

## 유류 오염물질에 대한 불포화대 자연 저감능 등급화 기법 개발

우희수<sup>1</sup> · 안성남<sup>1</sup> · 김기범<sup>4</sup> · 박새롬<sup>5</sup> · 오성직<sup>1,2</sup> · 김상현<sup>1</sup> · 정재식<sup>1,2\*</sup> · 이승학<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원(KIST) 물자원순환연구단

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교(UST) 에너지-환경융합전공

<sup>3</sup>고려대학교 에너지환경대학원

<sup>4</sup>(주)청우환경

<sup>5</sup>한국건설기술연구원(KICT) 환경연구본부

## A New Evaluation Model for Natural Attenuation Capacity of a Vadose Zone Against Petroleum Contaminants

Heesoo Woo<sup>1</sup> · Seongnam An<sup>1</sup> · Kibeum Kim<sup>4</sup> · Saerom Park<sup>5</sup> · Sungjik Oh<sup>1,2</sup> · Sang Hyun Kim  
Jaeshik Chung<sup>1,2\*</sup> · Seunghak Lee<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Water Cycle Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seoul 02792, Korea

<sup>2</sup>Division of Energy and Environmental Technology, KIST School, Korea University of Science and Technology (UST),  
Seoul 02792, Republic of Korea

<sup>3</sup>Graduate School of Energy and Environment (KU-KIST Green School), Seoul 20841, Korea

<sup>4</sup>Cheongwoo Environment Co., LTD., Seoul 05681, Korea

<sup>5</sup>Korea Institute of Civil engineering and building Technology, Department of Environmental research,  
Gyeonggi-do, 10223, Korea

### ABSTRACT

Although various methods have been proposed to assess groundwater vulnerability, most of the models merely consider the mobility of contaminants (i.e., intrinsic vulnerability), and the attenuation capacity of vadose zone is often neglected. This study proposed an evaluation model for the attenuation capacity of vadose zone to supplement the limitations of the existing index method models for assessing groundwater vulnerability. The evaluation equation for quantifying the attenuation capacity was developed from the combined linear regression and weighted scaling methods based on the lab-scale experiments using various vadose zone soils having different physical and biogeochemical properties. The proposed semi-quantifying model is expected to effectively assess the attenuation capacity of vadose zone by identifying the main influencing factors as input parameters together with proper weights derived from the coefficients of the regression results. The subsequent scoring and grading system has great versatility while securing the objectivity by effectively incorporating the experimental results.

**Key words :** Attenuation capacity, Groundwater vulnerability assessment, Index method, Multiple linear regression analysis, Vadose zone

### 1. 서 론

주저자: 우희수, 박사후연구원

공저자: 안성남, 박사후연구원; 김기범, 상무이사; 박새롬, 전임연구원; 오성직, 박사과정; 김상현, 선임연구원

\*교신저자: 정재식, 선임연구원/교수; 이승학, 책임연구원/교수  
Email: jschung@kist.re.kr; seunglee@kist.re.kr

Received : 2022. 06. 23 Reviewed : 2022. 06. 27

Accepted : 2022. 07. 19 Discussion until : 2022. 08. 31

최근 지중공간 활용도가 높아지고 개발이 급증함에 따라, 지중환경오염 및 그로 인한 잠재적 위해성 평가, 특히, 주요 수자원인 지하수 오염취약성 판정을 위한 기술 필요성이 증가하고 있다. 지중환경 내 지하수의 오염취약성 판정기술은 미환경청(US EPA)에서 개발한 DRASTIC(Aller et al., 1987)을 시작으로, 평가인자 산정 방식이나 지역별 특성에 따라 GOD(Foster, 1987), SINTACS(Civita and

Maio, 1997) 등 다양한 형태로 발전되어 왔으며 국내외에서 해당 모델의 적용성 평가 연구가 활발히 진행된 바 있다(Jeong, 2018; Shukla et al., 2000; Simesek et al., 2008). 지중공간은 수분 포화도에 따라, 불포화대와 포화대(지하수대)로 나뉘며, 불포화대는 흡착, 산화·환원, 생분해 등 다양한 생지화학적 반응을 통해 오염물질의 포화대 전달 가능성을 저감시키는 확산 방지층의 역할을 담당한다(Troldborg et al., 2009; Yang et al., 2013). 따라서 합리적인 지하수 오염취약성 평가를 위해서는 불포화대의 오염물질별 자연저감능에 대한 필수적으로 포함되어야 하나 DRASTIC 등 기존 지하수 오염취약성 평가방법에는 영향인자의 범위별 지수 선정에 있어 객관성이 결여되거나, 불포화대 오염 저감능이 적절히 고려되지 않았다. DRASTIC이 고려하는 평가인자 중 하나인 I(Impact of vadose zone)는 불포화대가 지하수 오염에 미치는 영향을 고려하는 인자이나, 불포화대 내 오염물질 물리적 이동성에 초점이 맞추어져 있다. 불포화대에서 이동 중 혹은 잔류한 오염물질의 자연 저감은 지하수 오염취약성 평가에 중대한 영향을 줄 수 있는 인자임에도 평가방법의 고려 대상에서 배제되었다. 독일에서 개발한 GLA(Hoelting et al. 1995)는 불포화대를 직접적인 평가 대상으로 오염취약성을 판정하는 기술이나, 이 역시 불포화대 토양의 다양한 오염 저감능을 고려하고 있지 않다.

이에 본 연구에서는 지중환경 오염취약성 판정시 불포화대 오염 저감능을 합리적으로 반영할 수 있는 방안의 일환으로, 유류오염물질에 대한 불포화대 자연 저감능을 등급화할 수 있는 기법을 개발하여 제안하였다. 이를 위해, 다양한 불포화대 토양을 채취하여 실내 실험을 통해 유류오염물에 대한 자연 저감능을 평가하고, 다중회귀분석을 통해 저감능에 영향을 미칠 수 있는 불포화대 특성치를 선별하였다. 이를 바탕으로 특성치별 가중치를 도출하고, 각 특성치의 실제 분포범위를 점수화한 뒤, 가중치를 고려해 모든 특성치 점수를 중첩하여 임의 불포화대의 자연 저감능 등급을 산정하는 방식을 개발하였다.

## 2. 실험 및 분석방법

### 2.1. 토양시료 채취 및 특성 분석

불포화대의 다양한 특성을 반영하기 위해 서로 다른 물리적, 생화학적 특성을 보인 비오염 불포화대 토양을 수도권, 강원도, 충청도, 경상도 등에서 채취하였다. 채취한 토양을 실험실에서 풍건하였고, 2 mm 체(No. 10) 통과분을 실험에 사용하였다. 유기물 함량(Organic matter, OM),

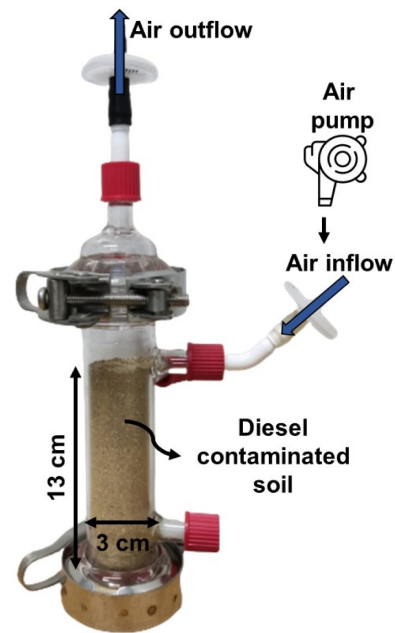


Fig. 1. Schematic diagram of a batch reactor for simulating diesel contamination in an unsaturated zone.

토성 등 다양한 토양 특성치는 공인분석기관에 의뢰하여 획득하였다. 물리적 특성치 중 토양수분특성곡선(Soil-water characteristic curve, SWCC)을 구성하는 van Genuchten 파라미터인  $n$ 은 각 시료의 모래(Sand), 미사(Silt), 점토(Clay) 함량을 바탕으로 RETC 프로그램(van Genuchten et al., 1991)을 이용해 계산하였다.

### 2.2. 유류오염물질에 대한 불포화대 자연저감능 평가

본 연구는 대표적 토양오염물질 중 하나인 경유를 대상으로 하였다. 불포화대 유류오염은, 채취한 개별 토양시료를 실험실에서 경유로 인위 오염시킨 후, 유리 반응기(Fig. 1)에 일정한 건조단위중량으로 채워 모사하였다. 고농도의 유류오염물질은 불포화대에서 자연저감되기도 하지만 비수용성액체(Non-aqueous phase liquids, NAPLs) 형태로 중력에 의해 하방 이동하므로 불포화대의 유류오염물질 저감 특성을 효과적으로 평가하기 위해서 적절한 농도 선정이 중요하다. 이에 경유 오염농도는 5,000 mg/kg으로, 건조단위중량은 1.5 g/cm<sup>3</sup>로 조정하였다. 본 연구에서는 오염토양의 풍화에 의한 특성변화 효과는 고려하지 않았다. 시간, 공간(주로 깊이)에 따른 수분 포화도(Saturation degree, SD)의 변화는 불포화대의 가장 큰 특징 중 하나이므로 경유의 인위 오염 작업 후, 증류수를 추가 주입해 일반적인 불포화대 수분 포화도인 35, 53, 71%로 오염토의 수분을 조절하였다(Ok et al., 2019). 60

일의 실험 동안 수분 포화도의 변화는 5% 내로 유지되었다. 모든 반응조건은 2회 반복 실험하였다. 그 외 영양분 및 유류 분해 미생물 추가 주입은 실시하지 않았다.

Fig. 1과 같이 유리 반응기를 내경 30 mm, 높이 146 mm 크기로 제작하였고 공기 순환이 존재하는 불포화대의 특징을 반영하기 위해 유리 반응기 상단에 공기 유·출입구를 설치하였다. 시간에 따라(10, 30, 60일) 토양 시료를 채취해 경유 농도를 분석하였고 2차 반응식(Eq. (1))에 대입해 경유 저감 속도 상수( $k$ )를 도출하였다(Koolivand et al., 2019; Nwankwegu et al., 2020).

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_0} + kt \quad (1)$$

여기서  $t$ 는 반응시간,  $C_t$ 는  $t$  시간 후 경유 농도,  $C_0$ 는 초기 경유 농도,  $k$ 는 2차 반응 상수이다.

토양에 잔류한 경유는 디클로로메탄(Dichloromethane, DCM)을 용매로 쓰는 회전교반 추출법(Park et al., 2011)으로 추출하였다. 먼저 약 5~6 g의 토양에 무수황산 나트륨 5 g을 섞어 수분을 제거한 후 유리 바이알(Vial)에 옮기고 20 mL DCM과 혼합하였다. 초음파 세척기로 5분간 시료가 담긴 유리 바이알에 초음파를 조사한 후, 2시간 동안 회전 교반하고 상등액을 채취해 분석하였다. 0.45  $\mu$ m 필터로 거른 상등액을 불꽃 이온화 검출기와 결합된 가스크로마토그래프(Gas chromatograph coupled with a flame ionization, GC-FID, Agilent Technologies 6890N)에 주입해 경유 농도를 측정하였다. GC-FID에 사용한 칼럼은 DB-5(30 m  $\times$  320  $\mu$ m  $\times$  0.5  $\mu$ m)이고 50°C(2분 유지)에서 8°C/min 속도로 320°C까지 올린 후, 20분간 유지하는 온도 조건을 사용하였다. 주입구(Injector)와 검출기(Detector) 온도는 모두 320°C로 유지하였다. 이동상으로 고순도(99.999%) 헬륨을 사용했고 칼럼 유량은 1 mL/min으로 설정하였다.

경유의 농도는 석유계총탄화수소(Total petroleum hydrocarbons, TPH) 기준으로 환산하였다. 경유 검량선 작성을 위해 DCM으로 희석한 경유 용액을 GC-FID로 분석하고 탄소번호 C8~27의 노말알칸(Normal alkanes) 영역 크로마토그램 면적값을 토양오염공정시험기준 TPH 정량법으로 구하였다. C8 및 C27 노말알칸의 머무름 시간(Retention time)을 구하기 위해 노말알칸 표준용액도 토양 추출 시료와 함께 분석하였다.

### 2.3. 데이터 정규화 및 다중회귀분석

토양 특성치와 수분 포화도(SD)를 독립변수로 하고 독

립변수의 복합적 작용이 경유 저감 속도 상수( $k$ )라는 종속변수에 미치는 영향을 평가하기 위한 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석 시 독립변수 간 상관관계가 높을 경우, 회귀분석에 오류가 발생하기 때문에 먼저 피어슨 상관분석을 통해 선형 상관관계를 가지는 인자 중 일부는 다중회귀분석 대상 독립변수에서 제외하였다. 다음으로 다중회귀분석 이후, 선정된 독립변수를 대상으로 분산 팽창 계수(Variation inflation factor, VIF)를 계산해 독립변수 간 다중공선성 문제가 발생하지 않는지 검토하였다. 또한, 다중회귀분석으로 도출한 주요 독립변수의 상대적 경유 저감 기여도를 알아보기 위해 Min-Max 정규화를 수행하였다(Jain et al., 2005). 단, 정규화한 독립변수를 균등하게 5등급으로 나누기 위해 Eq. (2)와 같이 각 독립변수가 0.5에서 5.5 사이의 값을 갖도록 정규화 범위를 조정하였다.

$$x_i = \left( \frac{x - \min}{\max - \min} \right) \times 5 + 0.5 \quad (2)$$

여기서  $x$ 는 각 독립변수의 데이터,  $\min$ 은 데이터 중 최소값,  $\max$ 는 데이터 중 최대값,  $x_i$ 는 조정된 독립변수 데이터이다. 본 연구에서는 Microsoft EXCEL 2016를 이용해 다중회귀분석을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양 특성치

불포화대 유류오염의 주요 저감 메커니즘인 휘발과 생분해는 유기물 함량(OM) 등 생화학적 특성뿐만 아니라 공극 크기 등 물리적 특성 및 수분 포화도 변화에 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다(An et al., 2022; Nishiwaki et al., 2011; Rivett et al., 2011). 이는 곧 불포화대 유류 저감에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하고 저감능을 예측하기 위해서는 불포화대의 다양한 특성치를 고려해야 한다는 것을 의미한다. 이에 본 연구에서는 생화학적 영향인자로 OM, 총질소(TN), 총인(TP), 총균수(TBN), 철(Fe) 함량을, 물리적 영향인자로 모래(Sand), 실트(Silt), 점토(Clay) 함량,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ , 균등계수(Coefficient of uniformity,  $C_u$ ),  $n$ 을 선정해 다양한 인자와 불포화대 유류 저감능과의 상관관계를 살펴보았다. 또한, 불포화 토양의 자연 저감능에 큰 영향을 미치는 수분 포화도 역시 주요 외부 요인으로 고려하였다(An et al., 2022).

본 연구에서 사용한 토양의 주요 생화학적 특성과 물리적 특성은 각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다.

**Table 1.** Major bio-chemical properties of soils used in this study

Sample	OM %	TN %	TP mg/kg	TBN CFU × 10 <sup>4</sup> /g	Fe %
Soil A	4.26	0.247	1599	112.9	2.83
Soil B	5.09	0.172	104	4.9	1.65
Soil C	3.49	0.124	134	26.2	1.65
Soil D	1.23	0.068	582	82.9	3.31
Soil E	0.24	0.014	113	3.8	2.25
Soil F	0.09	0.006	338	12.7	3.37
Soil G	0.56	0.027	247	35.3	2.87
Soil H	1.08	0.055	271	0.8	3.20
Soil I	2.46	0.164	889	33.2	2.80

**Table 2.** Major physical properties of soils used in this study

Sample	Sand %	Silt %	Clay %	D <sub>30</sub> mm	D <sub>60</sub> mm	C <sub>u</sub>	n	Soil texture
Soil A	70.0	19.2	10.8	0.068	0.200	100	1.423	Sandy loam
Soil B	81.0	6.5	12.5	0.200	0.680	436	1.610	Sandy loam
Soil C	73.7	14.5	11.8	0.053	0.400	250	1.454	Sandy loam
Soil D	91.0	2.3	6.7	0.330	0.775	32	2.527	Sand
Soil E	80.6	9.6	9.8	0.180	0.607	303	1.643	Loamy sand
Soil F	79.7	12.8	7.5	0.130	0.477	159	1.654	Loamy sand
Soil G	71.6	14.6	13.8	0.048	0.465	465	1.416	Sandy loam
Soil H	23.6	40.6	35.8	0.001	0.014	54	1.420	Clay loam
Soil I	90.0	6.0	4.0	0.110	0.500	100	2.571	Sand

본 연구에 사용한 9개 토양의 생화학적 특성치는 Fe를 제외하고 최댓값이 최솟값의 10배 이상 클 정도로 넓은 범위에 걸쳐 분포함을 확인하였다. 토성(Soil texture) 역시 Sand, Loamy sand, Sandy loam, Clay loam 등 국내 불포화대에서 흔하게 관찰되는 다양한 토성을 아우르고 있어 불포화대 유류오염 저감능을 평가하기에 적절한 대표성을 가지는 것으로 판단하였다.

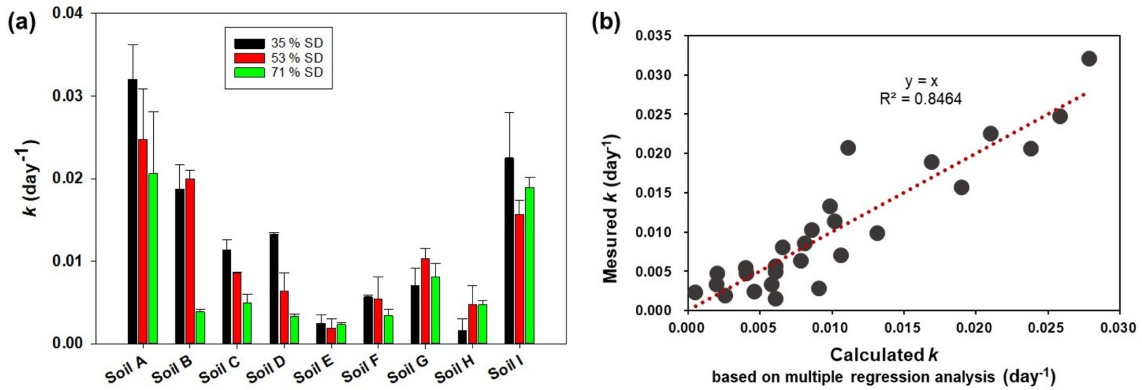
### 3.2. 불포화대 토양별 유류 저감 속도 상수와 토양 특성치 관계

불포화대 자연저감능의 정량적 비교를 위해 도입한 경유 저감 속도 상수는 토양의 특성에 따라 상이하였고, 동일한 토양에서도 수분 포화도에 따라 변하였다(Fig. 2(a)). 수분 포화도에 상관없이 Soil A, I 시료의 저감 상수가 다른 토양보다 높았는데 이는 두 토양의 OM, TN, TP 함량이 높아 미생물 활성이 높고, 생분해가 활발하게 일어나 나타난 결과로 보인다. 이와는 반대로 Soil E, F, H 시료의 낮은 경유 저감 상수는 낮은 OM, TN, TP, TBN과 낮은 미생물 활성으로 인한 결과로 볼 수 있다. 불포화대 경유 저감의 주요 메커니즘은 생분해로 볼 수

있고 이러한 결과는 An et al.(2022)의 연구에서도 확인할 수 있다.

토양 시료별 최대 저감 상수를 나타내는 최적 수분 포화도는 서로 상이하였다(Fig. 2(a)). Soil A, C, D, I 시료에서는 수분 포화도 35%에서 최고 저감 상수가 관찰되었으나, Soil B, G 시료에서는 수분 포화도 53%로 확인되었다. 이는 수분 포화도 증감에 따라 경유 휘발과 호기성 생분해에 영향을 미치는 기체 투과도 및 전자 공여체 혹은 수용체의 생물학적 이용성이 변할 수 있기 때문인데 경유를 포함한 유류 오염물질의 생분해를 연구한 여러 문헌(Saadoun and Al-Ghzawi, 2005; Bossert and Bartha, 1984)에서 자연 저감에 최적인 수분 포화도 범위를 10~80%로 다양하고 보고하고 있는 만큼, 경유 저감 예측에 수분 포화도를 고려하는 것이 필수적임을 보여준다.

독립변수의 여러 조합을 통한 반복적인 다중회귀분석으로 불포화대의 경유 저감 상수를 예측할 수 있는 최적 선형회귀식을 도출하였다. 피어슨 상관분석을 통해 OM과 TN, Sand와 Silt 및 Clay 함량 사이의 높은 상관관계(상관계수 0.9 이상)를 확인해 다중회귀분석 시 TN과 Sand, Silt 함량은 독립변수로 사용하지 않았다. 나머지 독립변



**Fig. 2.** (a) Attenuation rate constants of diesel in various soils under different saturation degrees and (b) measured  $k$  vs. calculated  $k$  based on multiple regression analysis using lab.-scale diesel removal experiments.

수의 조합을 통한 다중회귀분석 결과에서 결정계수가 높고 각 독립변수가 95% 신뢰도를 가지는 유의수준을 만족하는 경우의 선형회귀식을 선별하였다. 그 결과, OM, TP,  $C_u$ ,  $D_{30}$ , n, 수분 포화도(SD)가 조합된 선형회귀(결정계수 0.85)식으로 토양 특성치와 경유 저감 상수와의 관계를 설명할 수 있었다(Fig. 2(b), Eq. (3)).

$$k \text{ (day}^{-1}\text{)} = 0.001467 \cdot \text{OM} + 0.003962 \cdot \text{TP} - 0.0012 \cdot \text{D}_{30} + 0.001363 \cdot \text{C}_u + 0.001198 \cdot \text{n} - 0.00082 \cdot \text{SD} - 0.00092 \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 예측 경유 저감 속도 상수이고 OM, TP,  $D_{30}$ ,  $C_u$ , n, SD는 각각 Eq. (2)를 통해 정규화한 토양 특성치를 의미한다.

다중회귀분석 결과, 6개의 특성치 중  $D_{30}$ 을 제외한 5개의 특성치는 95% 신뢰도를 가지는 유의수준( $P < 0.05$ )을 만족하였다.  $D_{30}$ 의 P-값은 0.09로 다소 높으나, 입자의 크기를 직접적으로 반영하는 물리적 특성 인자이므로 최적 선형회귀식에서 제외하지 않았다. 또한, 인자별 VIF 값은 최대 2.3으로 다중공선성 문제가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 선형회귀식의 인자 중, OM과 TP는 토양의 생화학적 특성을 대표한다고 볼 수 있고,  $D_{30}$ ,  $C_u$ , n은 토양의 물리적 특성을 반영하는 인자로 볼 수 있다. 위에서 언급했듯이 수분 포화도 역시 경유 저감에 영향을 미치는 주요 인자로 선별되었다. 생화학적 특성치뿐만 아니라 물리적 특성과 강우 등 외부 조건과 연동돼 변화하는 수분 포화도를 모두 고려할 때 높은 결정계수를 보이는 선형회귀식을 얻을 수 있었다.

**3.3. 불포화대 유류 저감능 평가지수**

다중회귀분석으로 도출한 불포화대 경유 저감 예측 선형회귀식은 Eq. (4)와 같이 정리할 수 있다(Fig. 2(b), Eq.

(3) 참조).

$$\text{불포화대 경유 저감 속도 상수}(k) = C_1 \times \text{OM} + C_2 \times \text{TP} + C_3 \times \text{D}_{30} + C_4 \times \text{C}_u + C_5 \times \text{n} + C_6 \times \text{SD} + \text{절편} \quad (4)$$

여기서  $C_1 \sim C_6$ 는 다중회귀분석에서 도출한 독립변수별 계수이다. 다만, 위의 식을 통해 획득한 속도상수는 제한된 실험조건에서 도출된 것으로, 그 절대값이 직접적인 의미를 가진다기보다는 동일 조건에서 평가된 타 불포화대 저감능과의 상대적 비교평가에 활용됨이 타당하다. 이에 본 연구에서는 DRASTIC과 같은 지수-중첩 방식(Index overlapping method)을 적용하여 반정량적 평가기법을 마련하였다.

지수-중첩 방법을 이용한 오염취약성 평가는 다양한 특성 인자에 가중치와 특성 인자의 범위에 따라 부여한 점수를 곱하고 이를 모두 합해 상대적으로 비교하는 과정을 포함한다(Kim, 2008). 이러한 계산 방식은 Eq. (4)처럼 다중회귀분석으로 얻은 선형회귀식의 구조와 유사하다. 인자별 계수를 지수-중첩 방법의 가중치로 사용하고 부여된 점수를 토양 특성치로 생각하면 선형회귀식의 형태와 동일해진다. 본 연구에서 제안하는 방식은 예측치와 계산치에 근거하는 일반적인 지수-중첩 방법에, 실험을 통해 획득한 자료를 바탕으로 한 선형회귀식의 신뢰성을 추가한 방법으로 볼 수 있다.

Fig. 3과 같이, 실험에 사용된 모든 토양 특성치를 0.5에서 5.5의 값으로 정규화(normalize)하고 이를 균등하게 5등급으로 배분해 점수 체계화하였다. 이후, 다중회귀분석을 수행해 인자별 계수를 획득한 뒤 이를 지수 방법의 가중치로 적용하였다. 계산의 편의를 위해 OM의 계수 값을 기준으로 나머지 인자의 계수를 정규화해 가중치를 조

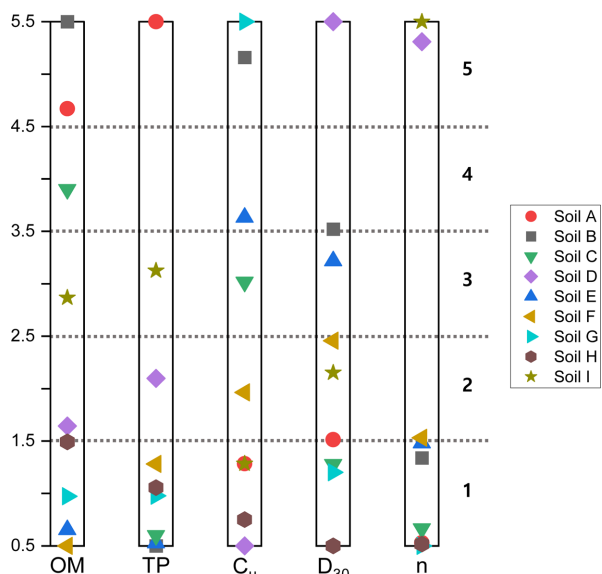


Fig. 3. 5-level grading of different soil properties after data scaling.

Table 3. Coefficients and weights for selected diesel removal impact factors in vadose zone from multiple regression analysis with normalized scale

Factor	Coefficient	Weight
OM	0.001467	1
TP	0.003962	2.70
D <sub>30</sub>	-0.0012	-0.82
C <sub>u</sub>	0.001363	0.93
n	0.001198	0.82
SD	-0.00082	-0.56

정하였다(Table 3). 인자별 등급 및 점수는 Table 4와 같다. 따라서 Eq. (4)는 Eq. (5)와 같은 지수-중첩 방식 평가식으로 수정할 수 있다.

$$\text{불포화대 경유 저감능} = \text{OM}_R + 2.70 \times \text{TP}_R - 0.82 \times \text{D}_{30R} + 0.93 \times \text{C}_{uR} + 0.82 \times \text{n}_R - 0.56 \times \text{SD}_R \quad (5)$$

여기서  $\text{OM}_R$ ,  $\text{TP}_R$ ,  $\text{D}_{30R}$ ,  $\text{C}_{uR}$ ,  $\text{n}_R$ ,  $\text{SD}_R$ 은 각각 인자별 등급에 따른 점수(1~5)를 의미한다. 본 연구에서 사용된

Table 4. Soil property rating ranges by influencing factors for diesel removal capability of vadose zone

Rating	OM %	TP mg/kg	D <sub>30</sub> mm	C <sub>u</sub>	n	SD %
1	0.09 ~ 1.09	104 ~ 403	0.00 ~ 0.07	32 ~ 83	1.4 ~ 1.6	35 ~ 42
2	1.09 ~ 2.09	403 ~ 702	0.07 ~ 0.13	83 ~ 170	1.6 ~ 1.9	42 ~ 49
3	2.09 ~ 3.09	702 ~ 1001	0.13 ~ 0.20	170 ~ 256	1.9 ~ 2.1	49 ~ 57
4	3.09 ~ 4.09	1001 ~ 1300	0.20 ~ 0.26	256 ~ 343	2.1 ~ 2.3	57 ~ 64
5	4.09 ~ 5.09	1300 ~ 1599	0.26 ~ 0.33	343 ~ 465	2.3 ~ 2.6	64 ~ 71

토양 시료의 경우, 불포화대 경유 저감능은 수분 포화도 35%의 덩소 토양이 19.80점으로 가장 높았고 수분 포화도 71%의 맹동 토양이 2.76점으로 가장 낮았다. DRASTIC의 경우와 마찬가지로 본 연구에서 제시하는 불포화대 경유 저감능 산정식을 통한 경유 저감능은 둘 이상의 불포화대 토양의 저감능을 상대적으로 비교할 때 유용하게 사용할 수 있고 지하수 오염취약성 판정 시 불포화대의 영향을 고려하기 위한 새로운 평가 방식으로 사용될 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실내 실험 결과와 다중회귀분석을 기반으로 지수-중첩 방식의 불포화대 경유 저감능 평가기법을 제안하였다. 본 연구의 평가기법은 다중회귀분석에서 얻은 선형회귀식에 지수-중첩 방법에서 사용하는 등급화 및 점수화 방식을 도입해 평가의 편의성을 확보하였고, 실제 실내실험을 통해 확보한 데이터를 활용함으로써 기존 모델 대비 높은 신뢰도를 가진 기법으로 평가된다. 또한 해당 점수를 보이는 토양에 대한 정성적인 평가(예, 유류 자연저감 효율이 높은 지역, 비교적 높은 지역, 보통지역 등)가 합쳐진 자료가 축적될 경우, 임의 불포화대의 유류오염물 자연저감능을 등급화하는 모델로 확장될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지중환경오염 위해관리기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(2018002440006, 2020002440002).

#### References

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hacket, G., 1987, DRASTIC: a standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, USEPA, 455.

- An, S., Kim, K., Woo, H., Yun, S.T., Chung, J., and Lee, S., 2022, Coupled effect of porous network and water content on the natural attenuation of diesel in unsaturated soils, *Chemosphere*, **302**, 134804.
- Bossert, I. and Bartha, R., 1984, The fate of petroleum in soil ecosystems.
- Civita, M. and De Maio, M., 1997, Assessing groundwater contamination risk using Arc/Info via GRID function, *Proceedings of ESRI Conference*, 8-11.
- Foster, S.S.D., 1987, Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy, In Duijvenboden, W.V. and Waageningh H.G.V. (Eds.), *Vulnerability of Soils and Groundwater to Pollution, Proceedings and information of the TNO Committee on Hydrogeological Research, The Hague*, **38**, 69-86.
- Holting, B., Haertle, T., Hohberger, K.H., Nachtigall, K. H., Villingner, E., Weinzierl, W., and Wrobel, J.P., 1995, Concept for the determination of the protective effectiveness of the cover above the groundwater against pollution, *Ad-hoc Working Group on Hydrology, Hannover, Germany*, 5-24.
- Jain, A., Nandakumar, K., and Ross, A., 2005, Score normalization in multimodal biometric systems, *Pattern Recognition*, **38**(12), 2270-2285.
- Jeong, G.C., 2018, Assessment of groundwater contamination vulnerability by geological characteristics of unsaturated zone, *The Journal of Engineering Geology*, **31**, 727-740.
- Kim, G.B., 2008, Consideration of trends and applications of groundwater vulnerability assessment methods in South Korea, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, **13**(6), 1-16.
- Koolivand, A., Abtahi, H., Parhamfar, M., Didehdar, M., Saeedi, R., and Fahimirad, S., 2019, Biodegradation of high concentrations of petroleum compounds by using indigenous bacteria isolated from petroleum hydrocarbons-rich sludge: Effective scale-up from liquid medium to composting process, *Journal of Environmental Management*, **248**, 109228.
- Nishiwaki, J., Kawabe, Y., Sakamoto, Y., Komai, T., and Zhang, M., 2011, Volatilization properties of gasoline components in soils, *Environ. Earth Sci.*, **63**(1), 87-95.
- Nwankwegu, A.S., Li, Y., Jiang, L., Lai, Q., Shenglin, W., Jin, W., and Acharya, K., 2020, Kinetic modelling of total petroleum hydrocarbon in spent lubricating petroleum oil impacted soil under different treatments, *Environmental Technology*, **41**(3), 339-348.
- Ok, J., Kim, D., Han, H., Jung, K., Lee, K., Zhang, Y., Cho, H., and Seon-ah Hwang. S., 2019, Relationship between measured and predicted soil water content using Soil Moisture Monitoring Network, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **21**(4), 297-306.
- Rivett, M.O., Wealthall, G.P., Dearden, R.A., and McAlary, T.A., 2011, Review of unsaturated-zone transport and attenuation of volatile organic compound (VOC) plumes leached from shallow source zones, *J. Contam. Hydrol.*, **123**(3-4), 130-156.
- Saadoun, I.M. and Al-Ghzawi, Z.D., 2005, Bioremediation of petroleum contamination, *Biorem Aquat Terr Ecosyst*, **132**, 173-212.
- Shukla, S., Mostaghimi, S., Shanholt, V.O., Collins, M.C., and Ross, B.B., 2000, A county-level assessment of ground water contamination by pesticides, *Ground Water Mon. R.*, **20**(1), 104-119.
- Simsek, C., Gemici, U., and Filiz, S., 2008, An assessment of surficial aquifer vulnerability and groundwater pollution from a hazardous landfill site, Torbali/Turkey, *Geosci. J.*, **12**(1), 69-82.
- Troldborg, M., Binning, P.J., Nielsen, S., Kjeldsen, P., and Christensen, A.G., 2009, Unsaturated zone leaching models for assessing risk to groundwater of contaminated sites, *Journal of Contaminant Hydrology*, **105**(1-2), 28-37.
- Van Genuchten, M.T., Leij, F.J., and Yates, S.R., 1991, The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Yang, M., Yang, Y.S., Du, X., Cao, Y., and Lei, Y., 2013, Fate and Transport of Petroleum Hydrocarbons in Vadose Zone: Compound-specific Natural Attenuation, *Water, Air, & Soil Pollution*, **224**(3), 1-14.