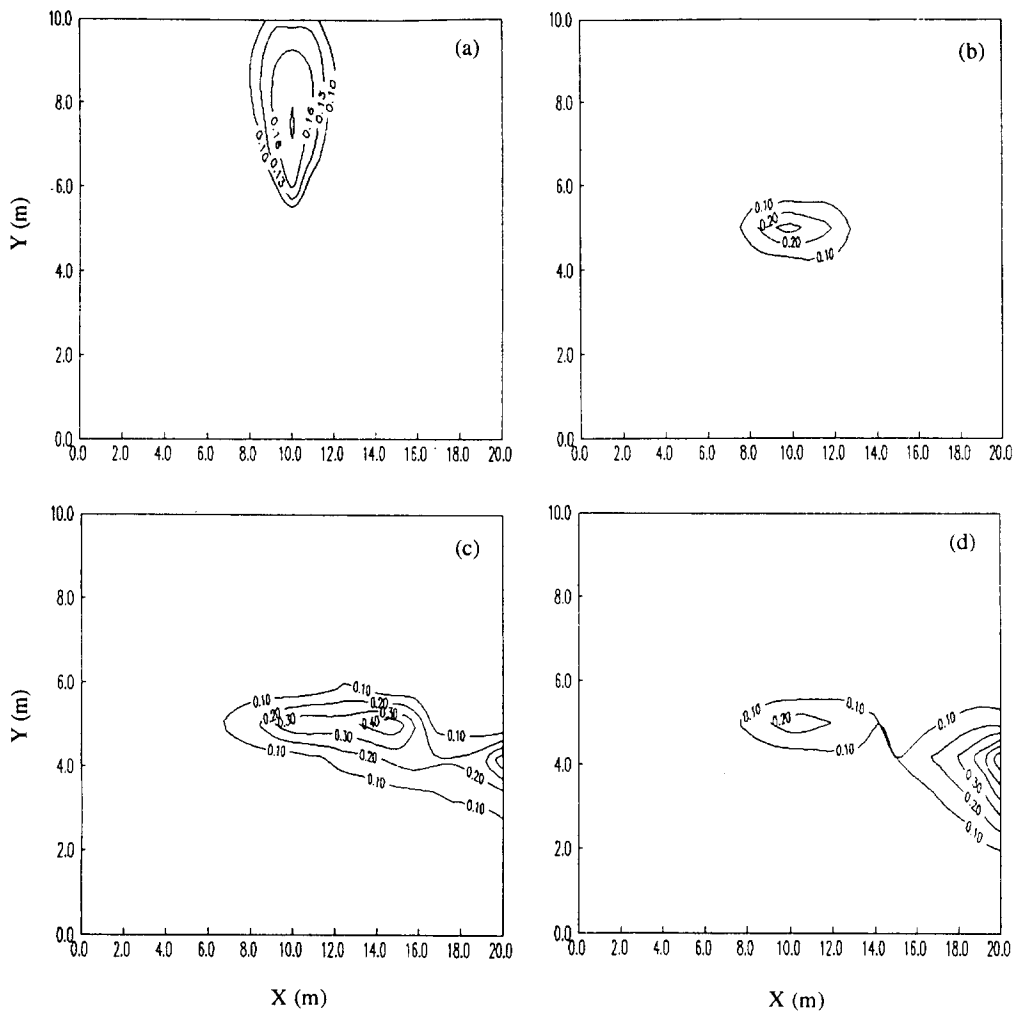


Figure 3. Oil saturation contours for the Sand soil: (a) at the end of Stage 2, (b) after constant water infiltration for 30 days, (c) after constant water infiltration for 60 days, and (d) after constant water infiltration for 90 days.

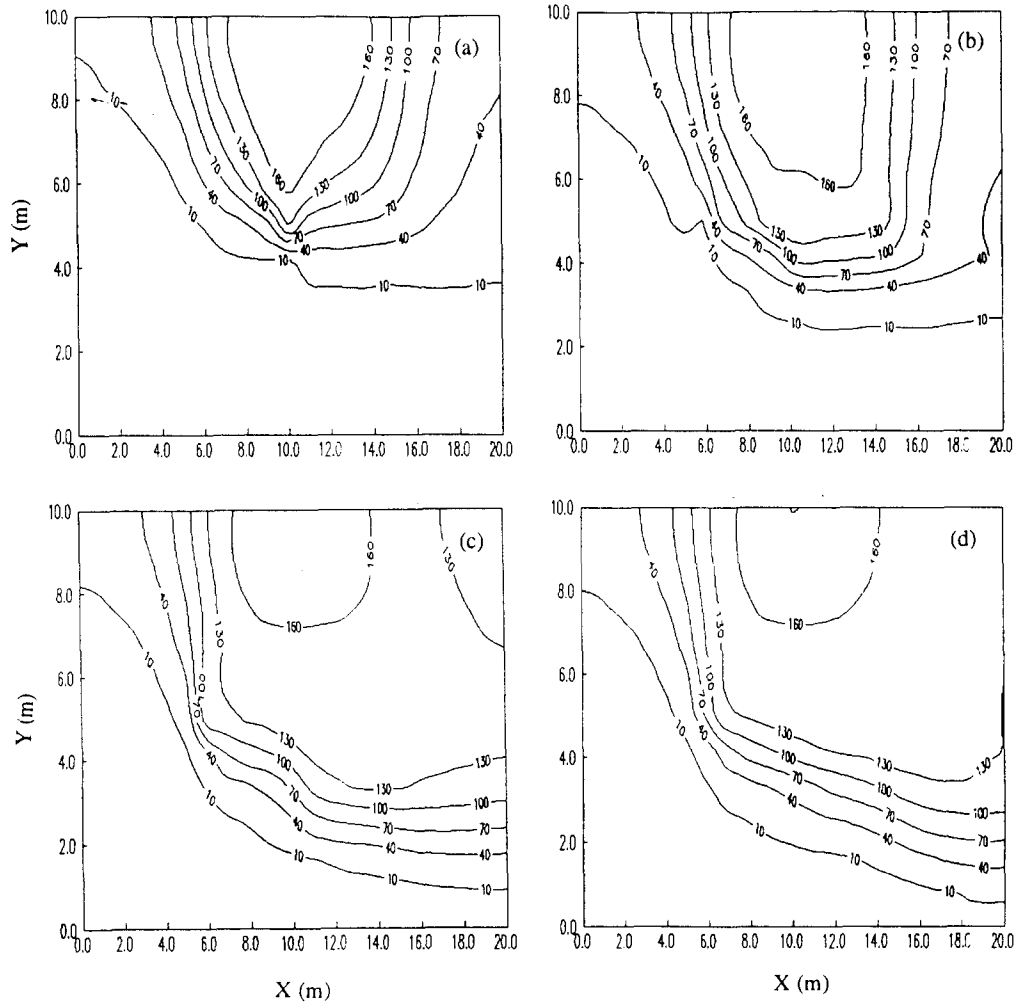


Figure 4. Benzene concentration contours (g/m^3) in water phase for the Sand soil: (a) at the end of Stage 2, (b) after constant water infiltration for 30 days, (c) after constant water infiltration for 60 days, and (d) after constant water infiltration for 90 days.

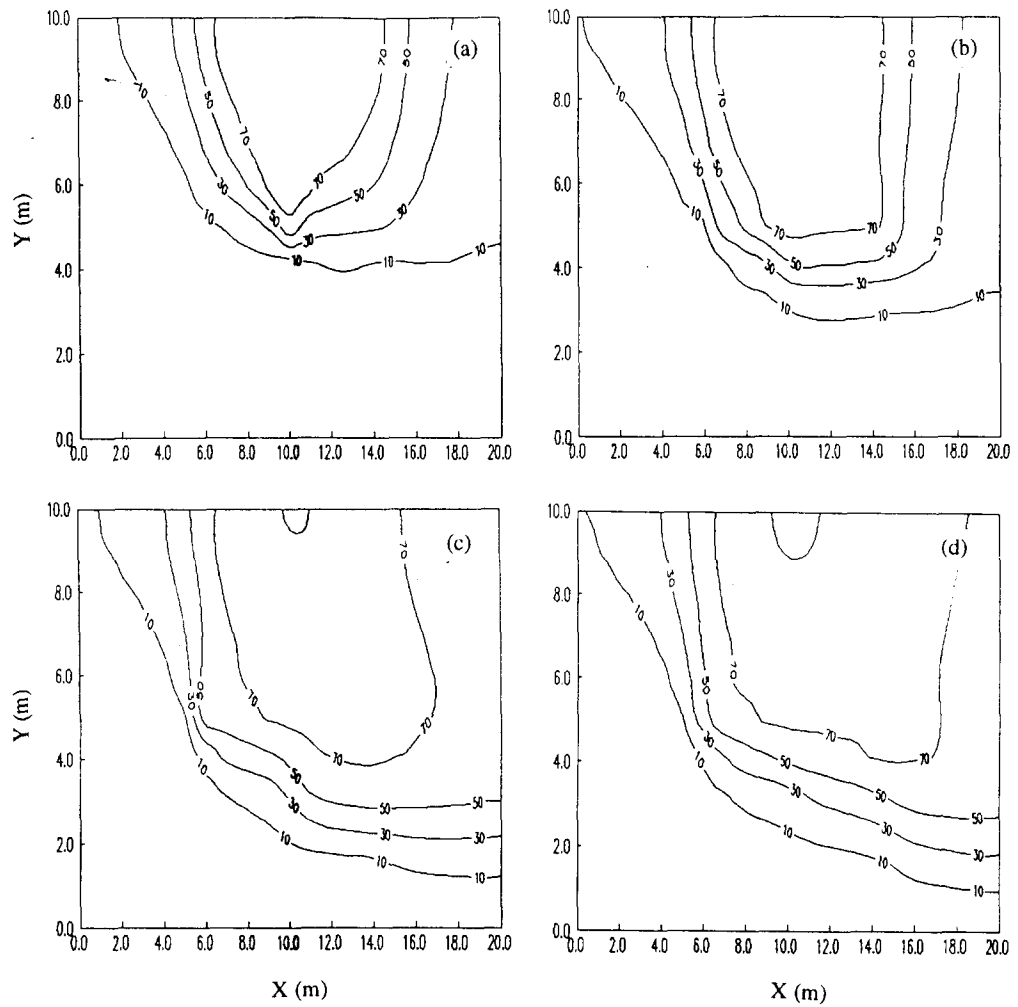


Figure 5. Benzene concentration contours (1000 g/m^3) in oil phase for the Sand soil: (a) at the end of Stage 2, (b) after constant water infiltration for 30 days, (c) after constant water infiltration for 60 days, and (d) after constant water infiltration for 90 days.

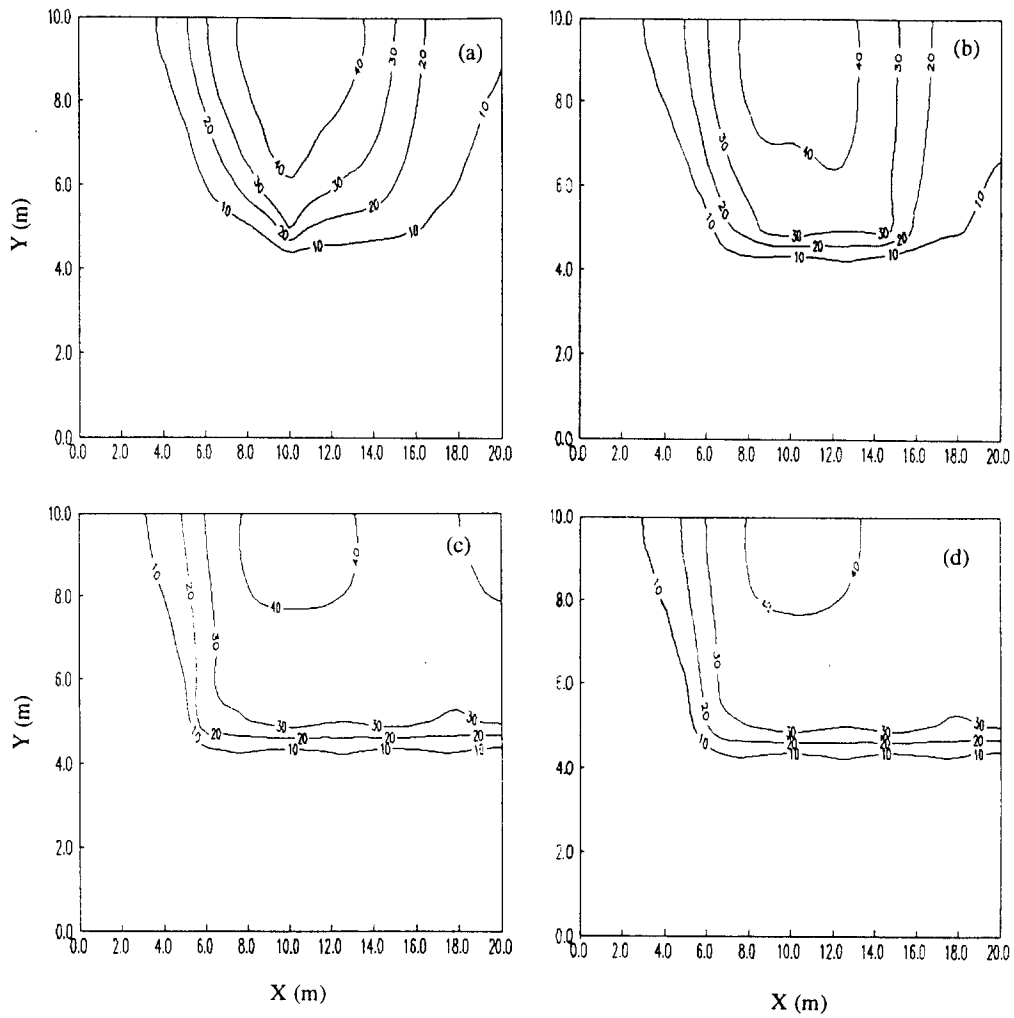


Figure 6. Benzene concentration contours (g/m^3) in gas phase for the Sand soil: (a) at the end of Stage 2, (b) after constant water infiltration for 30 days, (c) after constant water infiltration for 60 days, and (d) after constant water infiltration for 90 days.

참고문헌

1. Bauman, B. J. (1989). "Soils Contaminated by Motor Fuels: Research Activities and Perspectives of the American Petroleum Institute," in Petroleum contaminated soils, volume 1, edited by Paul T. Kostecki and Edward J. Calabrese, Lewis Publishers, USA, pp.3-19.
2. Shields, W. J., & Brown, S. M. (1989). "Applicability of POSSM to Petroleum Product Spills," in Petroleum contaminated soils, volume 1, edited by Paul T. Kostecki and Edward J. Calabrese, Lewis Publishers, USA, pp.87-104.
3. Patnaik, P. (1992). "A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances", Van Nostrand Reinhold, USA, pp.430-432.
4. USEPA, Office of Underground Storage Tanks (1992). "Leaking, Underground Storage Tanks and Health: Understanding Health Risks from Petroleum Contamination," EPA/530/UST-91/018, USA.
5. Katayal, A. K., Kaluarachchi, & Parker, J. C. (1991). "MOFAT: A Two-Dimensional Finite Element Program for Multiphase Flow and Multicomponent Transport, Program Documentation and User's Guide," EPA/600/2-91/020, USA.
6. 진성기, 도덕현, 최규홍(1994). "오일의 漏出이 土壤汚染, 植生 및 地下水에 주는 影響 관한 研究", 한국농공학회지, Vol.36, No.1, pp.141-152.
7. van Genuchten, M. Th. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Science Society of America, vol.44, pp.892-898.