

Soil Venting이 오염토양중 가솔린 성분의 용출성에
미치는 영향 : 2. 모델링 접근

염익태 · 이상현 · 허상철 · 안규홍

한국과학기술연구원

**Effect of Soil Venting on Dissolution Potential of Gasoline Components
in Contaminated Soil : 2. Modeling Approach**

Yeom Ick-Tae, Lee Sang-Hyun, Heo Sang-Chul, Ahn Kyu-Hong

Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

The effects of soil venting on the leaching potential of residual gasoline were characterized by applying a simple multi-component volatilization/dissolution model based on Raoult's law. The validity of Raoult's law in describing dissolution of gasoline was evaluated separately using both pure gasoline and gasoline contaminated soil. The aqueous concentrations of gasoline components equilibrated with pure gasoline could be described by Raoult's law within one order of magnitude, regardless of the composition of the gasoline. The leaching concentrations from contaminated soil could be well predicted at a relatively high gasoline

concentration in soil. However, after 93.5% removal of gasoline by venting, the calculated values were higher than the experimental values by 50~100%. A model involving multi-component evaporation and dissolution was applied and the results were compared with the experimental values. Possible causes of the discrepancy between the predicted values and experimental values were given.

Key words : gasoline, contaminated soil, leaching, petroleum contamination

요 약 문

Soil venting이 오염토양중 가솔린의 용출거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Raoult의 법칙에 근거한 복합물질 휘발/용해거동 모델을 적용하였다. 먼저 순수 가솔린의 용해거동과 휘발거동에 대해 검토한 후 토양중 가솔린의 거동에 적용하여 보았다. 가솔린성분들의 용해거동은 휘발에 의한 성분조성의 변화와 상관없이 Raoult의 법칙에 의해 비교적 정확하게 예측할 수 있었으며 오차범위는 naphthalene을 제외하고는 최고 $\pm 100\%$ 이내였다. 오염토양의 형태로 가솔린이 존재하는 경우에도 Raoult의 법칙에 의해 정확히 예측될수 있었으나 토양중 농도가 초기 20,000 mg/kg에서 1,360 mg/kg까지 감소한 경우에는 예측치가 계산값보다 50~100% 정도 높은경향을 보였다. 한편 soil venting시 휘발에 따른 조성변화를 Raoult의 법칙을 이용하여 산정하고 각 성분조성에 대한 개별물질들의 용출잠재성을 결정하는 모델을 이용하여 실험결과와 비교하였으며 모델값과 실험값의 차이에 대한 몇가지 가능한 시나리오를 제시하였다.

주제어 : 가솔린, 오염토양, 용해거동, 유류오염

1. 서 론

가솔린 오염토양의 처리를 위해서는 흔히 토양 증기추출법(soil vapor extraction)이나 soil venting등 공기의 흐름을 이용한 방법들이 많이 사용되고 있다. 이러한 처리방법들의 기본원리는 오염지역 주변의 공기흐름을 유도하여 오염되지 않은 공기를 오염지역으로 순환시켜 오염물질들을 휘발시킨후 휘발된 오염물질(오염된 공기)을 포집하여 지상에서 처리하는 것으로 가솔린과 같이 휘발성이 높을수록 그 효율이 높게 된다. 휘발에 의해 가솔린을 제거할 때 가솔린의 개별성분들이 제거되는 양상은 각성분들의 증기압차이에 의해 차등적으로 진행되며 결과적으로 잔류가솔린의 성분조성이 연속적으로 변화하게 된다. 토양 중 잔류가솔린의 성분조성 변화는 오염토양으로부터 지하수 또는 빗물등의 침투수에 의한 침출잠재성을 변화시키게 된다. 가솔린 오염토양의 처리목표를 오염지역으로

인한 위해성 저감이라고 한다면 오염토양으로 인한 침출잠재성의 변화는 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 왜냐하면 가솔린에 의한 토양오염에 있어 대부분의 경우 지하수 오염이 위해성의 주요 전달경로를 구성하고 있기 때문이다. 즉 오염토양 중 가솔린 총량의 제거보다는, 또는 토양 중 개별성분의 농도보다는 침출잠재성이 더 정확한 처리효율의 지표라고 할 수 있다.

토양중 NAPL(Nonaqueous Phase Liquid)상태로 존재하는 VOC(Volatile Organic Compounds)에 대해 토양 증기추출법 등의 휘발 처리법을 적용할 경우 NAPL의 제거와 관련하여 그동안 적지 않은 모델링 연구가 진행되어 왔다. 그러나 기존 연구들의 대부분이 단일물질에 대한 모델로서 주로 토양 매트릭스에서 공기의 흐름과 확산/흡착 등 휘발된 물질들의 이동거동에 초점을 맞추어 왔다^{1,2,3)}. 최근들어 가솔린과 같은 복합성분 NAPL의 제거를 대상으로 한 모델들도 보고되고

있다^{4,5)}. 이러한 모델들은 주로 토양증기추출법의 적용과 관련하여 잔류가솔린 제거에 초점을 맞추고 있는데 가솔린의 모든성분에 대해 초기함량을 결정하고 각각에 대해 Raoult의 법칙을 적용함으로써 휘발농도와 제거효율을 결정하고자 하였다. 이러한 접근법은 휘발의 진행과 더불어 잔류가솔린 조성변화와 이에따른 개별성분들의 휘발농도를 비교적 정확히 예측할 수 있다는 점에서 진일보한 모델이라고 할 수 있다. 그러나 이러한 모델들은 가솔린의 모든 성분에(보통 100~120물질) 대한 정량분석과 데이터관리를 필요로 하게된다. 또한 하나의 문제점은 비록 개별성분들에 대한 제거 및 잔류량을 결정할 수는 있지만 대부분의 모델들이 침출농도에 대한 고려는 포함하지 않는다는 점이다. 따라서 처리의 궁극적인 목적을 토양중 가솔린농도의 저감이 아니라 지하수 오염잠재성의 저감이라고 전제할 때 이러한 모델들로는 모델 input 인자들(SVE의 설계 인자들)이 처리효율 및 처리소요시간에 미치는 영향을 직접적으로 평가하기가 어렵다.

본 연구에서는 선행논문에서 보고된 실험결과를 토대로 토양중 잔류가솔린의 용해거동과 휘발거동이 Raoult의 법칙에 의해 정량적으로 설명되어 질 수 있는지를 확인하고자 하였다. 또한 가솔린 오염 토양의 정확에 많이 활용되고 있는 토양증기추출법과 이 공정에 의한 국지적 위해성 저감정도, 구체적으로는 지하수 오염잠재성을 연계하여 평가할 수 있는 종합적인 모델의 기본골격을 세우고 이에 대한 평가를 수행하였다.

2. 모델링 접근

2.1 평형상태에서의 가솔린성분의 용해

복합적 오염물질이 NAPL상으로 존재할 때 개별물질들의 용해도는 NAPL과 물 사이 열역학적 평형관계에 의해 설명되어 질 수 있다. 즉

NAPL-물의 평형상태에서 개별물질들의 activity는 두개의 상(phase)에서 일정하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_i^N \chi_i^N = \gamma_i^W \chi_i^W \quad (1)$$

여기서 γ 는 활성도계수를, x 는 몰분율을 각각 나타내며 i 는 개별성분을, N , w 는 각각 NAPL과 물을 나타낸다. 포화상태에서 가솔린 성분들의 물에 의한 용해도는 상대적으로 낮기 때문에 γ_i 가 함께 녹아있는 다른 성분들에 의해 영향을 받지 않는다고 가정했을 때 γ_i^W 는 해당물질이 단일물질로 존재할 때의 용해도(χ_i^*)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다⁶⁾.

$$\gamma_i^W \chi_i^* = \gamma_i^P \chi_i^P = 1 \quad (2)$$

$$\gamma_i^W = \frac{1}{\chi_i^*} \quad (3)$$

단, p 는 단일물질로 존재하는 상태를 나타낸다. NAPL상에서 성분 i 의 거동을 이상용액에서의 거동으로 볼 때 γ_i^W 은 1이 되고 (Raoult's law convention) 식 (1)과 (3)으로부터 χ_i^W 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\chi_i^W = \chi_i^* \chi_i^N \quad (4)$$

용해도의 단위를 일반적인 농도단위 (mol/l)로 바꾸면;

$$C_i^W = C_i^* f_i^N \frac{MW_N}{MW_i} \quad (5)$$

여기서 C 는 몰농도를, f_i^N 은 NAPL 중 i 의 무게비를 나타내며 MW_i , MW_N 은 i 의 분자량과 NAPL의 평균 분자량을 각각 나타낸다. 가솔린에서 개별성분의 용해양상이 위와 같이 Raoult의 법

칙을 적용할 수 있다면 가솔린 중 개별성분의 함량과 가솔린의 평균분자량으로부터 개별성분의 용해도를 추정할 수 있다. 한편, 가솔린 성분의 용해도를 물과 가솔린사이의 분배로 나타낼 경우 개별성분의 분배계수(K_{g-w} : L/kg)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{g-w} = \frac{q_i^w}{C_i^w} = \frac{1000}{C_i^* MW_g} \quad (6)$$

q_i^w 는 가솔린중 i 의 농도(mol/kg)를 나타내며 MW_g 은 가솔린의 평균 분자량을 나타낸다. 위 식으로부터 K_{g-w} 와 다음과 같이 C_i^* 가 로그스케일의 선형관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

$$\log K_{g-w} = -\log C_i^* - \log\left(\frac{MW_g}{1000}\right) \quad (7)$$

한편, 가솔린이 토양공극사이 또는 토양에 흡착된 상태로 존재할 경우 토양-가솔린과 물사이의 표면적인 분배계수(K_{s-g-w})는 가솔린의 흡착에 의해 영향을 받게되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_{i,sg-w} = \frac{q_i^{sg}}{C_i^w} = \frac{q_{i,sorbed} + q_{i,NAPL}}{C_i^w} \quad (8)$$

$$q_{i,sorbed} = K_{s-w} C_i^w \quad (9)$$

$$q_{i,NAPL} = w_{NAPL} K_{g-w} C_i^w \quad (10)$$

여기서 w_{NAPL} 은 토양중 NAPL상태로 존재하는 가솔린의 농도(g/g)이며 $q_{i,NAPL}$ 과 $q_{i,sorbed}$ 는 각각 토양중 NAPL로 상태로 존재할때와 흡착된 상태로 존재할 때의 i 의 농도 (mol/g)를 각각 나타낸다. 이때 $K_{i,sg-w}$ 는 다음과 같이 주어진다:

$$K_{i,sg-w} = K_{i,s-w} + f_{NAPL} q_T K_{i,g-w} \quad (11)$$

이 때 q_T 와 f_{NAPL} 은 토양중 총 가솔린 농도와 그

중 NAPL로 존재하는 가솔린의 비를 각각 나타낸다. 만일 토양 중 가솔린 농도가 상대적으로 높으면 대부분의 가솔린이 NAPL상태로 존재하게 되며 토양의 흡착에 의한 영향은 무시할 수 있게 된다. 즉 식 (11)에서 $K_{i,sg-w}$ 는 $q_T K_{i,g-w}$ 로 되어 순수 가솔린의 용해거동과 일치하게 된다.

2.2 휘발에 따른 용해도 변화

휘발에 의한 용해도 변화를 예측하기 위해서 먼저 휘발에 의한 가솔린 조성의 변화를 예측하고 식 (5)를 이용하여 각각의 조성에 대한 개별성분들의 용해도를 계산하였다. 먼저 휘발에 따른 가솔린 조성변화를 보기위하여 가솔린을 13개의 개별성분들과 크로마토그램에 근거하여 편의상으로 나눈 11개의 미지물질군 등 총 24개의 물질로 구별한 후 모델을 적용하였다(Fig. 1). 미지물질군의 순수 증기압(pure phase vapor pressure)은 해당물질군 중 대표적인 물질의 증기압을 이용하거나 가스 크로마토그램상의 peak retention time이 증기압에 반비례한다는 사실을 이용하여 경계를 이루는 인접 물질의 평균증기압을 이용하였다. 휘발에 따른 가솔린 조성변화를 예측하기 위하여 적용된 모델의 개념적 순서도는 Fig. 2와 같다.

한편, 가솔린 오염토양의 경우 토양의 흡착에 의해 개별성분의 휘발양상이 영향받을 수 있는데 토양 중 NAPL상태로 존재하는 가솔린의 농도를 주요 영향인자로 볼 수 있다. 즉 NAPL상태로 존재하는 가솔린의 농도가 충분한 경우 개별성분들의 휘발양상은 가솔린 액체의 휘발양상에 의해 묘사될 수 있을 것으로 보인다(7). 하지만 휘발이 많이 진행되어 농도가 낮은 경우는 토양 입자의 내부공극 확산(intrapore diffusion)에 의한 물질전이제한(mass transfer limitation), 토양유기물에의 흡착효과등으로 인해 휘발속도가 느려질 것으로 예상된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가솔린 용해거동

휘발에 의한 가솔린 조성변화에 따른 개별성분들의 용해거동이 Raoult의 법칙에 의해 설명되어 지는가를 보기위해 측정된 가솔린-물 분배계수 (K_{g-w})와 순수용해도(C_i^*)와의 관계(식 7)를 Fig. 3에 보였다. Naphthalene의 경우에는 상온에서 고체상태로 존재하기 때문에 상온에서의 순수용해도를 직접사용할 수 없었으며 대신 액상과 고상에서의 fugacity의 비 (f^L/f^S)를 이용하여 supercooled liquid의 용해도를 구하였다⁸⁾. 전체적으로 볼 때 휘발정도 또는 가솔린 조성에 상관없이 일정한 로그선형의 상관관계를 보였다. 그림에서 실선으로 표시된 선은 Raoult의 법칙에 의해 이상용액으로 가정하였을 경우의 이론적인 상관관계를 나타내는데 naphthalene을 제외하고는 실험값들과 로그값 0.2이내의 오차를 보이고 있다. 이러한 결과는 휘발에 의한 가솔린 조성변화에도 불구하고 가솔린 성분들의 용해거동이 Raoult의 법칙에 의해 상당히 정확하게 묘사될 수 있으며 각각의 경우에 대한 개별성분들의 용해도도 예측될 수 있음을 보여준다. 참고로 각각의 휘발정도에 따른 가솔린 조성변화와 용해도값은 선행논문⁹⁾에 제시되었다.

한편, 가솔린 오염토양으로부터 개별성분들의 침출거동을 해석하기 위하여 먼저 토양중 잔류가솔린이 모두 NAPL상태로 존재한다고 가정하고 서로 다른시간동안 휘발시킨 오염토양으로부터의 용출실험 결과를 $\log K$ 와 $\log C^*$ 의 상관관계로 Fig. 4에 표시하였다.

휘발에 의해 토양 중 가솔린농도가 초기농도 20,000 mg/kg에서 1,300 mg/kg대로 감소하였으나 개별성분들의 용출양상은 대체적으로 토양없이 가솔린만으로부터의 용해양상과 일치하고 있다.

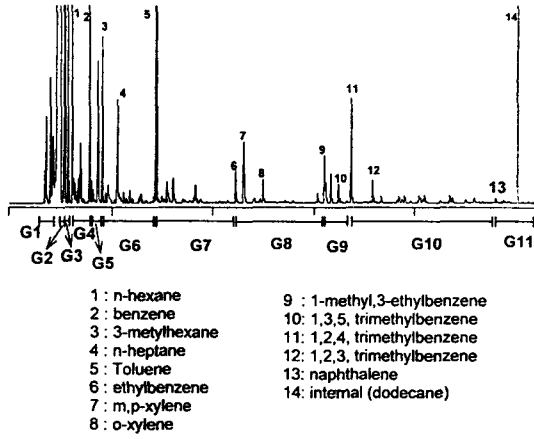


Fig. 1. Group assignment of gasoline components for the multi-component model simulation

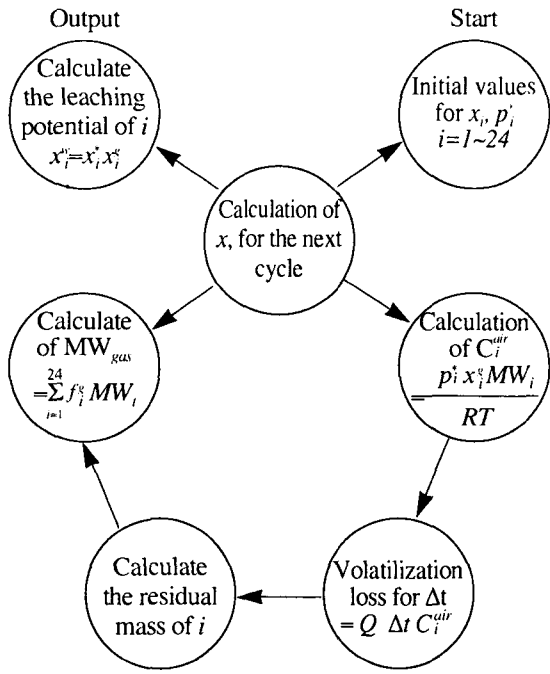


Fig. 2. Flowchart for the calculation of gasoline leaching potential in the model

또 Raoult의 법칙을 적용해 계산된 상관관계(실선 부분)와도 거의 일치하는 결과를 볼 수 있다. 다만 휘발이 제일 많이 된 경우인 1,360 mg/kg 가솔린 농도의 경우 K_{g-w} 가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다 (용출농도로 볼 때 계산값의 50~70% 수준). 이러한 결과로부터 몇 가지의 시사점을 도출할 수 있는데 먼저 토양 중 가솔린 농도가 높은 경우는 토양유기물에 의한 흡착의 영향을 무시할 수 있으며 용출거동은 Raoult의 법칙에 의해 설명되어질 수 있다는 점이다. 물론 Raoult의 법칙의 적용여부가 농도에 의해서만 일률적으로 결정되어질 수는 없을 것이다. 농도가 낮더라도 휘발의 영향을 적게 받은 경우 Raoult의 법칙을 적용할 수도 있을 것이다. 하지만 가솔린에 의한 토양오염의 일반적인 시나리오를 보면 누출된 가솔린이 토양 불포화층을 통과하면서 잔류포화(residual saturation)상태로 토양을 오염시키기 때문에 국지적인 초기농도는 10,000 mg/kg이상인 경우가 대부분이다. 자연적인 과정에 의해서, 또는 인위적인 휘발처리에 의해 토양 중 잔류가솔린의 농도가 점차로 감소하게 되어 일정농도 이하가 되면 용출농도가 Raoult의 법칙에 의한 예측값보다 감소하게 되는데 이것은 휘발에 의한 가솔린 조성의 변화(고분자량물질들의 비중이 커짐)에 의한 것으로 보기는 어렵다. 왜냐하면 Fig. 3에서 알수있듯이 가솔린만으로 비슷한 정도로 휘발시켰을 경우에도 예측값과 거의 일치하는 결과를 보였기 때문이다. 따라서 토양 중 잔류가솔린의 농도가 낮은 경우 용출농도가 Raoult의 법칙에서 벗어나는 원인은 토양과 관련된 요인에서 찾아야 할 것이다. 즉 가솔린의 농도가 감소하면서 토양유기물에 흡착된 가솔린양의 비중이 높아지게 되면 용출농도는 더 이상 NAPL의 용해거동에 의해 지배되지 않고 토양과 물 사이의 선형분배에 의해 영향을 받게 될 것이다. 이 밖에도 토양 중 가솔린의 농도가 감소하면서 잔류부분에 대한 토양으로부터 물로의 물질전이제한(mass transfer

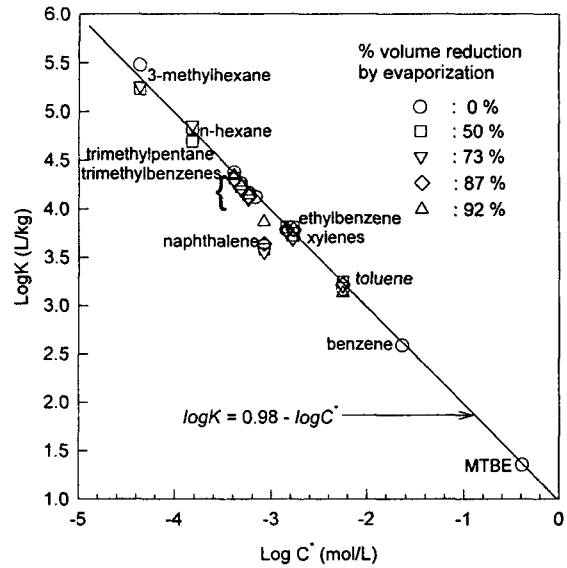


Fig. 3. Relationship between gasoline-water partitioning coefficient and pure compound solubility with varying gasoline compositions

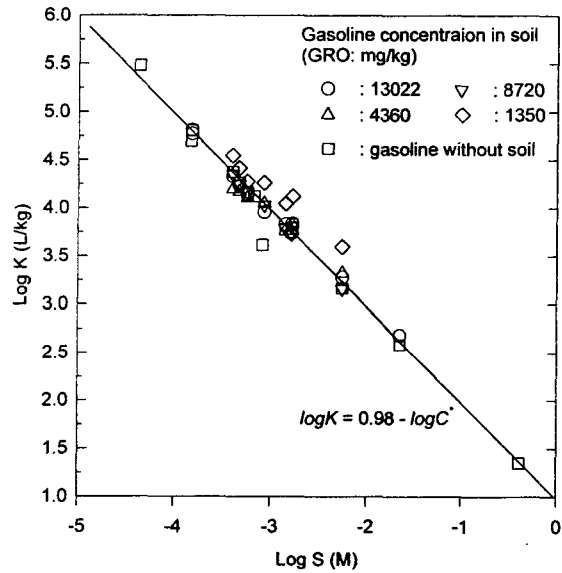


Fig. 4. Relationship between gasoline-water partitioning coefficient and pure compound solubility when vented soil is equilibrated with water.

limitation)이 더욱 커지게 되는 점도 한 원인이 될 수 있다¹⁰⁾.

3.2 토양 중 가솔린의 휘발이 개별성분들의 용출성에 미치는 영향

먼저 토양 중 가솔린의 휘발이 Raoult의 법칙에 근거한 모델에 의해 설명되어 질 수 있는가를 알아보기 위해 오염된 토양칼럼의 venting시 시간에 따른 휘발농도를 모델예측값과 비교해 보았다 (Fig. 5). 토양칼럼의 가솔린 초기농도는 20,000mg/kg이며 venting 유량은 8 ml/min이었다. 그림에 보인 실험값들은 네 개의 독립적으로 운전된 토양칼럼으로부터의 결과를 나타내고 있다. Venting 개시 후 500분 정도까지는 한 두 개의 예외를 제외하면 전체적으로 볼 때 모델값과 실험값의 오차는 최대 $\pm 100\%$ 이내인 것으로 나타났으며 각 칼럼의 평균값과 비교하면 오차는 더욱 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 오염토양의 비균일성, 가스상 물질의 분석에 따르는 분석편차, 또 모델상의 가정 등을 고려할 때 모델값이 실험값과 비교적 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 하지만 venting 시간이 길어짐에 따라 실험값이 모델값을 훨씬 상회하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 xylene류나 trimethylbenzene, naphthalene등 증기압 상대적으로 낮아 오랜시간을 통해 휘발하는 물질들의 경우에 두드러지게 나타나고 있는데 이것은 venting시에 완벽한 국지평형이 이루어지지 않기 때문인 것으로 보이며 초기에 모델값이 실험값보다 약간 높게 나오는 경향이 이를 뒷받침해 주고 있다. 또한 잔류가솔린에 대한 모델값과 실험값의 비교에서도 이러한 현상이 나타나고 있다 (Fig. 6). 즉 모델은 2,000분 동안의 venting후 토양 중 BTEX가 거의 없는 것으로 예측하지만 실지로는 5,000분이 지나도록 매우 천천히 감소하며 어느정도의 농도를 유지하고 있었다

(benzene 제외). 한편 venting에 따른 용출잠재성의 변화를 나타내는 모델과 실험값을 Fig. 7에 비교해 보았다. 모델값과 실험값간의 오차양상은 공기 중 휘발농도와 비슷하게 나타나고 있다. 즉 초기에는 대체적으로 일치하는 경향을 보이나 시간이 지날수록 실험값이 모델값을 상회하고 있다. 한 가지 아쉬운 점은 본 실험의 성격상 용출값을 연속적으로 측정할 수 없어 모델을 좀 더 정밀히 평가할 수 있는 충분한 데이터값이 적었다는 점이다. 실제로 모델과 실험값사이의 오차를 유발하는 구조적인 요인들도 몇 가지 생각해 볼 수 있다. 즉 모델은 venting기간 내내 오염토양내의 가솔린 성분들의 농도가 일정하다고 가정하였으나 실제로는 토양칼럼내에 공기 유입부에서 유출부 쪽으로 움직이는 breakthrough curve와 같은 형태의 농도분포(모든 개별성분들에 대해서)가 존재할 수밖에 없음을 쉽게 예상 할 수 있다. 또한 분석과정에서의 여러 가지 오차요인들도 고려되어야 할 것이다. 예를 들어 휘발성 물질들에 대한 용출이나 추출실험에 있어 항상 문제가 되고 있는 휘발손실과 이에 따른 실제값의 과소평가문제, 토양분석시에 추출효율의 문제 등은 휘발성 물질들에 대한 많은 실험논문들에서 공통적으로 제기되고 있는 문제들로 쉽게 해결하기 어려운 오차요인이라고 할 수 있다. 본 실험에서는 모든 시료 추출/분석 과정상에서 headspace를 최소화하였으며 토양으로부터의 용매추출효율은 85~95% 정도로 나타났다. 용매추출효율에 대해서는 MTBE를 제외하고는 별도의 보정을 해주지 않았다. 이러한 측면들을 고려할 때 본 모델의 두 가지 토대인 Raoult의 법칙적용과 가솔린 성분들에 대한 물질군 할당방법등의 기본적인 유용성은 충분히 검증되었다고 판단된다. 본 모델의 가장 큰 장점은 토양 중의 초기농도와 상관없이 추출가스중의 가솔린 성분들의 농도 및 조성분포의 변화만을 가지고 잔류농도 및 용출잠재농도를 예측할 수 있다는 점이다. 앞으로 venting실험시

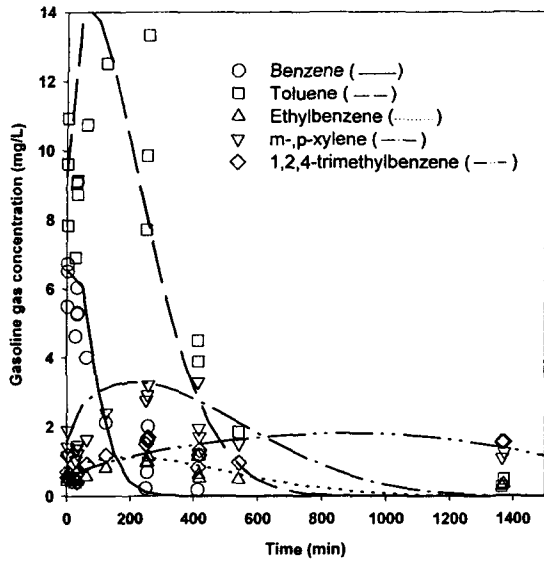


Fig. 5. Comparison of model estimates with experimental results : gasoline concentrations in the effluent air during soil venting

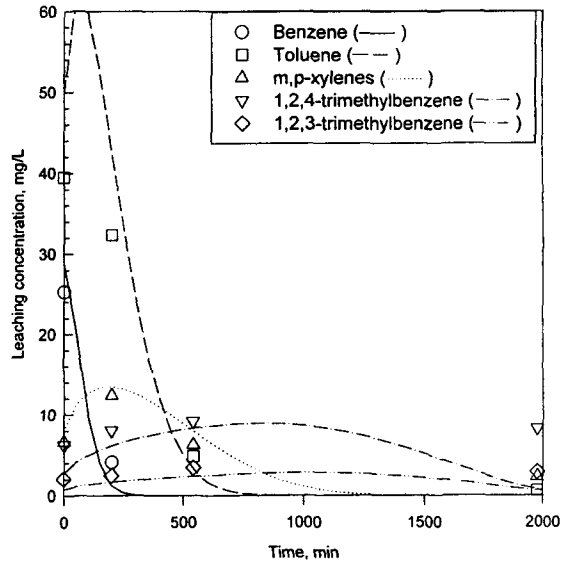


Fig. 7. Comparison of model estimates with experimental results : leaching potential of gasoline components during soil venting

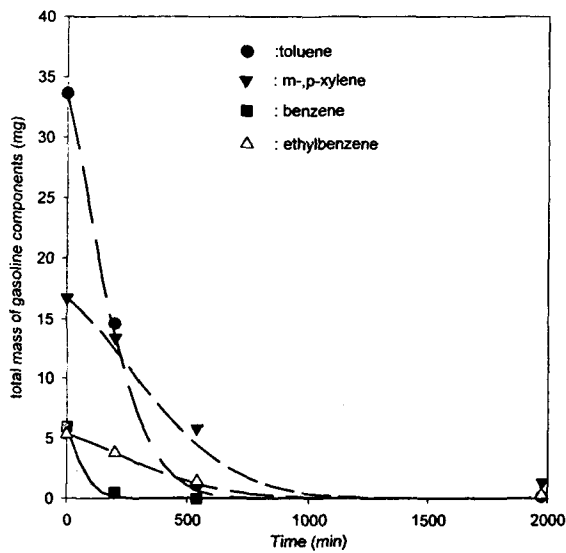


Fig. 6. Comparison of model estimates with experimental results : gasoline remaining in the soil during soil venting

실시간 연속분석(on-line monitoring)이 가능하도록 장치를 구성하고 모델자체도 칼럼 내에서의 advection과 diffusion을 포함시켜 개선하고자 하며 최종적으로는 모델을 방사형의 수평적인 공기흐름에 대하여 적용시켜 증기추출법의 추출정 디자인 및 운전설계, 정화종료시점 추정 등에 활용하고자 한다.

4. 결 론

Soil venting이 오염토양 중 가솔린의 용출거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Raoult의 법칙에 근거한 복합물질 휘발/용해거동 모델을 적용하여 보았다.

가솔린성분들의 용해거동은 휘발에 의한 성분조성의 변화와 상관없이 Raoult의 법칙에 의해 비교적 정확하게 예측될 수 있었으며 오차범위는

naphthalene을 제외하고는 최고 $\pm 100\%$ 이내였다.

오염토양의 형태로 가솔린이 존재하는 경우에도 Raoult의 법칙에 의해 정확히 예측될 수 있었으나 토양중 농도가 초기 20,000 mg/kg에서 1,360 mg/kg까지 감소한 경우에는 예측치가 계산값보다 50~100% 정도 높은 경향을 보였다. 한편 soil venting시 휘발에 따른 조성변화를 Raoult의 법칙을 이용하여 산정하고 각 성분조성에 대한 개별 물질들의 용출잠재성을 결정하는 모델을 이용하여 실험결과와 비교하여 보았다. 전체적으로 볼 때 venting 초기에는 모델값이 합리적인 오차범위내에서 실험값과 일치하고 있으나 시간이 지나면서 모델값이 실험값을 과소평가하는 경향을 보이고 있다. 본 실험을 통해 본 모델의 두 가지 토대인 Raoult의 법칙적용과 가솔린 성분들에 대한 물질 균 할당방법등의 기본적인 유용성은 충분히 검증되었다고 판단된다.

그러나 모델에 대한 보다 정밀한 평가를 위해서는 토양칼럼내의 농도분포를 포함하도록 모델을 개선하는 것이 필요하며 실험값의 연속측정, 기타 분석 오차요인들의 최소화 방안 등이 필요하다. 또한 중요한 것은 토양 중 공기순환유량 및 가솔린 농도와 NAPL-공기간 물질전달에 대한 비평형 조건 형성과의 상관관계를 밝히는 것이다.

본 모델의 가장 큰 장점은 토양 중의 초기농도와 상관없이 추출가스중의 가솔린 성분들의 농도 및 조성분포의 변화만을 가지고 잔류농도 및 용출 잠재농도를 예측할 수 있으며 기존 모델보다 비교적 간단하다는 점이다. 따라서 추후 토양 중 가스 흐름모델과 결합하여 토양증기추출법에 적용 가능한 형태로 개발되면 운전 효율 평가 및 정화종료 시점을 예측할 수 있는 유용한 도구가 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 1) Ng, C.O and Mei, C.C. (1996) Aggregate Diffusion Model Applied to Soil Vapor Extraction in Unidirectional and Radial Flows., *Water Resources Research*, vol.32, n5, 1289-1297
- 2) Campagnolo, J.F. and Akerman, A. (1995). Modeling of Soil Vapor Extraction (SVE) Systems-Part I., *Waste Management*, vol 15, n5/6, 379-389
- 3) Fischer, U., Schulin, R, and Keller, M. (1996). Experimental and Numerical Investigation of Soil Vapor Extraction., *Water Resources Research*, vol 32, n12, 3413-3417
- 4) Mills, W.B., Johnson, K.M., Liu, S., Loh, J.Y. and Lew, C.S. (1996). Multimedia Risk-Based Soil Cleanup at a Gasoline-Contaminated Site Using Vapor Extraction. *Groundwater Monitoring Review*, 2, 168-178
- 5) Staudinger, J., Roberts, P.V. and Hartley, J. D. (1997) A Simplified Approach for Preliminary Design and Process Performance Modeling of Soil Vapor Extraction Systems, *Environmental Progress*, vol 16, n3, 215-226
- 6) Banerjee, S. (1984). Solubilities of Organic Mixtures in Water., *Environmental Science and Technology*, 18, 587-591
- 7) Hayden, N.J., Voice, T.C., Annable, M.D., and Wallace, R.B. (1994). Transfer During Soil Venting., *Journal of Environmental Engineering*, vol. 20, n6, 1598-1614
- 8) Prausnitz, J.M., Lichtenthaler, R.N., and Azevedo, E.G. (1986). *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*, Chap 9, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ

- 9) 염익태, 이상현, 안규홍 (1998). Soil Venting이
오염토양 중 가솔린 성분의 용출성에 미치는
영향 : 1. 실험적 고찰., 한국토양환경학회지
- 10) Annable, M.D., Wallace, R.B., Hayden, N. J. and
Voice, T.C. (1993). Reduction of Gasoline
Component Leaching Potential by Soil Venting.,
J. of Contaminant Hydrology, 12, 151-170