

위해성 평가 기법에 따른 토양 불소 기준안 연구

정승우

국립군산대학교 환경공학과

Derivation of Soil Fluorine Standards Based on a Human Health Risk Assessment Method

Seung-Woo Jeong

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Gunsan 54150, Republic of Korea

ABSTRACT

This study established risk-based fluoride soil contamination standards according to the Korean Soil Contaminant Risk Assessment Guidelines (SRAG). Ten exposure scenarios were evaluated, broadly categorized into Scenario 1, which used the default parameters from the current SRAG, and Scenario 2, which used the latest exposure factors and bio-concentration factors. Fluoride soil standards corresponding to a total hazard index (HI) of 1.0 were determined for each scenario. For children in agricultural areas, the derived risk-based soil fluoride standard was 70 mg/kg for Scenario 1 and 27 mg/kg for Scenario 2. In industrial areas, the risk-based fluoride soil standard was 2200 mg/kg in Scenario 1 and 2300 mg/kg in Scenario 2. This study clearly demonstrated that the crop ingestion exposure pathway exerted predominant influence on the estimated human health risk standards. Additionally, using the Added Risk Approach and considering soil background concentrations, the total fluoride soil standards for residential areas ranged from 232 mg/kg to 444 mg/kg, while the standards for industrial areas ranged from 2405 mg/kg to 2674 mg/kg.

Key words: Fluoride, Risk assessment, Exposure routes, Soils, Bio-concentration

1. 서 론

불소는 지구 지각 0.09%를 구성하는 물질로 지구상 13번째로 많은 물질이면서 주기율표의 17(7B)족에 속하는 강력한 할로젠 원소의 일종이다. 자연 상태에서 불소 자체로 존재하지 않고 대부분 화합물 형태로 존재하는 것으로 알려져 있다(Cronin et al., 2000). 불소는 현재 우리나라 토양오염물질로 규정되어 있으며 『토양오염 공정시험기준』의 토양 불소 측정법은 NaF를 표준물질로 사용하고 있으며 자외선/가시선 분광법으로 정량한계는 10 mg/kg이다(NIER, 2022).

불소 오염 토양의 원인은 자연 기원과 인위적 기원으로 구분된다. 자연 기원은 흑운모, 백운모, 인회석, 형석 등 불소 광물이 풍화되면서 자연히 토양에 불소가 포함되거나

화산 분진과 바닷물에 존재하는 불소 함유 에어로졸이 비상 퇴적되면서 불소 오염 토양을 초래한다(Wang et al., 2023). 인위적 기원은 알루미늄, 철 제련 및 인산염 비료 공장으로부터 발생하는 비산 물질 및 부산 폐기물로 부지 내·외 불소 토양 오염이 발생하기도 하고 오랫동안 인산염 비료를 뿌린 농경지도 불소 오염이 심각한 것으로 보고되고 있다(Cronin et al., 2000; Gray et al., 2018; Wang et al., 2023).

현재 불소의 토양 오염 우려기준은 1지역/2지역 400 mg/kg, 3지역 800 mg/kg으로 설정되어 운영되고 있다. 최근 토양조사 결과 불소 기준을 초과하는 사례가 많아지면서 불소 토양 오염 기준치 재설정에 관한 관심이 높아지고 있다. 본 연구는 위해성 평가 기법에 따른 인체 위해도 분석에 따라 합리적 불소 토양 오염 기준치를 도출해 보고자 하였다.

위해성 평가는 오염 부지의 위해도를 평가하기 위한 절차이기도 하지만 국가의 토양오염기준을 설정하기 위한 도구로도 활용된다(Carlon, 2007; Merrington and Schoeters, 2011). 미국, 캐나다, 영국, 네덜란드 등 토양오염기준을 운영하는 대부분

교신저자: 정승우, 교수
Email: swjeong@kunsan.ac.kr

Received : 2024. 06. 02 Reviewed : 2024. 06. 14

Accepted : 2024. 06. 24 Discussion until : 2024. 08. 31

국가의 토양오염기준은 자국의 위해성 평가 절차에 따라 설정되었다. 일반적으로 발암물질의 위해도는 $10^{-4} \sim 10^{-6}$, 비 발암물질의 위해도는 1.0을 기준 하여 토양 오염에 의한 위해 여부를 판단 한다. 위해도 분석에 따른 토양 오염 기준 설정 시 발암물질은 성인 기준, 비 발암물질은 어린이를 기준으로 이루어진다(Merrington and Schoeters, 2011; CCME, 2006). 본 연구는 Jeong et al.(2024) 연구보고서 중 일부 결과를 중심으로 재창조된 것이며, 본 연구에서 제안한 학술적 불소 토양 기준치는 정책 결정 과정을 거쳐야 하는 국가 기준치와 거리가 있음을 명확히 한다.

2. 연구 방법

2.1. 위해성 평가 방법

본 연구는 [환경부 고시 제2018-184호, 2018. 11. 29., 일부개정]『토양오염물질 위해성 평가 지침(Soil Risk Assessment Guidelines, SRAG, 또는 이하 ‘지침’)』에 제시된 절차에 따라 불소 토양의 위해성 평가를 수행하였다(MOE, 2018). 이 지침에 제시된 노출평가, 독성 평가, 위해도 결정 과정에 따라 토양 불소의 비발암 위해도를 산정하였다. 토양 내 불소 농도를 50 mg/kg~4000 mg/kg으로 변화시켜 가면서 토양 섭취, 농작물 섭취, 지하수 섭취, 비산먼지 흡입 등 각 노출경로에 대한 위험비율(Hazard Quotient, HQ)를 산정하고, 각 HQ를 모두 더한 총 비발암 위해도, 위험지수(Hazard Index, HI)를 결정하였다.

2.2. 노출 시나리오 구축

본 연구는 불소 토양 위해성 평가를 위해 Table 1에 제시한 바와 같이 10개 노출 시나리오를 구축하였다. 세부 시나리오는 크게 3가지로 구분된다. 첫째, 토지용도 별 구분으로 고려된 토지 용도는 주거지, 농업지역, 산업/상업지역이다. 두 번째 시나리오 구분은 농작물 섭취 비율에 따라 구분된다. 현재 우리나라 ‘토양오염물질 위해성 평가 지침’에 따라 주거지역 농작물 섭취 비율은 전국 평균 농작물 섭취량의 10%, 농업지역은 50%를 적용하였고, 산업/상업지역은 농작물 섭취가 없는 것으로 가정된 0%가 적용되었다.

2.2.1. 시나리오 1: 현 ‘토양오염물질 위해성 평가 지침’ 기본 인자값 적용

Table 1에서 시나리오 1-1부터 1-5까지 위해성 평가는 현재 ‘지침’에 제시된 독성평가 및 노출평가 기본(Default) 인자값을 적용하였다(MOE, 2018). 단, 시나리오 1-5(산업/상업용지)는 농작물 섭취 경로를 고려하지 않고 토양 섭취, 지하수 섭취,

비산먼지 흡입 등 3개 경로만 고려하였다. 시나리오 1은 현재 지침에 제시하고 있는 2007년 한국 노출계수 핸드북의 기본 인체 노출계수(체중, 음용수량, 토양섭취량) 및 농작물 평균 섭취량을 그대로 사용하였다.

2.2.2. 시나리오 2: 최신 인체 노출계수 및 토양-식물 생물축적 계수(BCF) 값 적용

시나리오 2에 해당하는 2-1부터 2-5는 2019년 최근 발표된『한국인의 노출계수 핸드북』『한국 어린이 노출계수 핸드북』(NIER, 2019a;NIER, 2019b) 노출계수 평가 인자값(체중, 음용수량 농작물 평균 섭취량)을 적용하였다. 『농작물 섭취』경로에서 사용하는 곡류는 성인 기준 0.603 kg/day, 과일류 0.284 kg/day를 적용하였고, 핸드북에 엽채류와 근채류에 대한 세부 구분이 없어 총채소류 0.428 kg/day 중 이전 2007년 지침의 비율을 적용하여 산정한 엽채류 0.283 kg/day, 근채류 0.145 kg/day를 적용하였다. 어린이 기준 최신 농작물 섭취량은 Table 1에 제시하였다.

본 연구는 최근 문헌으로부터 현장 Bio-concentration factor(BCF) 값을 정리하였고 이후 한국 생육 작물에 해당하는 데이터를 선별하여 분석하였다(Sachdeva et al. 2023; Jha et al., 2008; Jha et al., 2009, De et al., 2021; He et al., 2021; Jeong and An, 2014). 본 연구에서 제안한 불소의 농작물 BCF는 곡류(옥수수, 밀, 벼, 녹두, 보리)=0.0156, 엽채류(과채류 포함, 양배추, 상추, 오이, 시금치, 콩, 겨자, 고추)= 0.1022, 근채류(당근, 감자, 무)=0.1993, 과일(토마토)=0.0684였다. 최근 보고된 불소의 BCF 값은 현재 ‘지침’에 제시된 과거 불소 BCF 값보다 큰 수치이다.

『토양오염물질 위해성 평가 지침』의 지하수 농도는 실측하거나 토양 농도로부터 용출농도 예측할 수 있다. 현재 지침의 지하수 농도는 용출농도에 지하수 희석계수(Dilution-attenuation factor, DAF) 1 또는 20을 적용할 수 있으나 보다 보수적 평가를 위해 DAF=1을 적용하였다. 현재 일본의 경우 토양 용출수 불소 농도기준을 지하수 기준 0.8 mg/L과 동일하게 적용하는데 이는 DAF=1을 적용한 경우이다(JMOE, 2023).

2.3. 위해도 기반 불소 토양 기준 도출

2.3.1. 위해성평가 기법에 의한 불소 토양 기준치 도출

Table 1에 제시된 10개 시나리오와 토양 내 불소 농도 50 mg/kg~4000 mg/kg 범위 내 토양 섭취, 농작물 섭취, 지하수 섭취, 비산먼지 흡입 등 각 노출경로에 위험비율(Hazard Quotient, HQ)과 위험지수(Hazard Index, HI)를 산정하였고, HI=1.0에 해당하는 불소 토양 농도를 결정하였다.

Table 1. Scenario for the risk assessment of soil containing fluoride

Scenario	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
	Korean SRAG default values applied					New exposure values and BCF applied				
Parameters	Residential	Agricultural	Residential	Agricultural	Industrial	Residential	Agricultural	Agricultural	Agricultural	Industrial
Land use	Adult	Adult	Children	Children	Adult	Adult	Adult	Children	Children	Adult
Receptor	Adult	Adult	Children	Children	Adult	Adult	Adult	Children	Children	Adult
RD ₅₀ (Reference Dose, oral)	0.0402	→	→	→	→	→	→	→	→	→
BCF (Bioconcentration factor) Cereal	0.006	→	→	→	-	0.0156	→	→	→	-
BCF (Bioconcentration factor) Fruit	0.006	→	→	→	-	-	→	→	→	-
BCF (Bioconcentration factor) Leafy vegetables	0.06	→	→	→	-	-	→	→	→	-
BCF (Bioconcentration factor) Root vegetables	0.006	→	→	→	-	-	→	→	→	-
ABSGI (gastrointestinal absorption factor)	1	→	→	→	-	-	→	→	→	-
CR _p (Consumption rate, agricultural product, mg/day) Cereal	0.032	0.161	0.021	0.107	-	-	0.3015	0.0388	0.194	-
CR _p (Consumption rate, agricultural product, mg/day) Fruit	0.021	0.105	0.018	0.092	-	-	0.1420	0.0174	0.087	-
CR _p (Consumption rate, agricultural product, mg/day) Leafy vegetables	0.027	0.135	0.008	0.038	-	-	0.1415	0.0104	0.052	-
CR _p (Consumption rate, agricultural product, mg/day) Root vegetables	0.014	0.069	0.004	0.020	-	-	0.0725	0.0052	0.026	-
CR _s (Consumption rate, soil ingestion, mg/day) Adult	50	→	-	-	→	-	→	-	-	→
CR _s (Consumption rate, soil ingestion, mg/day) Children	-	-	118	→	-	-	-	200	→	-
CR _w (Consumption rate, water, L/day) Adult	2	→	-	-	→	→	→	-	-	→
CR _w (Consumption rate, water, L/day) Children	-	-	1	1	-	-	-	1.2	-	-
DAF (Dilution attenuation factor)	1	→	→	→	→	1	→	→	→	→

→ : Same as the value on the left - : Not applicable SRAG : Soil Risk Assessment Guideline

Table 1. Continued

Scenario	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Parameters	Korean SRAG default values applied					New exposure values and BCF applied				
RfC(Reference concentration, mg/m ³)	0.013	→	→	→	→	→	→	→	→	→
ABSinh(inhalation absorption factor)	1	→	-	→	→	→	→	→	→	→
TSP (Total solid particle, mg/m ³)	0.07	→	→	→	→	→	→	→	→	→
f _{rs} (soil fraction in dust)	0.5	→	→	→	→	→	→	→	→	→
Fr (Residual rate of fugitive dust in respiratory system)	0.75	→	→	→	→	→	→	→	→	→
EF (Exposure frequency, days/year)	350	→	→	→	→	→	→	→	→	-
EF (Exposure frequency, days/year)	-	-	-	-	100	-	-	-	-	→
ED (Exposure duration, years)	25	→	-	-	→	→	→	-	-	→
ED (Exposure duration, years)	-	-	6	→	-	-	-	→	→	-
BW (Body weight, kg)	62.8	→	-	-	→	64.5	→	-	-	→
BW (Body weight, kg)	-	-	16.8	→	-	-	-	18.8	→	-
AT (Average time, days)	28,689	→	2190	→	28,689	→	→	2190	→	28,689

→ : Same as the value on the left - : Not applicable SRAG : Soil Risk Assessment Guideline

본 연구는 10개 시나리오의 HI=1.0에 해당하는 위해도 기반 10개 불소 토양농도 중 최종 제시한 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치’는 어린이를 기준 한 시나리오의 불소 농도였다.

2.3.2. ‘Added risk approach 적용 총 불소 토양 기준’ 도출

본 연구에서는 상기 HI=1.0 해당 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치’에 Added risk approach 개념을 적용한 ‘총 불소 토양 기준치’를 제시하였다. Added risk approach에 따른 토양오염기준 설정 방법은 위해성 평가 기법을 통해 도출된 ‘위해도 기반 토양 기준치’에 배경농도를 합하여 최종 토양 기준치를 설정하는 방식이다(Struijs et al., 1997; Merrington and Schoeters, 2011). 그러나 이 방식의 가정은 자연 배경 토양 미량원소가 용출되어 인체 및 생물체에 영향을 미치지 않는다는 가정에서 위해도 기반 토양 기준치와 합치게 된다.

국제적으로 Added risk approach 등장은 위해도 근거 토양 오염 기준치가 자연배경농도보다 낮게 도출되는 경우 이를 고려 하기 위함이다. 즉, 현재 국제적으로 통용되는 토양분석 방식은 자연 함량까지 모두 분석하여 토양 농도를 결정하기 때문이다. 따라서, 본 연구는 본 연구에서 도출한 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치’에 우리나라 불소 배경농도로 보고된 불소 농도 평균치와 95백분위 수치를 각각 더하여 ‘총 불소 토양 기준치’를 제시하였다.

3. 불소 위해도 분석 결과

3.1. 시나리오 1: 현 ‘토양오염물질 위해성 평가 지침’ 기본 인자 값 적용 ‘위해도 기반 불소 토양 기준’ 도출 결과

Fig. 1은 시나리오 1에 따라 얻어진 5개 ‘위해도 기반 불소 토양 기준’ 결과이다. 비발암 위해도 기준 HI=1.0에 해당하는 시나리오 1-1 일반 주거지역 어른 대상 불소 토양 농도는 530 mg/kg, 시나리오 1-2 농업지역 어른 대상 불소 토양 농도는 350 mg/kg, 시나리오 1-3 일반 주거지역 어린이 기준 불소 토양 농도는 90 mg/kg, 시나리오 1-4 농업지역 어린이는 70 mg/kg, 산업지역은 2200 mg/kg으로 얻어졌다.

일반 주거지역에 비해 농업지역 불소 토양 기준치가 낮게 도출되었고, 어른보다 어린이 기준 불소 토양 기준치가 낮게 도출되었다. 농업지역 불소 토양 기준치가 낮게 도출된 것은 현재 위해성 평가 지침의 농업지역 수용체의 농작물 섭취 비율이 전국 농작물 섭취 평균량의 50%를 적용하고 주거지역은 10%만을 적용하고 있기 때문이다. 상대적으로 많은 토양과 농작물을 섭취하게 되는 농업지역의 위해도가 높게 나타나므로 더욱 낮은 불소 토양 기준치가 도출되었다. 그리고, 어른과 비교하면 어린이의 불소 토양 기준치가 낮게 도출된 것은 ‘지침’의 어린이 체중이 16.8 kg로 어른 62.8 kg에 비해 작아 오염물질 노출에 민감하기 때문이다(NIER, 2019a; NIER, 2019b).

농작물 섭취를 고려하지 않은 시나리오 1-5 산업/

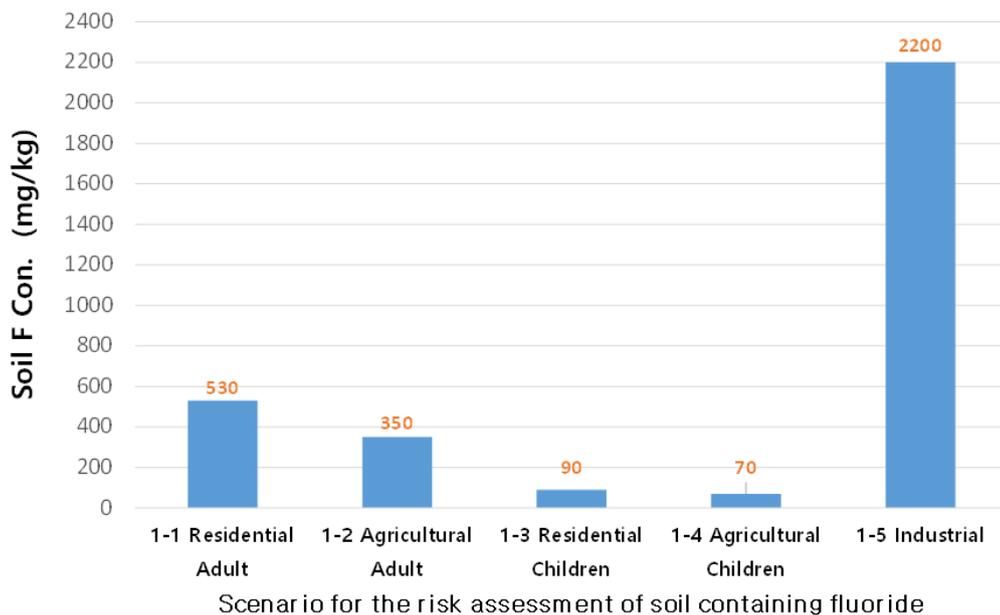


Fig. 1. Derivation of risk-based Fluoride soil quality guidelines in Scenario 1 (Fluoride soil concentrations Corresponding to a Hazard Index HI=1.0); Scenario 1 applied the exposure factors from the current Korean soil contaminant risk assessment guidelines.

상업지역의 도출된 불소 토양 기준치는 2200 mg/kg으로 가장 높다. 이는 농작물 섭취가 불소 위해도 산정에 상당한 기여를 하고 있음을 시사한다(Li et al., 2023). 또한, 산업/상업지역의 기준치가 높게 도출되는 것은 부지 내 오염물질 노출 빈도가 100 days/year로 주거 및 농업지역 350 days/year에 비해 적기 때문이다.

Fig. 2는 시나리오 1-4(농업지역 어린이)에서 산정된 각 노출 경로별 HQ와 총 비발암 위해도, 위험지수 HI를 나타내었다. 총 비발암 위해도, 위험지수 HI에 가장 크게 영향을 미치는 노출경로는 지하수 섭취이며 농작물섭취+토양섭취, 비산먼지 흡입 순이다. 비산먼지 흡입에 의한 위해도는 거의 없는 것으로 산정되었다(Jeong et al., 2016).

3.2. 시나리오 2: 최신 노출계수 및 토양-식물 생물축적계수 (BCF) 값 적용 결과

Fig. 3은 시나리오 2에 따라 얻어진 5개 ‘위해도 기반 불소 토양 기준’ 결과이다. 비발암 위해도 기준 HI=1.0에 해당하는 시나리오 2-1 주거지역 어른 대상 불소 토양 농도는 380 mg/kg, 시나리오 2-2 농업지역 어른 대상 불소 토양 농도는 150 mg/kg, 시나리오 2-3 주거지역 어린이 기준 불소 토양 농도는 65 mg/kg, 시나리오 2-4 농업지역 어린이는 27 mg/kg, 산업지역은 2300 mg/kg으로 얻어졌다.

시나리오 2에서도 주거지역에 비해 농업지역 불소 토양 기준치가 낮게 도출되었고, 어른보다 어린이 기준 불소 토양 기준치가 낮게 도출되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 농업지역 농작물 섭취 비율이 일반 거주지역에 비해 5배 높게 적용되기 때문이며 어린이가 상대적 노출에 취약함을 반영한 것이다. 시나리오 2에서 도출된 불소 토양 기준치가 시나리오 1에 비해 낮아지게 된 가장 큰 이유는 시나리오 2에 적용된 최신 BCF 값과 농작물 섭취량이 현재 지침의 BCF와 농작물 섭취에 비해 높게 적용되어 HI가 상승하였기 때문이다.

농작물 섭취를 고려하지 않은 시나리오 2-5 산업/상업지역 불소 토양 기준치는 2300 mg/kg으로 시나리오 1-5보다 높게 산정되었다. 이는 시나리오 2에 적용된 최신 한국인의 노출계수에 제시된 성인 체중이 64.5 kg으로 현재 지침 62.8 kg에 비해 늘어나 상대적 노출 위해도가 약간 감소하였기 때문이다.

4. 불소 토양 기준치 도출 방안

4.1. 위해도 기반 불소 토양 기준치 선별

본 연구는 시나리오 1과 시나리오 2에서 가장 낮은 값을

나타낸 농업지역 어린이 기준값과 농작물 섭취가 없는 산업지역 기준값을 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치(Risk-based soil F guideline)’로 선별하였다. 따라서, 시나리오 1에서 시나리오 1-4(농업지역/어린이) 70 mg/kg과 1-5(산업지역) 2200 mg/kg, 시나리오 2에서 시나리오 2-4(농업지역/어린이) 27 mg/kg과 1-5(산업지역) 2300 mg/kg을 선정하였다. 즉, 주거 생활 지역은 27 mg/kg과 70 mg/kg, 산업지역은 2200 mg/kg과 2300 mg/kg이다. 주거 생활 지역과 산업지역 간 기준치의 큰 차이가 나타나는 것은 앞 절에서 이미 언급한 바와 같이 공간 내 농작물 섭취 여부(산업지역은 없음)와 노출 빈도(산업지역은 100 days/year)에 있어 차이를 보이기 때문이다.

위해성 평가 기법을 통해 산정된 불소 토양 기준치, Risk-based F soil guideline이 배경농도보다 낮은 값일 수 있다. 특히 타 토양오염물질에 비해 자연 배경농도가 높은 불소는 더욱 그러하다. 토양 불소 배경농도가 각 나라 및 지역마다 다르므로 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치’를 바로 적용하기에 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 학술적으로 도출된 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치’에 각 지역의 배경농도를 고려한 총 불소 토양 기준치(Total F soil quality guideline) 결정 방식을 다음 절에 제안하고자 하였다.

4.2. Added risk approach 적용 총 불소 토양 기준 산정

독성자료와 위해성 평가 방법을 통해 도출된 미량원소의 토양 기준치가 배경농도보다 낮은 경우에 대해 이미 유럽에서 많은 논쟁과 연구가 있어 왔다. Added risk approach에 따른 토양오염기준 설정 방법은 ‘위해도 기반 토양 기준치’와 자연 배경농도를 합하여 최종 토양오염기준으로 결정하는 방법이다(Struijs et al., 1997; Merrington and Schoeters, 2011). 단, 이때 합치는 자연 배경농도의 자연 배경 미량원소가 용출되어 인체 및 생물체에 노출되어 위해를 미치지 않는다는 가정이다. 이와 같은 방법을 사용하는 이유는 현재 전 세계적으로 토양분석 시 이동성이 없는 자연 배경 함량까지 포함한 전 함량 분석으로 토양 오염 농도를 결정하고 이를 토양 오염 기준과 비교하고 있기 때문이다.

본 연구는 Fig. 5와 같이 Added risk approach에 의한 총 불소 토양 기준안을 제시하였다. 우리나라 불소 배경농도는 Lim et al.(2018)이 제시한 불소 토양 평균치 204.5 mg/kg과 95백분위수에 해당하는 374.2 mg/kg을 활용하였다. 따라서 Added risk approach에 의한 총 불소 토양 기준치(Total F soil quality guideline)는 시나리오 1에서 농업지역 어린이 275 mg/kg~444 mg/kg, 산업지역 2405~2574 mg/kg, 시나리오 2에서 농업지역 어린이 232 mg/kg~401 mg/kg, 산업지역 2505~2674

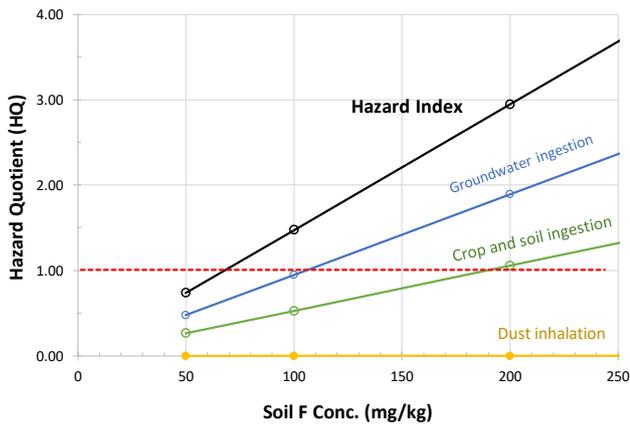


Fig. 2. Hazard Indices and Hazard Quotients by exposure pathway according to changes in Fluoride soil concentration in Scenario 1-4(Agricultural children).

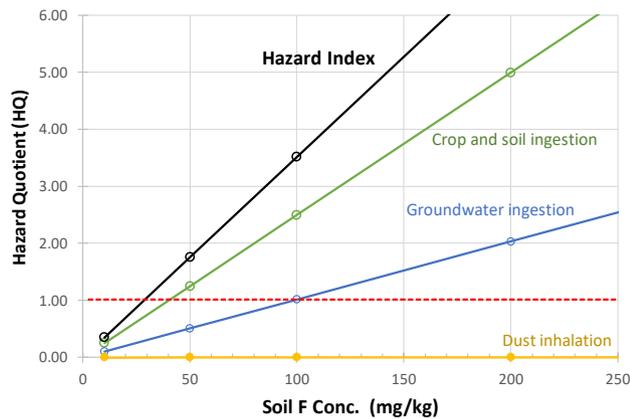


Fig. 4. Hazard Indices and Hazard Quotients by exposure pathway according to changes in Fluoride soil concentration in Scenario 2-4(Agricultural children).

mg/kg로 산정되었다.

본 연구는 총 불소 토양 기준치 범위를 제시하였다. 사람이 거주하며 생활하는 지역의 불소 토양 기준치 범위는 최저 232~최고 444 mg/kg, 사람이 주간에만 활동하는 산업지역의 불소 토양 기준치 범위는 최저 2405~최고 2674 mg/kg에 이를 수 있는 것으로 나타났다.

4.3. 시사점

본 연구에서 도출한 ‘위해도 기반 불소 토양 기준치’와 ‘총 불소 토양 기준치’와 큰 차이를 보인다. 그 이유는 불소 토양 배경농도를 어떻게 결정하느냐는 것이다. 앞서 도출한 주거 생활 지역·위해도 기반 불소 토양 기준치 범위는 27 mg/kg~70 mg/kg으로 그 차이가 43에 불과하지만, 불소 배경농도를

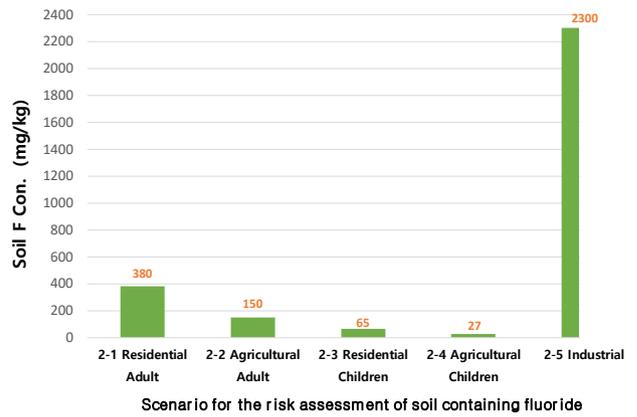


Fig. 3. Derivation of risk-based Fluoride soil quality guidelines in Scenario 2(Fluoride soil concentrations Corresponding to a Hazard Index HI=1.0); Scenario 2 applied the latest exposure factors and BCF.

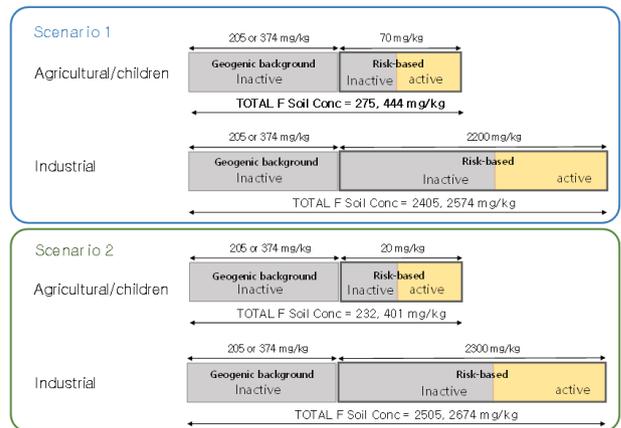


Fig. 5. Derivation of Fluoride soil guidelines considering natural background concentration and risk-based concentrations using the Added Risk Approach.

평균치인 205 mg/kg 혹은 95백분위수 374 mg/kg 중 어느 것을 적용하는지에 따라 그 차이는 169까지 날 수 있다. 이는 불소 토양 오염 기준 결정 시 위해도에 기반한 기준치 산정도 중요하지만, 정확한 불소 배경농도 결정이 우선 되어야 함을 시사한다.

본 연구에서 산정한 총 불소 토양 기준치는 학술적으로 제안한 기준이다. 차후 우리나라 토양 불소 배경농도를 포괄할 수 있는 대표적 결과가 양산된다면 총 불소 토양 기준치는 변화될 수 있다. 또한 우리나라 토양 및 지하수 환경을 대표할 수 있는 불소 BCF와 DAF 등이 확보된다면 더욱 정책적으로 유용한 불소 토양 기준이 도출될 수 있을 것이다. 국가가 관리하는 토양 오염 기준은 인체 건강 및 생태계 보호를 위해 중요한 역할을 하는 만큼 많은 과학적 연구와 합리적 검증은

통해 결정되어야 한다.

5. 결 론

본 연구는 『토양오염물질 위해성 평가 지침』에 제시된 위해성 평가 절차에 따른 ‘위해도 기반 불소 토양 오염 기준치’를 도출해 보았다. 총 10개 시나리오를 구축하여 HI=1.0에 해당하는 불소 토양 오염 기준치를 얻은 결과는 다음과 같았다.

1. 현재 ‘토양오염물질 위해성 평가 지침’ 기본 인자 값을 적용하여 도출한 주거 생활지역의 위해도 기반 토양 불소 기준치(Risk-based F guideline)는 70 mg/kg였으며, 최신 노출계수 및 BCF를 적용하면 위해도 기반 토양 불소 기준치는 27 mg/kg으로 더욱 낮아졌다.
2. 산업지역의 경우 위해도 기반 불소 토양 기준치는 2200 mg/kg, 2300 mg/kg으로 다소 높게 산정되었다. 산업지역은 농작물 섭취 경로를 고려하지 않고 산정된 것이므로 불소 축적 농작물 섭취가 인체 위해도 결정에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. 국가의 토양 배경농도 상황을 고려하여 토양 기준치를 재설정하는 ‘Added risk approach’에 따른 총 불소 토양 기준치(Total F soil guideline)는 주거 생활지역의 경우 최저 232 mg/kg~최고 444 mg/kg, 사람이 주간에만 활동하는 산업지역의 경우 최저 2405 mg/kg~최고 2674 mg/kg에 이를 수 있는 것으로 나타났다.
4. 본 연구에서 산정한 총 불소 토양 기준치는 현재 지침과 문헌값들을 사용하여 학술적으로 산정한 기준이다. 차후 토양 불소 배경농도, 우리나라 토양 및 지하수 환경을 대표할 수 있는 불소 BCF와 DAF 등을 확보하여 더욱 정책 활용에 적합한 불소 토양 기준이 결정되어야 한다.

사 사

본 연구는 한국 토양정화업 협동조합에 의해 지원되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한 자료 조사 및 분석에 참여한 국립군산대학교 및 (주)거품환경기술 연구원에 감사드립니다.

References

Canadian Council of Ministers of the Environment(CCME), 2006, A Protocol for Derivation and Human Health Soil Quality Guidelines, Manitoba, Canada, https://publications.gc.ca/collections/collection_2010/ccme/En108-4-8-2006-eng.pdf.

Carlson, C., 2007, Derivation Methods of Soil Screening Values

in Europe. A Review and Evaluation of National Procedures Towards Harmonization, European Commission, Joint Research Centre, Ispra, https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eu-soils_docs/other/EUR22805.pdf.

Cronin, S. J., Manoharan, V., Hedley, M. J., and Loganathan, P., 2000, Fluoride: A review of its fate, bioavailability, and risks of fluorosis in grazed pasture systems in New Zealand, *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 43(3), 295-321, <https://doi.org/10.1080/00288233.2000.9513430>.

De, A., Deepanjan, M., Irvati, R., Madhurima, J., Antara, D., Roy, C., and Tarit, R., 2021, Fluoride Exposure and probabilistic health risk assessment Through Food Crops from fluoride endemic Bankura and Purulia districts of West Bengal India, *Front. Environ. Sci.*, 9, 713148, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.713148>.

Gray, C.W, 2018, Fluorine in soils under pasture following long-term application of phosphate fertiliser in New Zealand, *Geoderma Regional*, 14, e00183, <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00183>.

He, L., Tu, C., He, S., Long, J., Sun, Y., Sun, Y., and Lin, C., 2021, Fluorine enrichment of vegetables and soil around an abandoned aluminium plant and its risk to human health, *Environ Geochem Health.*, 43(3), 1137-1154, <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00568-5>.

Japan Ministry of the Environment(JMOE), 2023, Soil Contamination Countermeasures Soil Environment Management Division, Environmental Management Bureau, Government of Japan, https://www.env.go.jp/en/water/soil/contami_cm.pdf

Jeong, S-W. and An, Y-J., 2014, Derivation of site-specific surface water quality criteria for the protection of aquatic ecosystems near a Korean military training facility, *Environ Sci Pollut Res.*, 21(1), 141-147, <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1835-2>.

Jeong, S-W., An, Y-J., Song, S., Hyun, I., and Hyun, S., 2016, Probabilistic risk assessment of inhalation of nickel-rich soil particulates on Jeju Island, Korea, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(6), 1301-1311, <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1162659>.

Jeong, S-W, Kim, S., Jeong, J. and Cho, J., 2024, Soil Fluoride Standards Based on Risk Analysis for Public Health (Korean), Korea Soil Remediation Industry Cooperative, Seoul, Korea

Jha, S.K., Nayak, A.K., and Sharma, Y.K., 2009. Fluoride toxicity effects in onion(*Allium cepa L.*) grown in contaminated soils, *Chemosphere*, 76(3), 353-356, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.044>.

Jha, S.K., Nayak, A.K., and Sharma, Y.K., 2008. Response of spinach(*Spinacea oleracea*) to the added fluoride in an alkaline soil, *Food Chem. Toxicol.*, 46(9), 2968-2971, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.044>.

org/10.1016/j.fct.2008.05.024.

Li, F. , Liao, S. ,Zhao, Y. , Li, X. , Wang, Z. , Liao, C., Sun, D., Zhang, Q. , and Lu Q., 2023, Soil exposure is the major fluoride exposure pathways for residents from the high-fluoride karst region in Southwest China, *Chemosphere*, **310**, 136831, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136831>.

Lim, G-H., Lee, H-G., Kim, H-S., Noh, H-J., Ko, H-W., Kim, J-I., Jo, H-J., and Kim, H-K., 2018, Evaluation of Fluoride distribution, fate and transport characteristics in soils *J. Soil Groundwater Environ.*, **23**(6), 90-103.

Merrington, G. and Schoeters, I., 2011, Soil Quality Standards for Trace Elements, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/b10293>.

Ministry of Environment(MOE), 2018, Risk Assessment Guideline for Soil Contaminants, Sejong, Korea

National Institute of Environmental Reserach(NIER), 2019a, Korean Exposure Factors Handbook, NIER-GP2019-037, Incheon, Korea, <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5686029>.

National Institute of Environmental Reserach(NIER), 2019b, Korean Exposure Factors Handbook for Children, NIER-GP2019-038, Incheon, Korea, <https://ecolibrary.me.go.kr/>

nier/

National Institute of Environmental Reserach(NIER), 2022, Korean Standard Methods for Soil Analysis, Incheon, Korea,

Sachdeva, S., Powell, M.A., Nandini, G., Kumar, H., Kumar, R., and Sahoo, P.K., 2023, Uranium and fluoride accumulation in vegetable and cereal crops: A review on current status and crop-wise differences, *Sustainability*, **15**, 13895, <https://doi.org/10.3390/su151813895>.

Struijs, J.D, Van de Meent D., Peijnenburg, W., Van den Hoop M., and Crommentuijn, T., 1997. Added risk approach to derive maximum permissible concentrations for heavy metals: How to take into account the natural background levels, *Ecotoxicol Environ Safety*, **37**(2), 112-118, <https://doi.org/10.1006/eesa.1997.1534> .

Wang, M., Wang, H., Lei, G., Yang, B., Hu, T., Ye, Y., Li, W., Zhou, Y., Yang, X., and Xu, H., 2023, Current progress on fluoride occurrence in the soil environment: Sources, transformation, regulations and remediation, *Chemosphere*, **341**, 139901, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139901>.