

본 국문 요약 보고서는 한국환경정책·평가연구원에서 발간하는 영문 연구보고서의 폭넓은 확산과 이해증진을 위해 발간되고 있습니다.

# 토양 및 지하수환경기준의 연계 강화 방안

황상일 | 이정호 | 유가영 | 김훈미

연구진

연구책임자 황상일 (한국환경정책·평가연구원 책임연구원)  
참여연구원 이정호 (한국환경정책·평가연구원 책임연구원)  
유가영 (한국환경정책·평가연구원 책임연구원)  
김훈미 (한국환경정책·평가연구원 연구원)

© 2006 한국환경정책·평가연구원

---

**발행인** 윤서성  
**발행처** 한국환경정책·평가연구원  
서울특별시 은평구 불광동 613-2 (우편번호) 122-706  
전화 380-7777 팩스 380-7799  
<http://www.kei.re.kr>  
**인쇄** 2006년 12월  
**발행** 2006년 12월  
**출판등록** 제17-254호  
**ISBN** 978-89-8464-239-3 93530

---

# | 차례 |

<b>제1장 서론</b> .....	1
1. 연구배경 .....	1
2. 연구목적 .....	1
3. 연구범위 .....	2
4. 연구방법 .....	2
<b>제2장 기존 연계방법</b> .....	4
1. 우리나라 .....	4
2. 미국 .....	4
3. 일본 .....	5
4. 네덜란드 .....	5
5. 독일 .....	5
6. 종합 및 시사점 .....	6
<b>제3장 연계성 검증</b> .....	7
1. 토양선별지침 .....	7
2. Soil Screening Levels(SSLs) 산정 .....	9

3. 민감도분석 .....	12
4. 수치모델링을 통한 희석-감쇄인자(DAF) 불확실성분석 .....	16
<b>제4장 결론</b> .....	<b>21</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>23</b>
<b>영문 Contents</b> .....	<b>25</b>

# | 제1장 · 서론 |

## 1. 연구배경

- 토양과 지하수는 수리수문학적으로 상호 연결되어 있어 토양이 오염되면 지하수도 함께 오염된다. 특히 우리나라의 경우 지하수위가 지표면에 가까워 토양내 오염물질이 빠르게 지하수로 이동한다. 또한 오염지하수는 지하수 흐름 하류방향의 깨끗한 토양을 오염시켜 시간이 지남에 따라 토양지하수계를 통해 오염면적이 점차 증가하는 경향이 나타난다.
- 토양 및 지하수환경(정화)기준을 설정할 때 이러한 토양지하수 동시오염현상을 고려하지 않는다면 토양지하수오염을 효과적으로 관리하기 힘들 것이다. 우리나라의 경우 토양 및 지하수환경기준(먹는물수질기준 포함)상의 오염물질 항목이 상이하고, 각 기준 설정시 토양지하수 동시오염현상을 고려하지 않았다.

## 2. 연구목적

- 본 연구에서는 우리나라 토양 및 지하수환경기준의 연계를 강화하기 위한 구체적인 방법론을 제시하고자 한다. 이를 위해 미국과 네덜란드 등에서 사용한 위해성기반 방법론, 즉 토양선별지침(Soil Screening Guidance, SSG)를 적용하였다.

### 3. 연구범위

- 연구범위는 우리나라 토양 및 지하수환경기준 현황, 선진외국의 토양 및 지하수 환경기준 설정 방법론, 우리나라 토양 및 지하수환경기준의 연계성 검증 (coherence test) 및 우리나라에서의 연계강화 방법론 도출 등이다.
- 세부적인 연구범위는 다음과 같다.
  - 우리나라 토양 및 지하수환경기준 현황 : 현 기준의 설정과정, 기준사이의 규제 오염물질 항목 불일치성 검토 등
  - 선진외국의 토양 및 지하수환경기준 설정 방법론
  - 우리나라 토양 및 지하수환경기준의 연계성 검증 : 연계성 검증을 위한 이론적 배경 검토 및 연계성 검증 실시 등
  - 우리나라에서의 연계강화 방법론 도출 : 상기한 연계성 검증과정으로부터 SSG 방법론 적용을 위한 구체적인 방법론 제안

### 4. 연구방법

- 구체적인 연구방법은 다음과 같다.
  - 우리나라 토양 및 지하수환경기준 현황 : 문헌조사 및 설정과정에 참여한 전문가로부터의 자문 등
  - 선진외국의 토양 및 지하수환경기준 설정 방법론 : 미국환경청(US EPA)의 SSG, 미국 주정부(워싱턴주, 텍사스주), 네덜란드, 독일, 일본 등에서의 설정 방법론을 문헌조사를 통해 검토
  - 우리나라 토양 및 지하수환경기준의 연계성 검증 : SSG 방법론을 이용하여 연계성 검증을 실시하고, 민감도분석, 불확실성분석 등을 통해 SSG 방법론의 우리나라 적용타당성을 검토

-우리나라에서의 연계강화 방법론 도출 : 상기한 연계성 검증과정으로부터 구체적인 방법론 검토

## | 제2장 · 기존 연계방법 |

### 1. 우리나라

- 토양 및 지하수환경기준(먹는물수질기준 포함) 설정시, 동시오염가능성 등을 고려하지 않았고 각각의 기준을 해당 분야의 전문가 판단 등으로 결정하여 그 연계성이 부족하였다.
- 토양, 먹는물수질기준, 지하수환경기준 항목이 일치하지 않았다. 기준 각각의 설정 목적이 다르다 할지라도, 유해화합물 항목 등이 일치되지 않아 이들 오염물질(들)로 인한 토양지하수 동시오염현상을 고려하지 않았다.
- 토양정화기준은 토양오염우려기준으로, 지하수정화기준은 생활용수기준으로 고정되어 있어, 오염토양 및 오염지하수가 각각 정화기준 이하로 정화되었다 할지라도 토양내 잔존 오염물질이 지하수를 다시 오염시켜 지하수정화기준 이하로 재차 정화하여야 하는 문제점이 발생할 가능성이 있다. 또한 음용지하수가 오염되어 생활용수기준이하로 정화되었다 하더라도 음용으로 다시 직접 이용하기는 불가능하게 될 것이다.

### 2. 미국

- 연방차원에서는 토양 및 지하수환경기준을 설정하고 있지 않았으나, 먹는물수질기준이 지하수오염 보호 및 정화부문에서 중요한 준거치를 제공하고 있었다. 또한 미국환경청은 각 주정부가 기준설정시 이용할 수 있도록 몇몇 가이드라인들(SSG 등)을 제공하고 있었다.
- 주정부 차원에서는 각 주의 특성을 고려하여 토양 및 지하수환경(정화)기준

설정 방법론을 구축하고 있었고, 특히 정화기준 설정시 토양-지하수 동시오염현상을 고려하고 있었다.

### 3. 일본

- 토양환경기준과 (지하)수질기준은 밀접한 관련이 있었다. 토양환경기준은 (지하)수질기준치를 기반으로 설정되어 있었다.
- 토양 및 지하수정화기준은 각각의 환경기준과 동일하게 설정되어 있었다.
- 지하수를 포함한 모든 수체(담수, 해수 등)에 대해 동일한 수질기준을 적용하고 있었다.

### 4. 네덜란드

- 토양 및 지하수 target values 설정시, 각각 위해성평가를 실시하여 독립적으로 설정하였다.
- 토양 및 지하수 intervention values 설정시, 미국환경청의 SSG방법론을 이용하여 연계성을 추구하였으나 미국과는 다르게 토양 intervention value를 만족시키는 범위에서 지하수 intervention value를 산정하였다(미국의 경우, 지하수질이 주로 먹는물수질기준 이하가 되도록 토양선별기준(Soil Screening Levels, SSLs)을 설정한다).

### 5. 독일

- 토양환경기준 설정시 토양-지하수 노출경로(exposure pathway)를 고려하고 있었고, 특히 독일연방보호법에서는 토양오염으로부터 지하수를 보호하기 위하여 토양-지하수 노출경로를 고려하고 있다고 언급하고 있다.

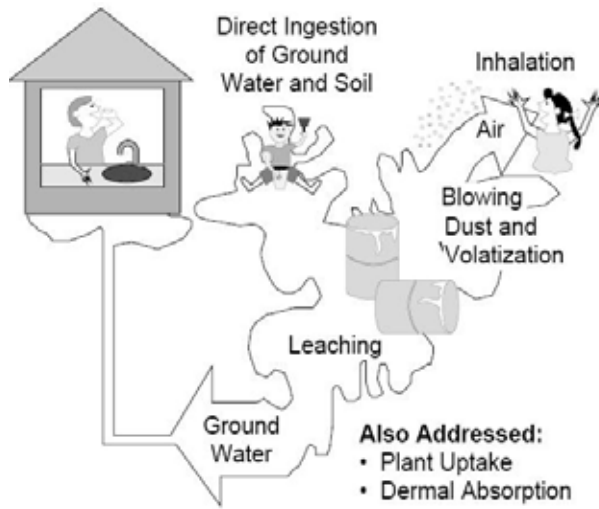
## 6. 종합 및 시사점

- 조사대상국가 대부분은 토양환경기준 설정시 위해성평가 방법론을 이용하고 있었고, 지하수환경기준과는 연계성이 크지 않았다. 또한 지하수관리의 주된 목표로 먹는물수질기준을 채택하고 있었다.
- 또한 조사대상국가들은 주로 지하수를 보호하기 위하여 토양정화기준을 설정하고 있어, 토양지하수동시오염 현상을 고려하고 있었다.

## | 제3장 · 연계성 검증 |

### 1. 토양선별지침(SSG)

- SSG는 미국환경청에서 개발한 지침인데, 이를 활용하면 국가정화우선순위(National Priority List, NPL)에 등재된 오염부지의 오염토양 평가 및 정화를 빠른 시일 내에 해결하고 그 과정을 표준화할 수 있다.
- 본 지침은 NPL부지내에 정밀조사가 필요한 지역이 있는지를 파악하기 위해, 위해성 기반 토양선별기준(SSLs)을 계산할 수 있는 간단한 단계별 방법론을 제공한다.
- 토양선별기준은 위해성에 기반을 둔 농도값을 말하는데, 이는 노출정보 및 독성자료를 이용한 표준화된 공식을 이용하여 계산한다.
- 토양내 오염물질에 대한 잠재적 노출경로는 <그림 3-1>과 같고, 본 연구에서는 토양 및 지하수환경기준의 연계성을 살펴보는 것이므로 토양-지하수노출경로만을 다루도록 한다.
- 본 연구에서의 토양선별기준은 지하수환경(정화)기준을 만족시키기 위한 토양환경(정화)기준으로 가정한다.



〈그림 3-1〉 Exposure pathways addressed by SSLs

- 토양선별기준은 다음의 식으로 계산한다.

-무기오염물질이 대상인 경우

$$SSL = DAF \cdot C_{rp} \left( K_d + \frac{\theta_w + \theta_a H}{\rho_b} \right)$$

-유기오염물질이 대상인 경우

$$SSL = DAF \cdot C_{rp} \left( K_{oc} f_{oc} + \frac{\theta_w + \theta_a H}{\rho_b} \right)$$

여기에서, SSL은 대상오염물질의 토양선별기준, DAF는 희석-감쇄인자,  $C_{rp}$ 는 수용지점(receptor point)에서의 지하수농도(예를 들면, 지하수환경(정화)기준 또는 먹는물수질기준 등),  $K_d$ 는 토양분배계수,  $K_{oc}$ 는 유기탄소 분배계수,  $f_{oc}$ 는 유기탄소함량,  $\theta_w$ 는 토양내 수분함량,  $\theta_a$ 는 토양내 공기함량, H'는 무차원 헨리상수,  $\rho_b$ 는 토양용적밀도이다.

## 2. Soil Screening Levels(SSLs) 산정

- 토양-지하수노출경로의 SSLs를 계산하기 위한 우리나라 토양관련 입력자료는 다음과 같다.

〈표 3-1〉 Soil related parameters for calculating SSLs

Parameter	Default	
	USA	Korea
Dry soil bulk density ( $\rho_b$ )	1.5 kg/L	1.32 ± 0.17 kg/L
Soil porosity <sup>1)</sup>	0.43	0.50 ± 0.06
Volumetric soil water content ( $\theta_w$ )	0.30	0.35
Volumetric soil air content ( $\theta_a$ )	0.13	0.15
Soil organic carbon content ( $f_{oc}$ )	0.002 (0.2%)	0.01 (1%) ± 0.014
Soil pH	6.8	5.8 ± 0.9

1) Soil porosity was calculated using the equation,  $1-(\rho_b/2.65)$

- 토양-지하수노출경로의 SSLs를 계산하기 위한 오염물질관련 입력자료는 다음과 같다.

〈표 3-2〉 Chemical-specific parameter values for calculating SSLs

		$K_{oc}$ (L/kg)	$H'$ (-)	$K_d$ (at pH = 5.8) (L/kg)
Cadmium				33
Arsenic				27
Mercury			$4.67 \times 10^{-1}$	1.6
Chromium (VI)				25
Zinc				32
Cyanide				9.9
Phenol		28.8	<b>Contaminants</b>	
BTEX	Benzene	58.9	$2.28 \times 10^{-1}$	
	Toluene	182	$2.72 \times 10^{-1}$	
	Ethylbenzene	363	$3.23 \times 10^{-1}$	
	Xylene	386	$2.76 \times 10^{-1}$	
TCE		166	$4.22 \times 10^{-1}$	
PCE		155	$7.54 \times 10^{-1}$	

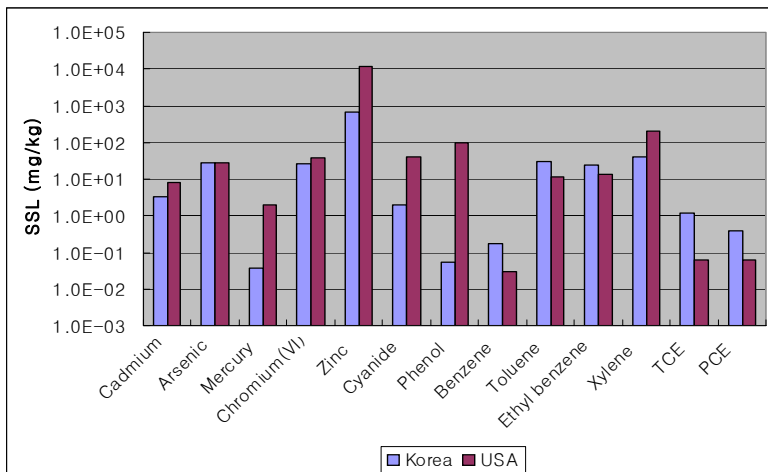
Ref) USEPA, 1996, Soil screening guidance: Technical background document, EPA/540/R95/128.

- DAF를 20으로 가정했을 경우 우리나라에서의 오염물질별 SSLs는 다음과 같다.

〈표 3-3〉 Soil screening levels when DAF = 20 in Korea

Contaminants	For drinking water standards (mg/kg)	For groundwater quality standards (mg/kg)			Soil contamination potential level (mg/kg)	
		Domestic	Agricultural	Industrial	Residential	Industrial
Cadmium	3.3	6.7	6.7	13.3	1.5	12
Arsenic	27.3	27.3	27.3	54.5	6	20
Mercury	0.04	-	-	-	4	16
Chromium(VI)	25.3	25.3	25.3	50.5	4	12
Zinc	645.3	-	-	-	300	800
Cyanide	2.0	-	-	40.7	2	120
Phenol	0.06	0.06	0.06	0.11	4	20
BTEX	Benzene	0.2	0.3	-	-	-
	Toluene	29.6	42.3	-	-	-
	Ethyl benzene	23.6	35.4	-	-	80
	Xylene	41.6	62.3	-	-	-
	Total	95.0	140.3	-	-	-
TCE	1.2	1.2	1.2	2.4	8	40
PCE	0.4	0.4	0.4	0.8	4	24

- 수은과 시안을 제외한 대부분의 무기오염물질(카드뮴, 비소, 6가크롬, 아연 등)은 주거지에 적용되는 토양오염우려기준보다 더 큰 SSLs를 나타내었다. 따라서 토양-지하수노출경로만을 고려한다면 해당오염물질의 주거지 대상 토양오염우려기준을 좀 더 완화할 수 있을 것으로 판단된다.
- 페놀, TCE, PCE와 같은 유기오염물질의 경우, 주거지 대상 토양오염우려기준보다 SSL값이 상당히 낮아 해당오염물질의 토양오염우려기준을 좀 더 강화할 필요가 있다고 판단된다.
- 또한 BTEX의 경우 토양오염우려기준이 80 mg/kg이나, 95 mg/kg까지 완화할 수 있을 것으로 판단된다.
- 상기한 결과는 DAF를 20으로 가정한 결과이지만, 우리나라를 대표할 수 있는 DAF를 산정하는 경우 좀 더 현실적인 SSLs를 구할 수 있을 것이다.
- DAF를 20으로 가정하였을 경우, 지하수질이 먹는물수질기준을 만족하기 위한 우리나라와 미국의 SSLs의 비교는 다음과 같다.



〈그림 3-2〉 SSLs for Korea and the USA at DAF=20

–무기오염물질의 경우, 미국의 SSLs가 우리나라 수치보다 상대적으로 크게 나타났다. 이와는 반대로 페놀과 자일렌을 제외한 대부분의 유기오염물질의 경우, 우리나라의 SSLs가 미국의 수치보다 높게 나타났다.

### 3. 민감도분석

- SSLs에 대한 입력변수의 영향을 파악하기 위하여 민감도분석을 실시하였다. 분석대상오염물질로 무기오염물질인 카드뮴과 비소를, 유기오염물질인 페놀, 벤젠 및 TCE 등 총 5개의 오염물질을 선정하였다.
- 토양관련 입력변수들의 값의 범위는 다음과 같다.

〈표 3-4〉 Ranges of soil parameters and DAF for sensitivity analysis of the SSL equation

Input parameters	Minimum	Default	Maximum
Dilution-Attenuation Factor (DAF)	1	10	20
Fraction organic carbon ( $f_{oc}$ , g/g)	0.001	0.01	0.129
Dry bulk density ( $\rho_b$ , kg/L)	1.15 <sup>a</sup>	1.32	1.49 <sup>b</sup>
Volumetric water content ( $\theta_w$ , L/L)	0.01	0.35	0.50

<sup>a</sup> soil porosity = 0.57,  $\theta_a$  = 0.22

<sup>b</sup> soil porosity = 0.44,  $\theta_a$  = 0.09

- 다음과 같은 민감도계수 공식을 이용하여 민감도분석을 실시하였다.

$$SC_{ij} = \frac{(\Delta SSL_i / SSL_d)}{(\Delta \beta_j / \beta_d)} = \frac{B}{A}$$

여기에서,  $\beta_d$ 는 입력변수  $j$ 의 default값,  $\Delta \beta_j$ 는 입력변수  $j$ 의 default값으로부터의 차(difference),  $SSL_d$ 는 default값이 모든 입력변수에 적용되었을 경우의 SSL,  $\Delta SSL_i$ 는 입력변수  $j$ 의 새로운 값( $\beta_d \pm \Delta \beta_j$ )으로부터 계산된 SSL과  $SSL_d$ 의 차이이다.

- 민감도분석결과는 다음과 같다.

-SSLs는 오염물질에 상관없이 DAF에 가장 민감한 것으로 나타났고, 민감도 계수는 1로 나타났다.

-무기오염물질(카드뮴, 비소)의 경우, SSLs에 대한 토양용적밀도와 수분용적합량의 영향은 미미한 것으로 나타났다.

-유기오염물질의 경우, SSLs는 거의 모든 입력변수에 어느 정도 민감하게 영향을 받고 있었다. 특히 유기탄소함량이 SSLs에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 페놀의 경우 그 영향이 작았다.

〈표 3-5〉 Results of sensitivity analysis of the SSL equation

(a) Calculation

	A (%)	SSL (mg/kg)					B (%)					
		Cadmium	Arsenic	Phenol	Benzene	TCE	Cadmium	Arsenic	Phenol	Benzene	TCE	
<b>DAF</b>												
1	-90	0.3	1.4	0.003	0.013	0.1	-90	-90	-90	-90	-90	-90
10	0	3.3	13.6	0.028	0.132	0.6	0	0	0	0	0	0
20	100	6.7	27.3	0.055	0.264	1.2	100	100	100	100	100	100
<b><math>f_{sc}</math></b>												
0.001	-90	-	-	0.015	0.052	0.1	-	-	-47	-60	-76	-76
0.01	0	-	-	0.028	0.132	0.6	-	-	0	0	0	0
0.129	1190	-	-	0.199	1.183	6.5	-	-	620	796	1001	1001
<b><math>\rho_b</math></b>												
1.15	-13	3.33	13.65	0.030	0.140	0.61	0.1	0.1	7	6	4	4
1.32	0	3.33	13.63	0.028	0.132	0.59	0.0	0.0	0	0	0	0
1.49	13	3.32	13.62	0.026	0.126	0.58	-0.1	-0.1	-5	-5	-3	-3
<b><math>\theta_s</math></b>												
0.01	-97	3.30	13.50	0.015	0.102	0.547	-0.8	-0.9	-46.6	-22.6	-7.5	-7.5
0.35	0	3.33	13.63	0.028	0.132	0.592	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	43	3.34	13.69	0.033	0.145	0.612	0.3	0.4	20.5	10.0	3.3	3.3

(b) Sensitivity coefficients

	Sensitivity Coefficients (B/A)					
	Cadmium	Arsenic	Phenol	Benzene	TCE	
<b>DAF</b>						
1	1.00	1.00	1.0	1.0	1.0	1.0
10	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
20	1.00	1.00	1.0	1.0	1.0	1.0
<b><math>f_{sc}</math></b>						
0.001	-	-	0.5	0.7	0.8	0.8
0.01	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0
0.129	-	-	0.5	0.7	0.8	0.8
<b><math>\theta^b</math></b>						
1.15	-0.01	-0.01	-0.6	-0.5	-0.3	-0.3
1.32	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
1.49	-0.01	-0.01	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2
<b><math>\theta^a</math></b>						
0.01	0.01	0.01	0.5	0.2	0.1	0.1
0.35	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.01	0.01	0.5	0.2	0.1	0.1

#### 4. 수치모델링을 통한 희석-감쇄인자(DAF) 불확실성분석

- DAF가 SSL에 가장 큰 영향을 미치는 인자이므로, SSL 계산시 DAF값의 불확실성이 미치는 영향을 파악하기 위하여, 우리나라 오염부지 자료를 이용하여 DAF 이론치를 계산한 후 수치모델링을 통한 DAF값과 비교하였다.
- DAF의 이론적 계산식은 다음과 같다.

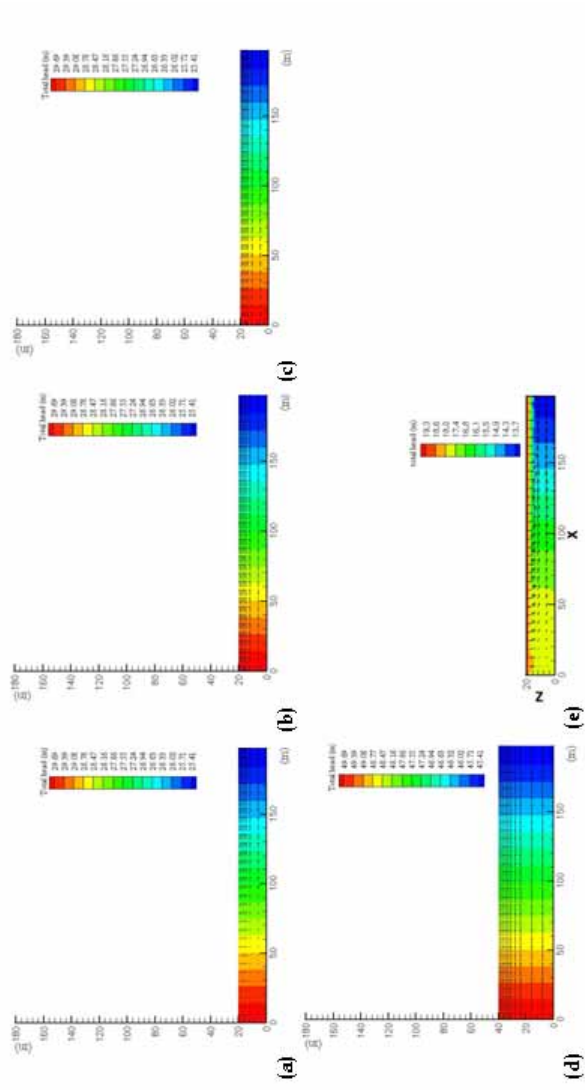
$$DAF = 1 + \left( \frac{Kid}{IL} \right) \text{ when } d = (0.0112L^2)^{0.5} + d_a \left( 1 - \exp \left[ \frac{-LI}{KId_a} \right] \right)$$

여기에서,  $K$ 는 대수층 수리전도도(m/yr),  $i$ 는 동수구배(m/m),  $d$ 는 혼합지역 깊이,  $I$ 는 침투율(m/yr),  $L$ 은 지하수흐름방향과 평행한 오염원의 길이(m),  $d_a$ 는 대수층 두께(m)이다.

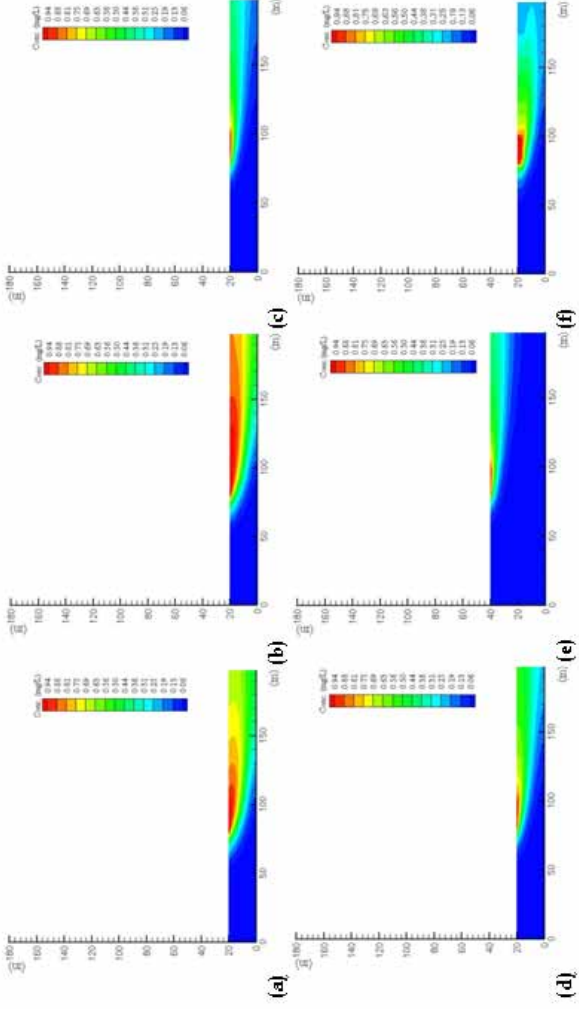
- 부산철도청 오염부지를 대상으로, DAF이론치는 상기한 식을 이용하여 계산하고, 수치모델링을 통한 DAF값은 2DFATMIC모형을 이용하여 계산하였다. 이때 각각의 입력변수값을 변화시켜 그에 따른 DAF이론치 및 수치모델링을 통한 DAF값을 구하여 DAF의 불확실성에 대해 정량적인 결과를 얻었다.
- case 6을 제외한 대부분의 시나리오에서는 DAF이론치가 수치모델링을 통한 DAF값보다 크게 나타났다. 따라서, 단지 DAF이론치만을 사용한다면 SSLs를 과소평가할 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 3-6〉 Parameter values and theoretical/simulated DAF values for six scenarios

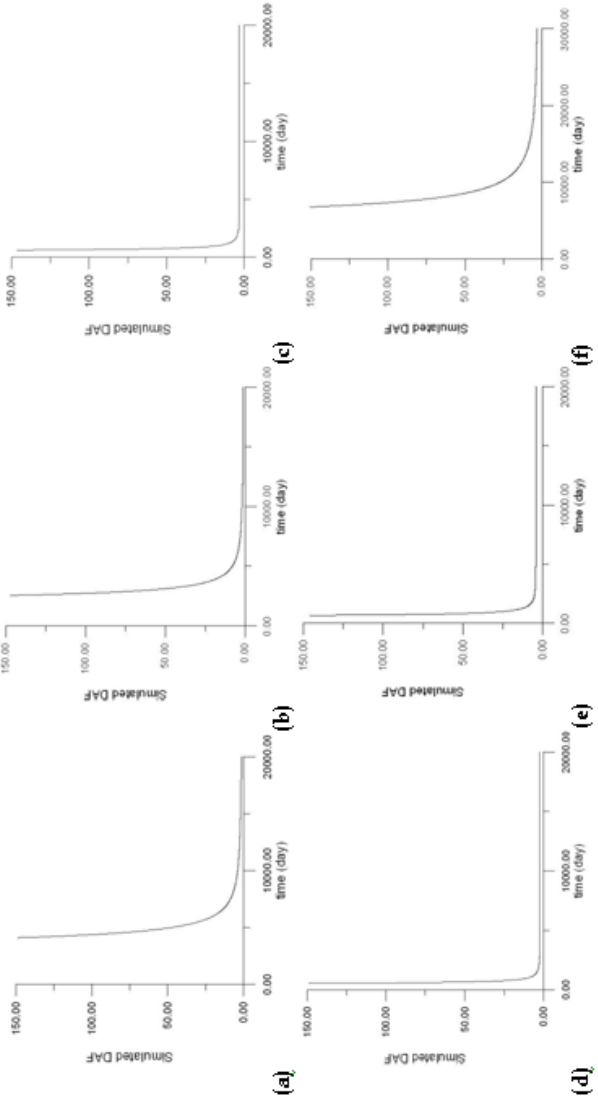
Scenario	Parameters						DAF		Comments
	L (m)	K (m/yr)	I (m/yr)	d <sub>s</sub> (m)	i (m/m)	d (m)	Theoretical	Simulated	
Case 1	20	18.9	0.15	20	0.05	3.15	1.99	1.62	Default case
Case 2	40	18.9	0.15	20	0.05	6.24	1.98	1.34	L changed
Case 3	20	189.2	0.15	20	0.05	2.22	8.01	3.18	K changed
Case 4	20	189.2	0.45	20	0.05	2.22	3.34	2.32	K, I changed
Case 5	20	189.2	0.15	40	0.05	2.22	8.01	4.32	K, d <sub>s</sub> changed
Case 6	20	18.9	0.15	20	0.05	3.15	1.99	3.18	Unsaturated zone included



〈그림 3-3〉 Simulated groundwater flow regimes for (a) case 1 (default) and 2 (L changed), (b) case 3 (K changed), (c) case 4 (K and I changed), (d) case 5 (K and da changed), and (e) case 6 (unsaturated zone included).



〈그림 3-4〉 Simulated contaminant plumes after 20000 days for (a) case 1(default), (b) case 2(L changed), (c) case 3 (K changed), (d) case 4 (K and I changed), (e) case 5(K and da changed), and (f) case 6 (unsaturated zone included).



〈그림 3-5〉 Temporal changes of simulated DAF values for (a) case 1 (default), (b) case 2 (L changed), (c) case 3 (K changed), (d) case 4 (K and I changed), (e) case 5 (K and da changed), and (f) case 6 (unsaturated zone included).

## | 제4장 · 결론 |

- 본 연구는 우리나라 토양 및 지하수환경기준의 연계성을 강화하기 위한 구체적인 방법론을 제안하고자 하였다.
- 이를 위해 우선 외국에서는 어떻게 토양 및 지하수환경기준을 연계하고 있는지, 그리고 그 구체적인 방법론(들)이 무엇인지를 문헌조사를 통해 알아보았다. 대부분의 경우 토양 및 지하수의 동시오염현상을 고려하였고, 지하수를 보호하기 위해 토양정화기준을 설정하고 있었다.
- 미국과 네덜란드에서는 위해성에 근거를 둔 접근법(Soil Screening Guidance, SSG)을 이용하여 토양 및 지하수기준의 연계를 강화하고 있고 우리나라 상황에도 적용 가능하다고 판단되어, 본 연구에서는 SSG 방법론을 적용하였다. 우리나라 토양 및 수리지질학적 자료를 이용하여 SSG를 적용한 결과, 현재의 토양환경(정화)기준은 지하수환경(정화)기준 또는 먹는물수질기준과 연계되어 있지 않은 것으로 나타났다.
- Soil Screening Levels (SSLs)에 대해 민감도 분석을 실시한 결과, 토양환경기준을 좀 더 현실적으로 수립하기 위해서는 우리나라에 적합한 희석-감쇄인자(dilution-attenuation factor, DAF)를 설정하는 것이 필요하다고 판단되었다. 특히, 토양관련매개변수(예를 들면 유기탄소함량, 용적밀도, 수분함량 등)는 유기화합물 SSLs에 크게 영향을 미치는 것으로 나타나 이에 대한 전국적인 자료 조사 또는 특성화가 필요한 것으로 판단되었다. 수치모델링을 통해선, 미국환경청이 제안한 DAF공식은 우리나라의 수리지질학적 특성, 즉 깊이가 매우 얇은 표층 충적대수층에는 적용하기 힘들다는 것을 알아내었다.

- 따라서 우리나라에 적합한 SSG방법론을 개발하기 위해서는 아래와 같은 연구가 추후에 수행되어야 할 것으로 판단되었다.
  - 우선 수리지질학적 특성에 대한 광범위한 조사를 통해 전국적/지역적/국지적인 규모의 DAF값(또는 도면)을 구할 필요가 있다.
  - 우리나라의 경우 암반대수층으로부터 지하수를 개발하는 경우가 많으므로 이에 적합한 DAF공식을 개발할 필요가 있다.
  - 우리나라 토양특성에 대한 광범위한 조사를 새로이 실시하거나 기존 문헌으로부터 체계적으로 수집할 필요가 있다. 이는 (특히 유기화합물에 대한) 토양환경기준을 설정하는데 매우 중요하기 때문이다.

## | 참고 문헌 |

- Hwang, S.I., K.P. Lee, D.S. Lee, and S.E. Powers, 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1143-1150.
- Soo-gil Im, 1994, Research for setting up soil quality standards, Korea Environmental Science Council, p77-83
- Swartjes, F. A. 1999. Risk-based assessment of soil and groundwater quality in the Netherlands: Standards and remediation urgency. *Risk Anal.* 19:1235-1249.
- US EPA, 1996. Soil screening guidance: Technical background document, EPA/540/R95/128.
- US EPA, 1996. Soil screening guidance: User's guide, EPA/540/F-95/041.
- Van den Berg, R. and J. M. Roels, 1991. Assessment of risks to man and the environment in case of exposure to soil contamination. Integration of the results of the preceding studies. RIVM report 725201013. RIVM, Bilthoven.
- VROM (Ministry of Housing, spatial planning and the environment). 2000. Circular on target values and intervention values for soil remediation.
- Yeh, G.T., Cheng, J.R., and Short, T.E., 1997, 2DFATMIC: User's manual of a two-dimensional subsurface flow, fate and transport of microbes and chemicals model version 1.0, EPA/600/R-97/052, USEPA.



# | Contents |

## Improving Coherence between Soil and Groundwater Quality Standards

### FORWARD

### ABSTRACT

<b>I. Introduction</b> .....	<b>1</b>
1. Background and objective .....	1
2. Research scope and methods .....	2
<b>II. Existing Soil and Groundwater Quality Standards</b> .....	<b>4</b>
1. Korea .....	4
A. Soil quality standards .....	4
B. Groundwater quality standards .....	7
C. Drinking water standards .....	9
D. Summary and discussions .....	12
2. The U.S.A (Federal) .....	13
A. Soil and groundwater quality standards .....	13
B. Soil and groundwater cleanup standards .....	13
3. State of Washington .....	18
A. Soil and groundwater quality standards .....	18
B. Groundwater cleanup standards .....	19

C. Soil cleanup standards .....	22
4. State of Texas .....	27
A. Soil and groundwater quality standards .....	27
B. Soil and groundwater cleanup standards .....	27
C. Summary and discussions .....	31
5. Japan .....	32
A. Groundwater quality standards .....	32
B. Soil quality standards .....	38
C. Summary and discussions .....	40
6. The Netherlands .....	41
A. Target values for soil and groundwater .....	41
B. Intervention values for soil and groundwater .....	42
C. Summary and discussions .....	44
7. Germany .....	50
A. Soil quality standards .....	50
B. Environmental water quality standards .....	57
C. Summary and discussions .....	57
8. Summary .....	58
<b>III. Testing Coherence between Standards .....</b>	<b>59</b>
1. Risk-based approach: soil screening guidance .....	59
A. Exposure pathways .....	60
B. Migration to ground water SSLs .....	61
2. Calculating SSLs .....	65
3. Sensitivity analysis for SSLs .....	74
4. Uncertainty analysis of DAF using numerical simulations .....	79
A. Dilution-attenuation factor (DAF) .....	79
B. 2DFATMIC modeling effort .....	80

<b>IV. Summary and Conclusions .....</b>	<b>93</b>
<b>Reference .....</b>	<b>95</b>
<b>Appendix A. 1<sup>st</sup>Proposal for Soil Quality standards .....</b>	<b>98</b>
<b>Appendix B. Performance test of 2DFATMIC model .....</b>	<b>100</b>