Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 39, No. 6: 751-758/ December, 2019
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2019.39.6.0751

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Water Engineering **수공학**

범용 시나리오 및 오염물질 시나리오에 기반한 불포화대 오염물질 경로에 대한 수치모의 연구

장선우* · 김민규** · 정일문***
Chang, Sun Woo*, Kim, Min-Gyu**, Chung, Il-Moon***

Numerical Study of Contaminant Pathway based on Generic-scenarios and Contaminant-based Scenarios of Vadose Zone

ABSTRACT

This study tested various assumptions that simplified the configuration of the numerical model for unsaturated zone's contaminant transport to simulate the pathway to exposed point. This study investigated the contaminant migration through in the pollutant exposure pathway of vadoze zone for risk assessment of the contaminated site. For the purpose, generic scenarios as well as contaminant-based scenarios were simulated using the numerical code for transport of the contaminant in the pathway. The finite-difference one-dimensional transport with adsorption and biodegradation were considered, and it also assumed that the initial concentration was also depleted over time. The results of the generic-scenario show that as the groundwater infiltration rate decreases, the longer the path from the source to the groundwater level, the lower the concentration at the point of inflow into the groundwater level. In particular, in the case of high biodegradation rate and rapid depletion of pollutant sources, statistically outliers were found in the simulated results and generic scenarios was good at prediction.

Key words : Risk assessment, Exposed concentration, Numerical model, Unsaturated zone, Groundwater, Contaminant, Contaminated site

초 록

본 연구는 오염부지의 위해성 평가를 위해 수치모의 기반 오염물질의 노출이동경로 평가에 활용가능한 개념모델을 제시하였다. 이를 위하여 1차원으로 유한차분 기법을 적용하여 지하수 내 오염물질 이송확산을 모의하였다. 불포화대 경로에서의 수리지질학적 및 오염물질 매개변수가 가질 수 있는 범위를 설정하여 범용 시나리오 및 오염물질별 시나리오를 구성하여 모의에 적용하였다. 모델에서는 흡착 및 생분해를 갖는 유한차분 1 차원 이송확산이 고려되었고, 또한 초기 농도가 시간이 지남에 따라 고갈되는 것을 가정하였다. 일반 시나리오의 결과는 지하수 침투율이 감소함에 따라, 오염원에서 지하수면까지의 경로가 길어질수록 지하수면으로 유입되는 지점의 농도 범위는 낮아졌다. 특히, 높은 생분해 속도와 오염원의 빠른 고갈의 경우, 범용 시나리오가 좁은 범위의 지하수 유입농도 예측치를 보여주었다.

검색어 : 오염부지 위해성평가, 노출농도, 수치모델, 불포화대, 지하수, 토양오염물질, 오염부지

* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 (**Corresponding Author** · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · chang@kict.re.kr)
** 한국건설기술연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · kimmingyu@kict.re.kr)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · imchung@kict.re.kr)

Received November 5, 2019/ **revised** November 12, 2019/ **accepted** November 21, 2019

Copyright ⓒ 2019 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

위해성이란 인체나 생태계의 구성요소인 수용체가 오염물질에 노출될 경우 발생할 수 있는 악영향의 가능성으로 정의되며 위해성 평가는 이러한 가능성에 대한 정량적으로 측정하는 과학적인 과정으로 국내에서는 위해성평가 지침이 마련되어 있다(MOE, 2018). United States Environmental Protection Agency (USEPA)는 오염부지를 정화하기 위한 구체적인 지침을 마련하고 있으며(ASTM, 2000) 전세계적으로 많은 위해성 평가가 USEPA가 설정한 방식을 따르고 있다.

불포화대로 표현하는 토양에서 지하수로의 오염물질 이동경로를 파악할 때는 오염원의 농도, 토양의 공극률, 유기탄소함량, 토양 투수도 등 수리지질학적 요인과 오염물질의 특성들이 오염물질 이동경로에 영향을 주는 인자이나 국내 위해성평가와 같은 일반적이고 보수적인 위해성 평가 과정에서 불포화대에서의 오염물질 저감 기작을 상세하게 고려하고 있지는 않아 주요 인자들 중 상당수는 계산에서 생략되는 상황이다.

일반적이고 보수적인 위해성평가에 사용하는 노출농도 산정식은 토양에서 용출되는 오염물질이 지하수로의 이동과정에서 전혀 희석 및 저감이 일어나지 않고 그대로 지하수 포화대에 전달됨을 가정한다(USEPA, 1996a). EPA에서 오염물질의 이동경로를 평가하는데 사용한 불포화대 부지개념모델은 오염물질 이동경로 상의 생분해 및 흡착, 저감 기작 및 불포화대 흐름에 영향을 미치는 매개변수의 영향을 최소화하였다(USEPA, 1996b). 최근에는 일반적이고 보수적인 위해성평가 방식을 개선해 부지특이적인 위해성평가를 위해 오염물질 이동경로 파악을 위한 구체적인 수학적 모델을 사용하고자 하는 연구 결과들이 나타나고 있다. Ryu(2010)는 불포화대 및 포화대에서의 BTEX 및 석유계총탄화수소(PAHs)의 오염물질 경로를 수학적으로 모의하여 각 주요 매개변수가 희석저감계수 도출에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. Mazzieri et al.(2016)는 기존 ASTM에서 제시한 모델과 유사한 정상 상태 모델은 분배계수, 침출 및 휘발 등과 같은 화학물질의 특성과 관련한 모델 입력값을 활용하여 1차원 용질 거동 및 희석 모델링을 실시하였다. 이 때 용질 이동은 1차원 해석해를 사용하였는데 이 중 본문에서는 흡착 및 생분해를 고려하지 않는 가장 기본적인 이송 분산 방정식을 활용한 용질 이동모의를 수행하였다. 환경정책평가연구원(KEI, 2006)에서는 2DFATMIC (Yeh and Cheng, 1997) 코드를 활용하여 매질에 따른 시나리오에 따라 불포화대 및 가변포화대에서의 오염물질 희석 및 저감을 평가하였다. Chang et al.(2019)는 오염부지 위해성 평가시 활용할 수 있는 불포화대 오염물질 이동 경로 평가를 동일한 수치모의 방식을 적용하여 불포화대에 위치해 있는 오염원에서 포화대를 거쳐 노출되는 용질 수송 유한차분 모델을 구축하고 대표적인 오염물질인 벤젠을 대상으로 오염 경로를 모의하였다.

본 연구는 범용 불포화대 모델 내 주요 모델입력 인자 범위를 고려한 오염물질 거동 시나리오 구성 및 불포화대 이동 경로 이후 지하수면으로 유입되는 오염물질의 최고농도값의 범위을 예측하고자 하였다. 수치모의를 실행하기 위해 Microsoft Excel에 내장된 Visual Basic Application (VBA)을 플랫폼으로 활용하였고 VBA 기반 유한차분 방식의 코드를 개발하고 VBA_transport 로 명명하여 본 연구에서 적용하게 될 시나리오 기반의 수천번의 오염물질 거동 모의를 비교적 간편하게 수행할 수 있도록 하였다. VBA transport 코드를 기반으로 부지의 불포화대 오염물질 이동 및 저감의 복합효과를 수치모의 방식으로 검증함으로써 기존 위해노출농도 산정 기법에서 가능하지 않았던 다양한 상황에서의 위해성 종합 평가를 가능하게 하며 또한 부지 및 오염물질별 시나리오에 따른 위해노출농도 결정 기술 및 이에 따른 불포화대 확산저감계수 평가기술을 확보하고자 하였다.

본 연구에서는 토양환경보전법 시행규칙 및 토양오염 위해성평가지침 상의 위해성평가 대상 중 유기계 오염물질인 벤젠, 에틸벤젠, 톨루엔, 크실렌을 대상으로 노출 경로 시나리오를 적용하여 지하수 포화대로 유입농도를 모의하였다. 모의를 위해 유한차분법을 이용해서 오염물질 이송확산 및 저감의 지배방정식을 구성하였다. 용질 이동의 해를 구하기 위해, 이송 및 분산, 흡착 프로세스는 음해유한차분법(Implicit Finite Difference Method)으로 계산하여 수치적인 안정석을 도모하였다. 시나리오를 활용한 모의 결과를 활용하여 개념모델의 지하수 유입 농도 범위를 결정하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 유한차분모의

본 연구의 불포화대 모의는 직사각형의 오염원 영역, 균일한 농도의 오염원을 가정한다. 또한 불포화대에서 1차원 유동과 이송, 개념모델 상부의 함양 경계조건으로 정상상태의 모의, 등온상태의 Darcy의 법칙에 의한 흐름, 토양으로 유입되는 침출수의 농도는 일정하거나 시간이 경과함에 따라 감소하고 용질은 희석되어 용액 또는 토양 고상에서만 존재하고 용질의 흡착은 선형 등온선으로 가정하며 화학적/생물학적 변형 과정 유효 1차수 분해(first order decay) 계수로 표현한다.

1차원의 균질한 다공매질을 통과하는 오염물질의 이동 및 저감의 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R\frac{\partial c}{\partial t} = -V_x\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial c}{\partial x}\right) - \lambda c \quad (1)$$

여기서, t [T]는 시간, x는 1차원 좌표로서 지표에서 지하수면까지의 수직거리 방향이다. 또한 V_x[L/T]는 불포화대의 수직방향 흐름의 지하수 평균 선형 유속, C [ML^{-3}]는 용질 농도, D_x [L^2/T]는 수리 분산지수, λ [T^{-1}]은 생분해지수를 나타낸다.

$$V_x = \frac{I}{\theta} \tag{2}$$

본 연구에서의 각 격자에서의 평균 선형 유속은 등속도로 가정한 부지로의 침투율(또는 토양투수도, I)을 공극률 (θ)로 나누어 계산한다.

Eq. (1)에서 사용되는 지연계수 (R)는 Eq. (3)으로 계산하며 지연계수의 값은 오염물질의 이동 속도가 지연되는 정도에 영향을 끼친다.

$$R = 1 + \frac{\rho_b k_{oc} f_{oc}}{\theta} \tag{3}$$

여기서, ρ_b [ML^{-3}]는 토양용적밀도, k_{oc} [L^3M^{-1}]는 유기물분배계수, f_{oc} [dimensionless]는 토양유기탄소비율이다.

$$C = C_o \exp(-\beta t) \tag{4}$$

$$\beta = \frac{I}{(\rho_b K_d + \theta)} \tag{5}$$

오염원에서 용출되는 농도는 시간에 따라 지수형태로 감소되는 것을 가정한다. 이 때 C_o는 오염원에서 오염물질이 용존하여 불포화대로 유입되는 초기 농도이며 본 연구에서는 상대농도로 계산하므로 무차원값이며, β는 오염원 고갈 지수[T^{-1}], K_d는 지연계수 [L^3M^{-1}]이며 유기오염물질의 경우에는 유기물분배계수와 토양유기탄소비율을 곱하여 계산한다. Mazzieri et al.(2016)이 채택한 계산식을 기반으로 침투율의 범위가 토양 내 유효환산계수보다 충분히 큰 값을 가진다고 가정하였을 때 Eq. (5)와 같이 단순화되어 표현된다.

경계조건

at t = 0, c = 0 at all point

at x = 0, $C = C_o \exp(-\beta t)$

at x = L, $\frac{\partial c}{\partial x} = 0$

개념모델의 초기에는 불포화대 개념 모델의 초기농도는 모든 영역에서 0 이며 시뮬레이션이 시작하면서 오염물질 용존 농도가 상부 경계에서 유입되기 시작한다. 상부 경계의 유입 농도는 시간에 따라 지수적으로 감소하며, 하부 배출 경계에서의 농도 구배는 0 이다. 위의 경계 조건을 반영한 개념모델을 바탕으로 Eq. (1)부터 (5)까지의 일련의 수학적 계산은 VBA_transport 코드로 수행하였으며 그 검증은 MT3DMS 소프트웨어의 모의 결과와 비교하였다. 앞서 서술한 경계 조건의 수학적 표현을 시각적으로 구현하여 Fig. 1의 그림으로 표현하였다.

Fig. 1은 지하수 불포화대를 모의 영역으로 한 경계 조건을 구현한 것으로 오염원의 오염물질이 용존되어 있는 토양유출수가 이동하는 경로를 개념화한 개념모델이다. 본 개념모델은 토양 매질 내 흡착/용해/휘발의 평형 상태이며, 정상상태의 수분 침투율과 함께 오염물질이 정속도로 지하수면을 향해 수직방향으로 이동한다고 가정한다. 오염원에서 지하수면에 이르는 불포화대 깊이는 최소 1 m에서 최대 5 m이다. 모의 기간은 100년으로 설정하였다. 토양유출수가 불포화대 경로에 유입되는 시점의 토양유출수 농도를 1 mg/L로 설정하고 상대적으로 저감 및 희석되는 농도 분포를 관측한다. 본 연구에서 1차원 격자를 구성하여 개념모델의 결과값을 제시하고자 하였다.

개념모델은 일정한 토양투수도를 가정하고 있으며 토양 내 수분함량에 따른 지하수 수리전도도 변화를 고려하지 않고 있다. 따라서 일정한 유속을 가진 이송방정식을 활용한다. USEPA(1996b)에서도 정속 토양투수도에 의한 토양 내 이송만을 고려하여 불포화대를 모의하였다. 본 불포화대 개념모델 구성은 유체가 등속으로 흘러가는 컬럼 실험과 유사한 구성이며 불포화대 경계를 통과하는 오염물질의 농도를 지하수면 유입 농도로 가정하고 모의 시작 시점의

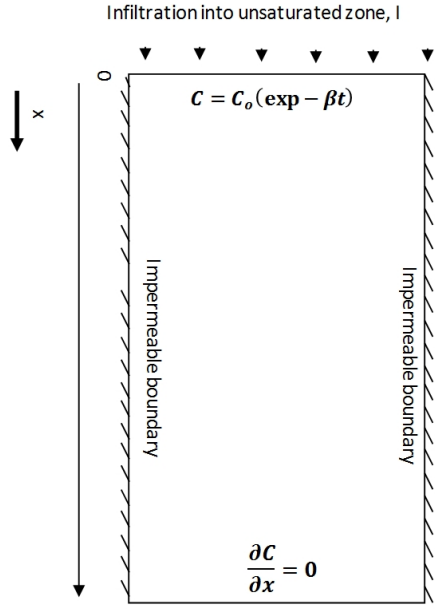

Fig. 1. Conceptual Model of 1-Dimensional Transport in Vadose Zone

Table 1. Summary of Numerical Model Parameters

Property	Symbol	Values
Distance between the bottom of the source and water table	L	1 m
Effective infiltration	i	0.1 m/year
Total porosity	θ	0.3
Soil bulk density	ρ_b	1.57 g/cm^3
Fraction of organic carbon of Benzene	f_{oc}	0.008
Distribution coefficient of Benzene	K_{OC}	62 L/Kg
Degradation coefficient	λ	0.1 year^{-1}
Source depletion coefficient	β	1 year^{-1}

초기 농도 대비 지하수면 유입 농도의 최대값을 상대농도로 계산하여 본 연구의 지표로 사용한다

모의영역을 1차원 이송 경로로 설정하였고 0.01 m 크기의 격자크기로 구성하였다. 상부 경계에서 지하수 불포화대를 통과한 유량이 오염물질과 함께 수직방향으로 유입된다. 분산 지수는 0.0001 m^2/yr로 설정하였다 유출되는 토양유출수가 등속도의 토양투수도에 의해 토양 내로 유입되는 현상을 모사하기 위해 침투 유량을 경계조건으로 설정하고, 컬럼의 배출 부분의 용질 구배를 0으로 설정하였다. 불포화대를 구성하는 토질은 loam이고 Table 1에서 본 연구의 불포화대 수치 모의에 사용되는 입력변수들의 기본값을 볼 수 있다.

Fig. 2는 VBA_transport 모의결과를 MT3DMS (Zheng and Wang, 1999)결과와 비교한 것으로서 Table 1에서 제시한 매개변수를 활용하여 이송, 확산, 흡착, 생분해, 그리고 오염원 고갈 기작을 하나씩 더해가는 경우를 보여주었다. 그래프의 C_w는 불포화대 오염경로를 지나 지하수면으로 유입되는 농도를 표기한 것이다. 각각의 그래프는 (a) 이송과 확산, (b) 이송, 확산, 흡착, (c) 이송, 확산, 흡착, 생분해, (d) 이송, 확산, 흡착, 생분해 그리고 오염원 고갈을 모의한 결과들이다. 네 가지 경우의 VBA_transport 결과를 MT3DMS 모의 결과와 비교하였을 때 비교적 유사함을 알 수 있어 앞으로 시나리오를 적용할 VBA_transport 코드의 신뢰도를 확인할 수 있었다. 본 연구의 범용 시나리오 및 오염물질 시나리오 적용에는 VBA_transport 코드를 활용한다.

2.2 시나리오 구성

본 연구에서는 범용 시나리오와 오염물질별 시나리오를 구성하고 모의에 적용한다. 여기서 범용 시나리오는 특정한 물질의 수리지질학적 물리화학적 특성을 고려하지 않고, 전반적으로 실제 부지에서 나타날 수 있는 전반적인 매개변수의 값를 고려하여 그 범위를 결정하고 범위 안에서 대표값을 여러 개 선정해 모의 입력값으로 활용하는 시나리오이다. 범용 시나리오로 구성해 모의하여 전반적으로 매개변수의 영향에 의해 나타나는 지하수 유입농도의 범위를 파악하였다. 불포화대 내 오염원에서 지하수까지의 수직거리, 토양

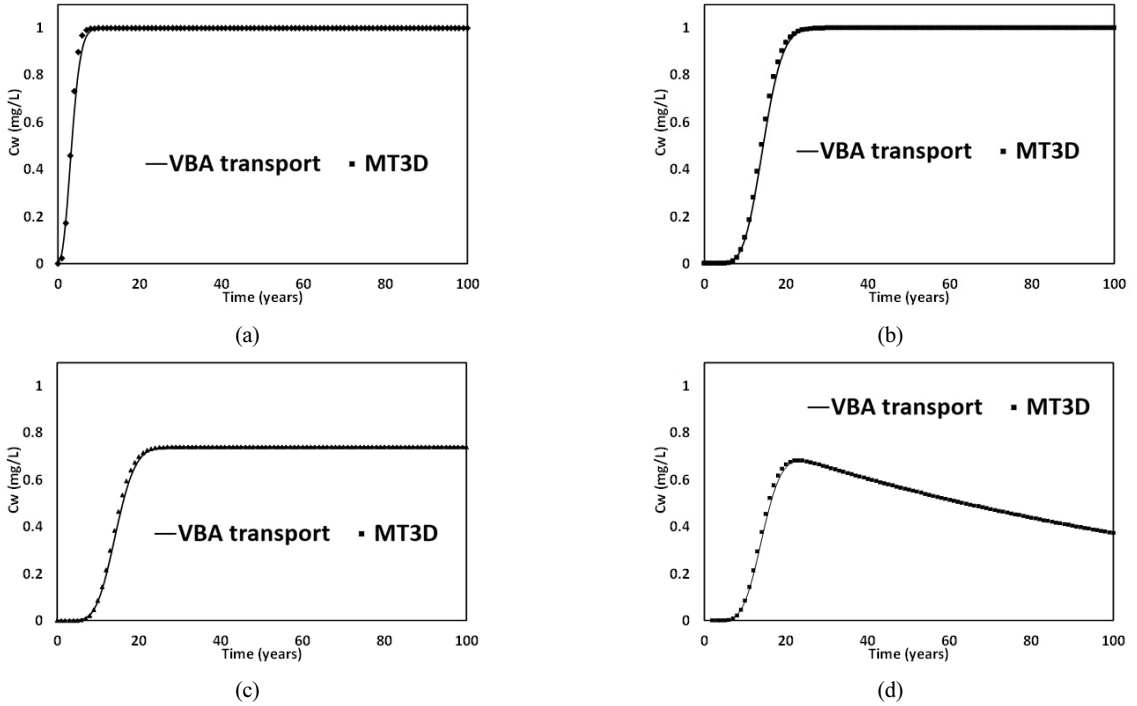

Fig. 2. Comparision of VBA-Transport to MT3DMS

Table 2. Description of Generic Model Scenarios

	Parameter value and the range
Length, L [m]	(1, 2, 3, 4, 5)
Infiltration, I [m/yr]	(0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1)
Sorption Coeff. R	(1, 10, 20, 30, 40)
Decay Coeff., λ	(0, 0.01, 0.1, 1)
Source depletion coeff., β	(0, 0.1, 1, 10)

Table 3. Description of Contaminant-Based Scenarios

	benzene	Ethylbenzene	Toluene	Xylene
Length, L [m]	(1, 2, 3, 4, 5)			
Infiltration, I [m/yr]	(0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1)			
Sorption Coeff. R	4.6	49.4	14.2	39.5
Decay Coeff., λ	(0, 0.01, 0.1, 1.0)			
Source depletion coeff., β	40.1	3.1	11.3	3.9

투수도, 흡착계수, 생분해도, 오염원 고갈 변수값의 범위를 가정하고 범위 내에서 여러 경우를 가정하고 각 매개변수별 조합을 적용하여 용질 이동을 모의하였다.

토양투수도 또는 침투율은 불포화대의 오염물질 희석-저감에 매우 큰 영향을 미치는 매개변수로 알려져 있으며 Ryu(2010)는 침투율의 범위를 10^{-5} m/day ($3.6*10^{-6}$m/yr)에서부터 1 m/day (365 m/yr)까지 민감도 테스트를 실시하였다. 또한 ASTM의 RBCA toolkit에서 제시하는 투수도인 $8.2*10^{-4}$ m/day (0.3 m/yr)도 고려하여 실제 부지에서 발생가능한 투수도의 범위를 추정하여 범용 시나리오의 투수도값 범위인 0.05 -1 m/yr를 결정하였다. 불포화대 오염물질 이동 경로의 길이는 1 m에서 5 m의 범위를 고려하였다. 시나리오 수립 시, 공극이 0.3 인 매질의 유체 이동 이 시나리오 내 주어진 경로를 통과하는 시간이 모의 시간인 100년 이내일 수 있도록 토양투수도 및 경로 길이의 범위를 고려하였다. 불포화대 경로 길이, 침투율, 흡착, 생분해, 오염원 고갈의 경우의 개수는 5,5,5,4,4 개이며 이 매개변수들의 조합에 의한 시나리오 모의 경우는 n{Length}*n{Infiltration}*n{Sorption}*n{Decay}*n{Source Depletion} = 2000으로 총 2,000 가지이며 도출한 결과는 통계 분석을 시행하였다. Table 2는 범용 시나리오에서 사용된 매개변수 값들의 조합을 나타내었다.

오염물질별 시나리오에서는, 범용 시나리오 적용 이후에는 일반적인 범위로 적용했던 오염물질 관련 매개변수 범위를 특정 오염물질이 가지는 값으로 지정하여 지하수 유입 오염물질의 농도가 오염물질별로 나타나는 범위를 파악하고자 하였다.

오염물질별 시나리오 구성은 범용 시나리오와 같이 불포화대 내 오염원에서 지하수까지의 수직거리, 토양투수도의 범위를 동일하게 가정한다. 흡착계수는 EPA On-line Tools for Site Assessment Calculation(USEPA, 2019)에서 이용하여 계산하였다. 이 때 organic carbon fraction은 0.008로 이 값은 Mazzieri et al.(2016)에서 제시했던 loam의 값을 차용하였다. Table 2에서 주목할 점은 Sorption이 특정 오염 물질별로 고정된 상수값을 적용할 경우, 오염원 고갈 지수는 Eq. (5)에 의해 종속적으로 결정된다는 사실이다. 이 때 생분해 범위는 고정된 값을 사용하지 못해 범용 시나리오와 마찬가지로 0에서 1.0까지의 범위 내에서 지수 규모로 증가시켜 입력하였다. 그 결과 불포화대에서 오염물질별로 경로 길이, 침투율, 흡착, 생분해, 오염원 고갈의 각각의 경우의 개수는 5,5,1,4,1 개이며 이 매개변수들의 조합에 의한 시나리오 모의 경우는 오염물질별로 n{Length}*n{Infiltration}*n{Sorption}*n{Decay}*n{Source Depletion} = 100으로 총 400 가지이며 도출한 결과는 통계 분석을 시행하였다. Table 3는 오염물질별 시나리오에서 사용된 매개변수 값들의 조합을 나타내었다.

3. 연구결과

Fig. 3을 통해 토양투수도 또는 침투율별 지하수 유입농도의 경향성을 알아보았다. 가장 높은 침투율값인 100 cm/yr (또는 1 m/yr)로 오염물질이 1 m 깊이를 이동할 경우, Table 2에서 주어진 흡착, 생분해, 오염원 고갈의 영향을 고려한 범위에서 모의한 지하수 유입농도의 결과값은 최대값 1.0, 최소값 0.13, 평균값 0.69, 중앙값 0.74이며 통계구간을 사분위(Quartile)로 구분할 경우 상위 25 %값인 Q1(1st-quartiles)값 0.54, 상위 75 %값인 Q3(3rd-quartiles)값 0.94를 나타낸다. 오염물질의 이동거리가 2,3,4,5 m로 길어질수록 그리고 침투율이 감소할수록 지하수 유입농도의 평균값, 중간값, Q1, Q3값은 점차 감소한다. IQR의 1.5배 길이의 선으로 Q1과 Q3의 바깥 범위를 표현하는 수염범위(Box Whisker) 안의 범위에서 모든 침투율의 경우 및 모든 지하수면까지의 거리에서 최대

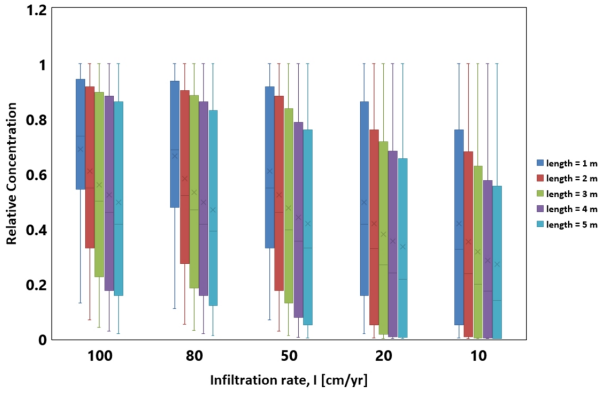

Fig. 3. Relative Maximum Concentration according to Infiltration Rate for Generic-Scenarios

지하수면 유입농도값인 1이 위치하고 있다. 최대 지하수면 유입농도값이 모든 침투율과 모든 깊이에서 1.0인 이유는 개념모델에서 오염물질의 생분해와 초기농도 고갈을 고려하지 않고 이송확산 및 흡착만을 고려하여 이동경로에서 농도가 감소하지 않고 지하수면으로 유입되기 때문이다.

Fig. 4에서 지연계수별 지하수 유입농도의 경향성을 알아보았다. 계수가 1인 경우는 흡착 기작이 없이 이송 확산만으로 오염물질이 불포화대를 이동하는 경우를 나타내는데 흡착계수가 10이상인 인 경우 Q1에서 Q3값 사이의 범위인 IQR가 흡착이 없는 경우에 비해 큰 범위를 나타낸다. 흡착계수 별로 구분한 범용 시나리오 모의 결과는 앞서 설명한 Fig. 3의 침투율별로 구분한 결과와 매우 유사한 범위 분포를 나타내고 있다.

Fig. 5에서 생분해지수별 지하수 유입농도의 경향성을 알아보았다. 생분해지수가 0인 경우는 생분해 기작이 없이 이송 확산, 흡착만으로 오염물질이 불포화대를 이동하는 경우를 나타내는데 이동 거리가 길어질수록 평균값과 중앙값이 다소 낮아진다. 생분해지수가 1인 경우 Q1에서 Q3값 사이의 범위인 IQR가 나머지 경우에 비해 확연히 좁아진 범위를 나타내어 1 이상의 생분해 지수값은 불포화대의 오염물질 거동에서 매우 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 지수 형식으로 감소하는 오염원 고갈 매개변수값을 Eq. (4)에 대입하여 각각의 경우에 경계조건에서의 초기 농도가 시간에 따라 변화하는 양상을 나타내는 그래프이다. 범용 시나리오에서는 일정하게 감소하는 값은 향후 오염물질 별 시나리오에서는 Eq. (5)에 의해 지연계수와 상관되는 구체적인 값으로 설정된다. 값이 각각 0.01, 0.1, 1일 경우의 반감기는 각각 69.3, 6.93 년, 0.69년에 해당한다.

Fig. 7에서 오염원 고갈 계수별 지하수 유입농도의 경향성을 알아보았다. 계수가 0인 경우는 오염원에서 꾸준히 같은 농도의 용존물질이 유입되는 경우이며 이동 거리가 길어질수록 평균값과 중앙값이 점차 낮아지는 반면 최대값은 모두 1.0으로 나타났다. 오염원 고갈 지수가 커질수록 Q1에서 Q3값 사이의 범위인 IQR가 점차 좁아지는 것을 확인할 수 있으며 값이 1이상인 경우부터는 IQR의 1.5배 길이인 수염범위 바깥에 있는 이상치가 급격히 나타나기 시작한다. 오염원 고갈 계수가 증가할수록 이상치가 수염 범위 바깥으로 더욱 멀어지는 것을 알 수 있다.

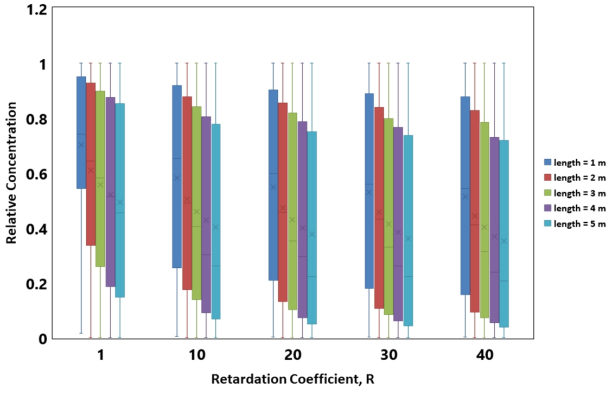

Fig. 4. Relative Maximum Concentration accordng to Retardation Coefficient rate for Generic-Scenarios

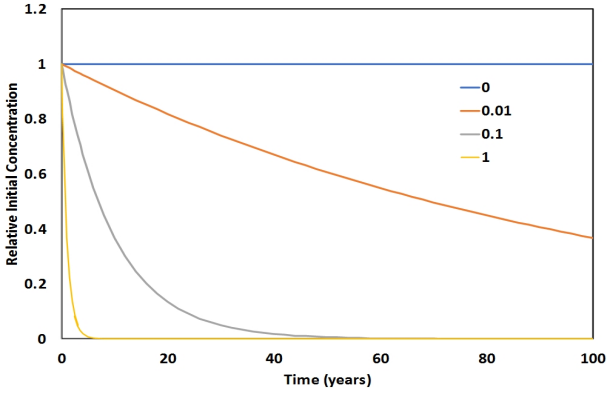

Fig. 6. Temporal Initial Concentration Change at Boundary according to Different Source Depletion Coefficients

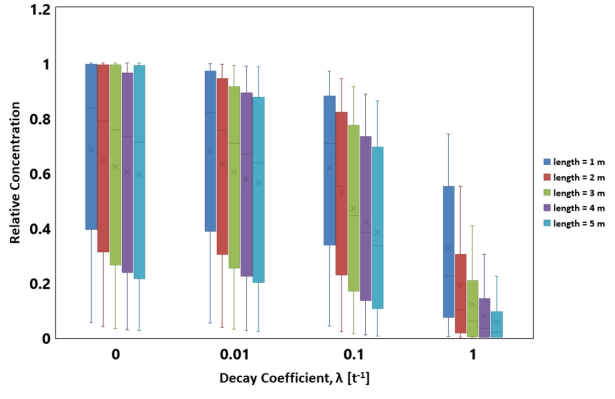

Fig. 5. Relative Maximum Concentration according to Decay Coefficient Rate for Generic-Scenarios

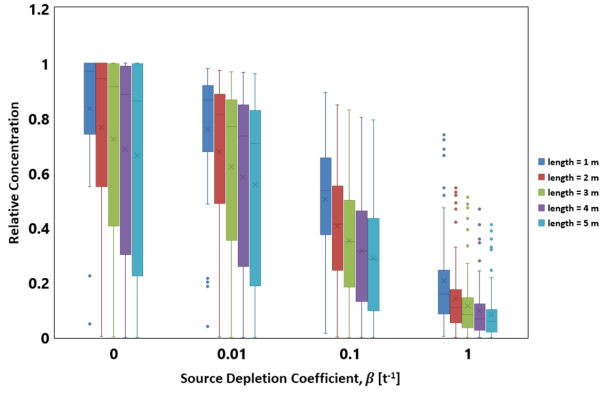

Fig. 7. Relative Maximum Concentration according to Source Depletion Coefficient Rate for Generic-Scenarios

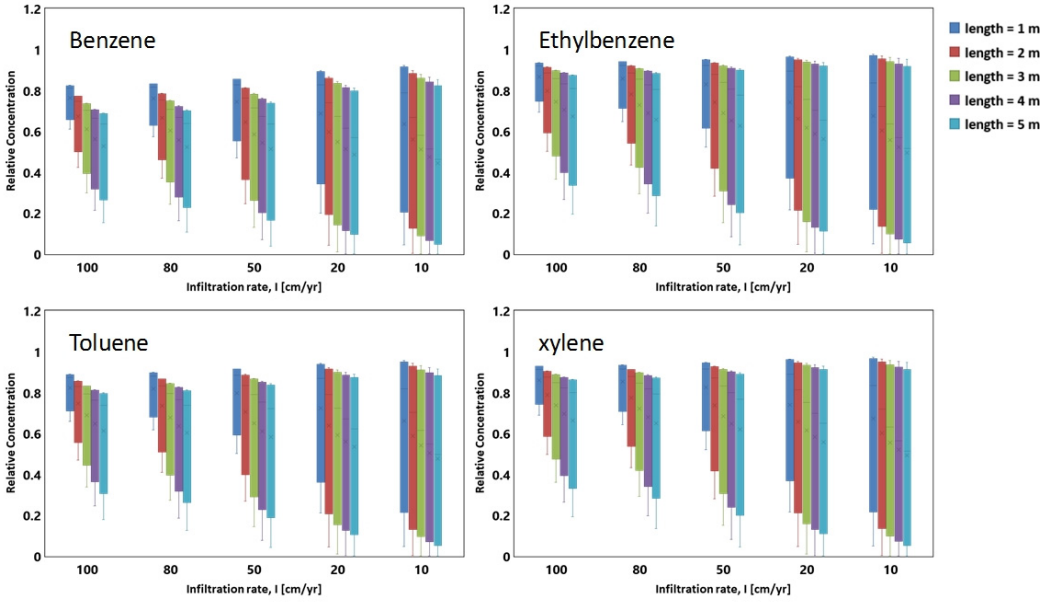

Fig. 8. Relative Maximum Concentration according To Source Depletion Coefficient Rate for Contaminant-Based Scenarios

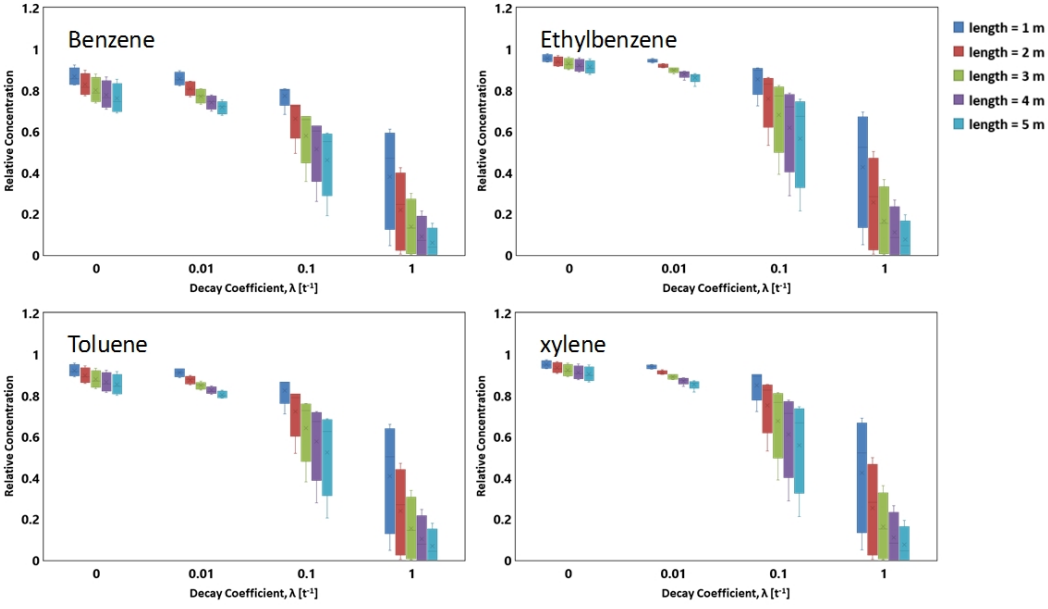

Fig. 9. Relative Maximum Concentration according to Source Depletion Coefficient Rate for Contaminant-Based Scenarios

Fig. 8은 오염물질별 시나리오 적용에 따른 침투율별 지하수 유입농도의 범위를 나타낸 그래프이다. 범용 시나리오에서 넓은 범위의 값으로 설정했던 오염물질 관련 매개변수 값을 오염물질별로 확정하여 지하수 유입농도의 경향성을 알아본 결과 범용 시나리오에서 보여주었던 IQR 값에 비해 상대적으로 IQR 범위가 좁아진 경향이 나타난다. 그러나 오염물질의 불포화대 오염경로의 이동거리가 길어지고 침투율이 작을수록 사분위 범위가 점차 넓어지는 것을 알 수 있다. 에틸벤젠, 톨루엔, 크실렌의 지연계수는 각각 49.4, 14.2, 39.5이며 이에 따른 오염원 고갈 지수는 0.031, 0.11, 0.39 $year^{-1}$로 계산된다. 그러나 오염물질별로 농도 범위의 경향성이 그다지 크게 차이가 나지 않는 것을 모의 결과로부터 알 수 있다.

벤젠, 에틸벤젠 등 유기화학물질의 기체상태의 반감기가 몇일 정도에 이르는 빠른 시간이지만 용존 농도에서의 반감기는 적절한 참고자료를 확보하기 어려워 생분해지수값은 특정한 값을 지정하지 않고 범용 시나리오와 유사한 매개변수 범위인 0 부터 1 yr^{-1}까지의 값을 적용하였고 그 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 오염물질별

시나리오에서는 흡착과 오염원 고갈의 특이적 값을 고정한 결과, 1.5배 길이인 수염범위 바깥에 있는 이상치가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 모의 결과를 생분해 지수값 별로 구분했을 경우, 생분해 기작이 없거나 비교적 영향이 적은 경우에는 오염물질의 지하수면 유입 농도 범위가 좁아지면서 거의 특정한 값으로 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 또한 생분해지수값이 증가하고 이동경로가 길어질수록 지하수 유입농도가 0에 가까워지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 오염부지 위해성평가 시 오염물질 노출이동경로에서의 기작을 파악하여 오염물질의 농도가 지하수면에 유입되는 농도의 변화를 연구하였다. 불포화대의 유한차분 1차원 이송확산흡착 및 생분해를 고려하였고 초기 농도 역시 시간에 따라 고갈되는 개념모델을 채택하였으며 범용 시나리오와 오염물질별 시나리오를 점진적으로 적용해 지하수 유입농도의 범위를 점차 비교하고 추정하고자 하였다. 범용 시나리오 적용 결과는 지하수 침투율이 감소하고, 오염원에서 지하수면까지의 경로가 길어질수록 지하수면으로 유입되는 시점의 농도가 낮아짐을 알 수 있으나 유입농도의 추정 범위가 넓어서 그 경향성을 확인하기 다소 명확하지 않았고, 특히 높은 생분해율 및 오염원의 빠른 고갈이 일어나는 경우에서는 통계적으로 벗어난 이상치들이 모의 결과값에서 많이 나타나고 있었다. 오염물질별 시나리오에서는 범용 시나리오에서 느슨하게 적용하던 오염물질 관련 매개변수를 국내 토양환경보전법 시행규칙 및 토양오염 위해성평가지침 상의 위해성평가 대상 오염물질 13종 중 유기계 오염물질인 벤젠, 에틸벤젠, 톨루엔, 크실렌 대상으로 특정해 해당 매개변수의 값을 고정하여 적용하였으며 그 결과, 지하수 유입농도의 추정 범위가 상대적으로 좁아져서 평균값에 수렴하는 것을 파악할 수 있었다. 특히 흡착에 의한 지연계수가 크게 나타나는 에틸벤젠 크실렌 등에서는 지하수 유입농도를 생분해 범위에 따라 구분하여 파악할 경우 거의 특정 값에 수렴하는 경향을 나타내어, 흡착이 거동의 주요한 기작이 되는 것을 알 수 있다.

본 연구의 오염물질별 시나리오는 비교적 수용성이 높은 유기계 오염물질인 BTEX를 대상으로 적용하였는데, 이와 같은 시나리오 적용 방식이 위해성 평가 대상인 나머지 오염물질, 예를 들어 석유계 총탄화수소(TPH), 중금속류 등에 대해서도 가능할 것으로 예상한다.

현장 특이적인 불포화대 오염물질 거동의 경우에는 본 연구에서 여전히 단순한 가정으로 치환되어 있는 여러가지 매개변수들에 대한 더욱 깊이있는 고찰이 필요할 것으로 보인다. 예를 들어 본 연구에서 사용한 침투율은 모의 기간동안 등속으로 불포화대로 유입되는 유량이지만 현실에서와 마찬가지로 시변성 자료로 해석되어야 하며, 특히 국내의 강수 특성상 계절별 강우 특성에 따른 침투율이 변화가 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지중환경오염위해관리기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 2018002450003).

References

ASTM (2000). *Standard guide for risk-based corrective action, standard E2081-00 (Reapproved 2004)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, P. 95

Chang, S. W., Moon, H. S., Lee, E., Joo, J. C. and Nam, K. (2019). "Numerical study of contaminant pathway for risk assessment in subsurface of contaminated sites." *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 24, No. 3. pp. 13-23 (in Korean).

Korea Environment Institute (KEI) (2006). *Improving coherence between soil and groundwater quality standards*, RE-14.

Mazzieri, F., Di Sante, M., Fratalocchi, E. and Pasqualini, E. (2016). "Modeling contaminant leaching and transport to groundwater in Tier 2 risk assessment procedures of contaminated sites." *Environmental Earth Sciences*, Vol. 75, No. 18, p. 1247

Ministry of Environment (MOE) (2018), *Soil contamination risk assessment guideline*, No. 283 (In Korean).

Ryu, H. (2010). *Development of realistic risk assessment framework for organic contaminants incorporating desorption-limited bioavailability and dilution attenuation factors*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University.

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (1996a) *Soil screening guidance: user's guide, office of emergency and remedial response*, Washington, DC. EPA/540/R-96/018. NTIS PB96-963505.

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (1996b) *Soil screening guidance: technical background document. office of emergency and remedial response*, Washington, DC. EPA/540/R-96/128. NTIS PB96-963502.

United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2019). *EPA On-line Tools for Site Assessment Calculation*, Available at: https://www3.epa.gov/ceampubl/learn2model/part-two/onsite/retard.html (Accessed: October 29, 2019).

Yeh, G. T. and Cheng, J. R. (1997). *2DFATMIC: User's manual of a two-dimensionalsubsurface flow*, fate and transport of microbes and chemical model version 1.0., EPA/600/R-97/052, U.S. Environmental Protection Agency, Washington,D.C.

Zheng, C. and Wang, P. P. (1999). *MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater system; Documentation and user's guide*, Contract Report SERDP-99-1, US Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA.