

GIS 모델링을 이용한 국내 지질 기원 토양오염의 분포 현황과 공간적 개연성 연구

최재진¹ · 차경훈¹ · 정교철² · 김종태³ · 박성철^{4*}

¹FITI시험연구원 주임연구원, ²안동대학교 지구환경과학과 교수, ³주식회사 자연과기술 대표이사, ⁴FITI시험연구원 선임연구원

Using GIS Modeling to Assess the Distribution and Spatial Probability of Soil Contamination of Geologic Origin in Korea

Jae-Jin Choi¹ · Kyeong-Hun Cha¹ · Gyo-Cheol Jeong² · Jong-Tae Kim³ · Seong-Cheol Park^{4*}

¹Researcher, FITI Testing & Research Institute

²Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

³CEO, Nature and Tech Inc.

⁴Senior Researcher, FITI Testing & Research Institute

Abstract

Soil contaminants measured and managed in Korea include those of geologic origin such as arsenic, cadmium, copper, lead, zinc, nickel, mercury, and fluoride. This study identifies the distribution of these contaminants using GIS modeling to analyze the spatial probability of soil contamination originating from geology. The modeling found that cadmium, copper, lead, nickel, and mercury often exceed the regulated standard by <1%. Concentrations of arsenic and zinc greatly exceeded the standard in the vicinity of mines and industrial complexes: mining and industry seemed to have substantial effects on the concentrations of these metals. Although fluoride was sampled at the lowest number of points, its frequency of exceeding the standard was the highest. No obvious source of artificial contamination has been identified, and fluoride's distribution characteristics showed continuity over a wide area, suggesting a strong correlation between geological characteristics and fluoride concentration. The highest frequencies of fluoride exceeding the standard were in Jurassic granite (40.00%) and Precambrian banded gneiss (34.12%). As these rocks contributed to the formation of soil through their weathering, high fluoride concentrations can be expected in soil in areas where these rocks are distributed.

Keywords: soil contamination, geological origin, GIS, modeling, spatial probability

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Seong-Cheol Park
E-mail: scpark@fiti.re.kr

Received: 13 February, 2023

Revised: 16 March, 2023

Accepted: 22 March, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

국내에서 관리되고 있는 토양오염물질 중 지질 기원의 영향이 큰 물질로는 비소, 카드뮴, 구리, 납, 아연, 니켈, 수은, 불소 등이 있다. 본 연구에서는 국내 토양오염 조사 자료를 바탕으로 GIS 모델링을 통해 오염물질의 분포 현황을 파악하고 오염원과의 공간적 개연성을 확인하였다. 그 결과, 카드뮴, 구리, 납, 니켈, 수은의 경우 1% 미만의 낮은 기준초과 빈도를 나타내고 있다. 비소와 아연의 경우 각각 광산 영향범위와 산업단지 부지 내에서 높은 초과 빈도를 나타내며, 주변 오염인자에 의한 영향이 매우 높은 것으로 확인되었다. 그러나 불소의 경우 조사지점 수가 가장 적고, 기준초과 빈도가 가장 높음에도 불구하고 뚜렷한 인위적

오염원이 확인되지 않았고, 분포 특성 또한 광역적인 연속성을 보임에 따라 지질 분포와의 개연성이 매우 높을 것으로 추정된다. 불소 항목의 기준초과 지점에 대한 지질 분포 현황을 확인한 결과, 쥐라기 화강암(40.00%)과 선캄브리아기 호상편마암(34.12%)에서 집중적인 초과 빈도를 나타내고 있다. 이는 화강암과 편마암에 존재하는 높은 불소 함량이 암석의 풍화에 따른 토양의 생성 과정에서 토양의 구성 성분으로 존재함에 따라 이들 암석이 분포하는 지역의 토양 중 불소 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

주요어: 토양오염, 지질 기원, 지리정보시스템, 모델링, 공간적 개연성

서론

토양은 지구상의 모든 생명체의 생존 기반이 되는 생태계의 중요한 구성요소이다. 인구의 증가와 산업의 발달로 인해 다양한 오염물질이 발생하고 있으며, 이러한 오염물질로부터 토양을 보호하고 오염된 토양으로부터 인간 생활에 대한 노출을 최소화하기 위해 세계 각국에서 토양오염기준을 설정하고 토양오염에 대한 관리체계를 구축하고 있다.

우리나라는 1995년 토양환경보전법에 토양환경평가 제도를 새로이 도입하고 토양환경보전정책을 실시하여 오염된 지하수와 토양에 대한 정밀 조사 및 정화사업을 실시하고 있으며, 토양오염측정망 및 토양오염실태조사를 통한 토양오염 현황 파악, 유류저장시설 등 특정토양오염 관리 정책, 광산 주변 지역 조사 및 정화사업 등을 시행함에 따라 지금까지 국내 토양환경관련 정책은 많은 발전을 이루었다(Park et al., 2005).

Yoon et al.(2009)은 우리나라 토양 중 중금속 자연배경농도를 비교·평가함으로써 토양오염기준 설정을 위한 과학적 근거를 마련하고자 전국 주요 지질 단위인 대동층군, 백악기 화강암, 옥천층군, 조선누층군, 평안층군, 경상누층군, 쥐라기 화강암, 화산암, 변성암 등 산림지역 총 92개 지점에 대한 표토를 0.1 N 염산 가용성 시험방법 및 왕수 시험방법으로 분석을 수행하였으며, Oh and Lee(2003)은 서울 한강 이남 지역의 토지 용도별 토양 중 동작구 임야 불소 473 mg/kg와 금천구의 임야 불소 농도 561 mg/kg, 송파구의 임야 불소 395 mg/kg 등 토양오염우려기준 1 지역 기준 400 mg/kg을 상회하는 높은 농도지점이 확인되고 있으며, 동작구와 금천구 임야 지역은 화강 편마암이, 송파구는 화강암류의 분포가 주류를 이루고 있음을 확인하였다.

지질 기원의 국내 토양오염 기준초과 양상은 인위적 원인이 없이 자연적으로 특정 오염물질이 토양의 배경수준 이상의 부화로 인해 사람 또는 생태계에 위해성을 가하며 그 활용에 제한을 주는 양상을 지시한다. 지질 기원 토양오염 물질의 기준초과 양상이 발생 될 수 있는 주요 오염 원소로서 무기성 원소(불소, 비소, 아연, 카드뮴, 구리, 납, 수은, 니켈, 셀레늄, 크롬, 보론, 철, 망간, 알루미늄, 칼슘, 마그네슘, 염소이온, 황산염이온 등), 방사성 물질(라돈, 우라늄, 라듐, 전알파) 등을 제시할 수 있으며, 국내에서 관리되고 있는 토양오염물질 중 지질 기원의 영향이 큰 물질로는 중금속류(비소, 카드뮴, 구리, 납, 아연, 니켈, 수은), 불소 등이 있다.

본 연구에서는 토양 측정망 자료 및 환경영향평가 중 토양오염도 검사의 수행을 통해 수집된 토양오염 현황 자료를 바탕으로 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 국내 토양오염물질 분포 현황을 시각화하고 토양오염물질의 분포 형태와 해당 지역 지질 현황의 개연성을 파악하고자 하며, 공간적 개연성 파악을 통해 기존 토양오염 관리기준의 문제점에 대한 개선 방향을 제시하고자 한다.

국내 토양오염의 분포 현황

국내 토양오염의 분포 현황을 파악하기 위해 토양측정망 조사결과와 환경영향평가 토양오염도 조사 결과를 바탕으로 데이터베이스를 구축하고 지리정보시스템(GIS)을 활용하여 각 토양오염물질별 오염분포를 모델링한 현황도를 작성하

였다. 오염분포 모델링은 GIS 자료를 기반으로 적용되는 공간 보간법 중 인접하고 있는 기지점들과 이점까지와의 거리에 따라 비선형적인 가중치를 계산하여 적용하는 IDW 보간법 사용하였으며, 보간 산출물을 우리나라 경계 마스크 레이어를 이용하여 내륙에 분포하는 토양영역 만을 표현하였다.

토양오염조사지점은 토양측정망 2,065지점과 환경영향평가 토양조사 지점 1,910지점을 취합하여 전체 3,975지점을 대상으로 동일지점에서 일정 주기별 중복 조사가 이루어진 경우 최대값을 적용하여 모델링을 수행하였으며, 각 오염물질 별 조사지점은 각 지점 별 조사항목이 상이하게 나타남에 따라 전체 조사지점 수량과 오염물질 별 조사지점 수량의 차이가 있다.

카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 수은(Hg) 항목의 경우 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 지점의 빈도가 1% 미만으로 낮게 나타나고 있고, 오염지점의 분포가 산발적으로 나타나며, 일부 구간에서 연속성을 보이기는 하나 광역적인 분포 특성을 나타내지는 않는다. 불소(F), 아연(Zn), 비소(As) 항목의 경우 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 지점의 빈도가 1% 이상으로 다른 항목에 비해 높게 나타나고 있다(Table 1). 특히 불소(F)의 경우 전체 조사지점 수량이 다른 항목에 비해 적음에도 불구하고 5.11%의 높은 기준초과 빈도를 나타내며, 경기, 강원지역을 중심으로 광역적이고 연속적인 분포 특성을 나타내고 있다(Figs. 1 and 2).

Table 1. Status of soil contaminants of geologic origin in Korea

Contaminant	Number of survey points (ea)			Maximum (mg/kg)	Average (mg/kg)	Standard deviation	Number of exceeding the standard (ea)	Frequency of exceeding the standard (%)
	Soil measurement network	Environmental effect evaluation	Sum					
Cadmium (Cd)	2,065	1,687	3,752	157.42	0.58	3.41	15	0.40
Copper (Cu)	2,065	1,863	3,928	1,618.9	25.3	36.0	24	0.61
Arsenic (As)	2,065	1,767	3,832	1,086.00	6.56	19.68	46	1.20
Mercury (Hg)	2,065	1,509	3,574	79.30	0.11	1.82	6	0.17
Lead (Pb)	2,065	1,855	3,920	19,037.0	33.9	305.4	19	0.48
Zinc (Zn)	2,065	1,768	3,833	24,028.0	106.5	397.5	62	1.62
Nickel (Ni)	2,065	1,720	3,785	405.9	16.9	16.6	14	0.37
Fluoride (F)	440	1,224	1,664	750	204	132	85	5.11

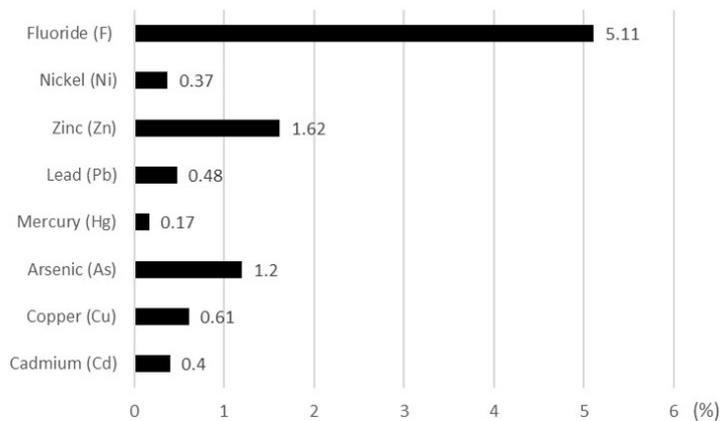


Fig. 1. Percentage of samples exceeding the standard of soil contamination in Korea.

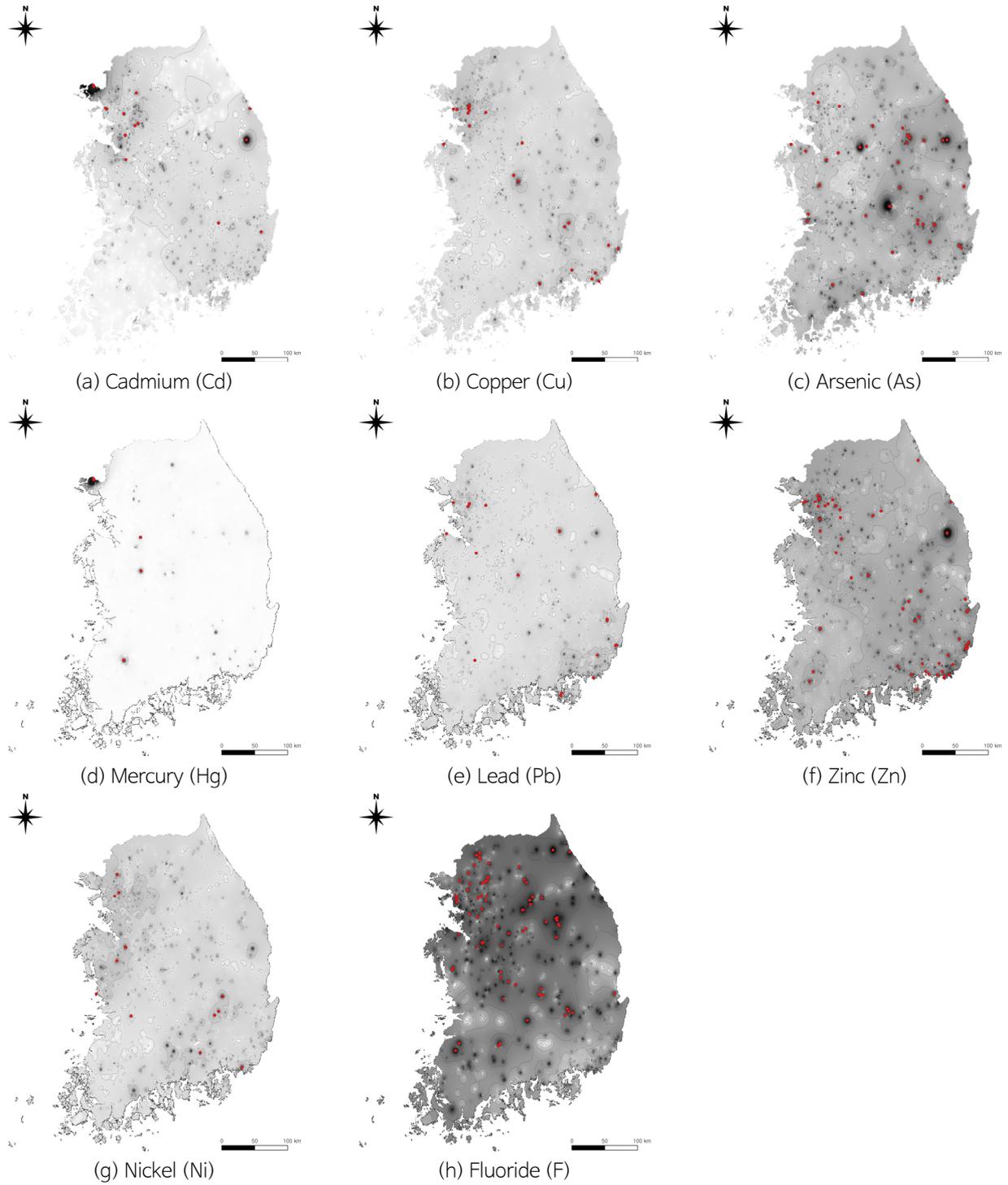


Fig. 2. Distributions of soil contaminants of geologic origin across Korea (red points denote locations where the standard is exceeded).

토양오염 분포 현황과 오염원의 공간적 개연성

토양오염물질의 산업단지 분포와의 개연성을 확인하기 위해 앞서 작성한 오염물질별 분포도와 산업단지 분포도를 중첩시켜 오염원으로 작용할 수 있는 산업단지 부지 내부의 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 빈도를 확인하였다. 산업

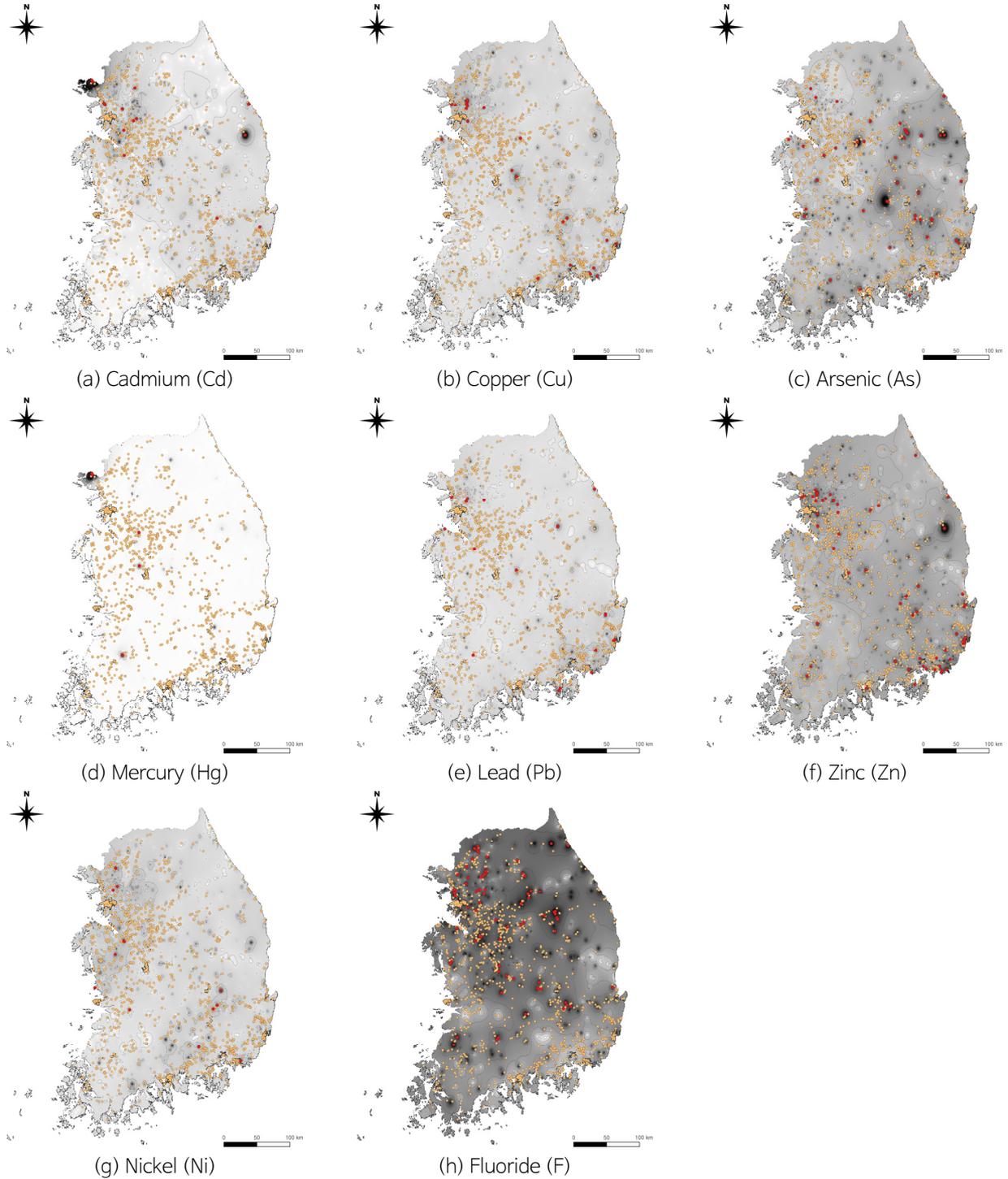


Fig. 3. Distribution of sampling sites near industrial complexes: orange squares = standard not exceeded; red circles = standard exceeded.

단지의 분포는 한국지능정보사회진흥원에서 운영하는 공공데이터포털에서 제공하는 지리정보시스템(GIS)자료를 사용하였다(Fig. 3).

오염물질의 평균 기준초과 지점은 34지점이며, 산업단지 부지 내 평균 기준초과 지점은 7지점으로 나타났다. 산업단지 부지 내 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 지점의 평균 빈도는 전체 조사 지점에 대비하여 0.22%로 나타났으며, 전체 기준초과 지점에 대비하여 17.98%로 나타났다(Table 2).

Table 2. Status of soil contaminants of geologic origin in Korea at locations near industrial sites

Contaminant	Number of survey points (ea)			Number exceeding the standard (ea)	Number of samples exceeding the standard at sites near industry (ea)	Number of samples from near industry exceeding the standard as a percentage of the total number survey points (%)	Number of samples from near industry exceeding the standard as a percentage of the total number of samples exceeding the standard (%)
	Soil measurement network	Environmental effects evaluation	Sum				
Cadmium (Cd)	2,065	1,687	3,752	15	2	0.05	13.33
Copper (Cu)	2,065	1,863	3,928	24	5	0.13	20.83
Arsenic (As)	2,065	1,767	3,832	46	4	0.10	8.70
Mercury (Hg)	2,065	1,509	3,574	6	0	0.00	0.00
Lead (Pb)	2,065	1,855	3,920	19	6	0.15	31.58
Zinc (Zn)	2,065	1,768	3,833	62	21	0.55	33.87
Nickel (Ni)	2,065	1,720	3,785	14	3	0.08	21.43
Fluoride (F)	440	1,224	1,664	85	12	0.72	14.12
Average				34	7	0.22	17.98

토양오염 물질 중 아연(Zn) 항목이 산업단지 부지 내 기준초과 빈도가 가장 높게 나타났으며, 납(Pb), 니켈(Ni), 구리(Cu) 순으로 높은 기준초과 빈도를 나타내고 있다. 기준초과 지점 수에 대비하여 오염물질의 산업단지 부지 내 평균 기준초과 빈도는 17.98%로 나타났고, 카드뮴(Cd), 비소(As), 수은(Hg), 불소(F) 항목의 경우 평균 초과 빈도보다 낮게 나타났으며, 그 외 납(Pb), 구리(Cu), 아연(Zn), 니켈(Ni) 항목의 경우 평균 초과 빈도보다 높게 나타남에 따라 오염원으로서 산업단지의 영향이 높은 것으로 판단된다.

토양오염물질의 광산 분포와의 개연성을 확인하기 위해 앞서 작성한 오염물질 별 분포도와 광산 분포도를 중첩 시켜 오염원으로 작용할 수 있는 광산 영향범위 내부의 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 빈도를 확인하였다. 광산 분포는 한국 광해관리공단에서 운영하는 광해정보통합관리시스템에서 제공하는 광산위치 정보를 사용하였다. 제공되는 자료는 각 광산 주소의 주변을 제외한 리 단위의 소재지 정보만을 제공함에 따라 리 단위 공간영역의 중심점을 기준으로 하여 광산 위치를 지리정보시스템(GIS)자료로 변환하였고, 반경 2 km로 영향범위를 설정하였다(Fig. 4).

지질 기원 오염물질의 평균 기준초과 지점은 34지점이며, 광산 영향범위 내 평균 기준초과 지점은 4지점으로 나타났다. 광산 영향범위 내 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 지점의 평균 빈도는 전체 조사 지점에 대비하여 0.14%로 나타났으며, 전체 기준초과 지점 수에 대비하여 14.99%로 나타났다(Table 3).

지질 기원 토양오염 물질 중 수은(Hg) 항목이 광산 영향범위 내 기준초과 빈도가 가장 높게 나타났으며, 납(Pb), 비소(As) 순으로 높은 기준초과 빈도를 나타내고 있다.

기준초과 지점 수에 대비하여 지질 기원 오염물질의 광산 영향범위 내 평균 기준초과 빈도는 14.99%로 나타났고, 구리(Cu), 아연(Zn), 카드뮴(Cd), 니켈(Ni), 불소(F) 항목의 경우 평균 초과 빈도보다 낮게 나타났으며, 그 외 수은(Hg), 납(Pb), 비소(As) 항목의 경우 평균 초과 빈도보다 높게 나타남에 따라 오염원으로서 광산의 영향이 높은 것으로 판단된다.

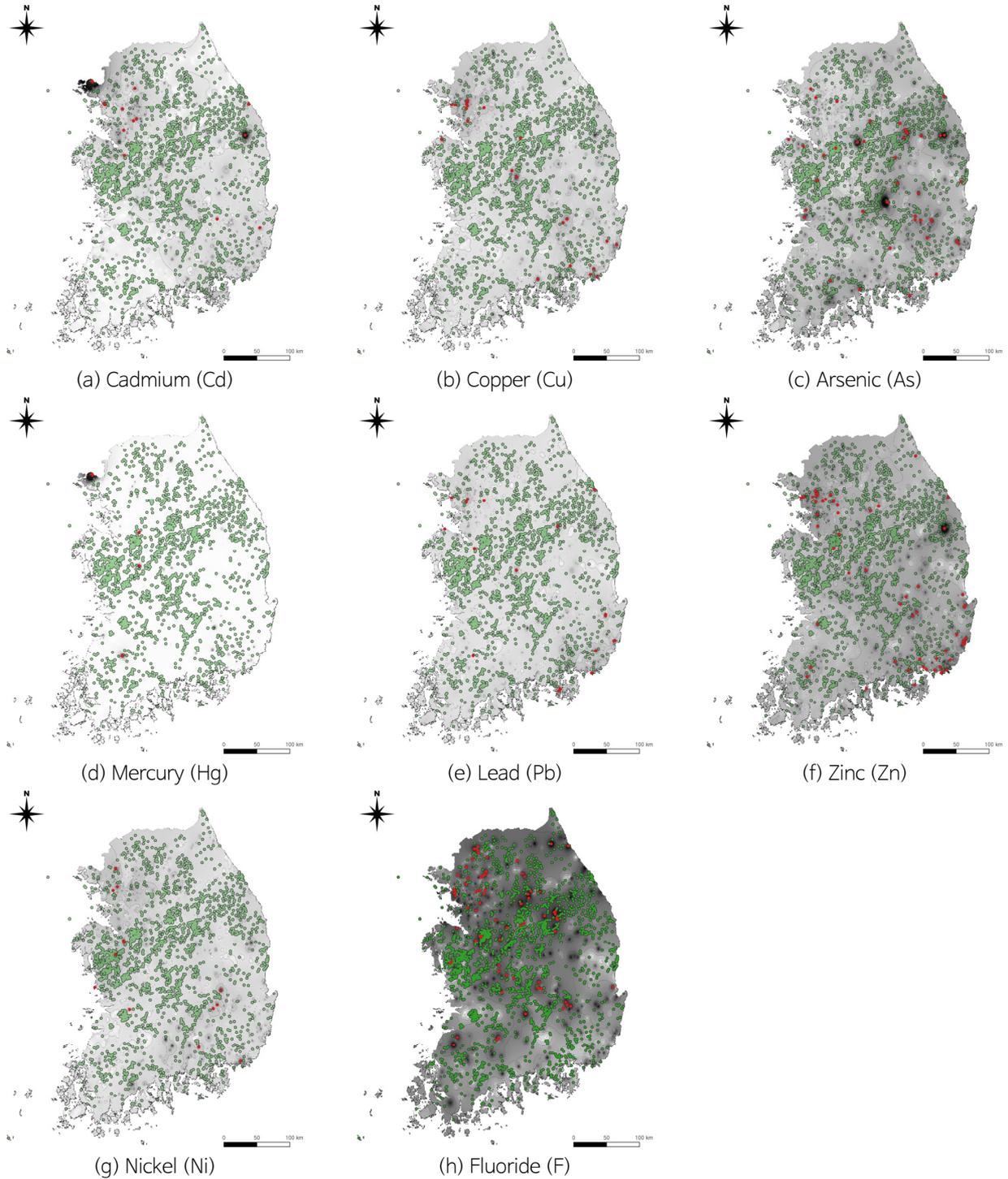


Fig. 4. Distribution of sampling sites near mines: green squares = standard not exceeded; red circles = standard exceeded.

Table 3. Status of soil contaminants of geologic origin in Korea at locations near mining areas

Contaminant	Number of survey points (ea)			Number exceeding the standard (ea)	Number of samples exceeding the standard at sites near mines (ea)	Number of samples from near mines exceeding the standard as a percentage of the total number survey points (%)	Number of samples from near mines exceeding the standard as a percentage of the total number of samples exceeding the standard (%)
	Soil measurement network	Environmental effects evaluation	Sum				
Cadmium (Cd)	2,065	1,687	3,752	15	1	0.03	6.67
Copper (Cu)	2,065	1,863	3,928	24	1	0.03	4.17
Arsenic (As)	2,065	1,767	3,832	46	11	0.29	23.91
Mercury (Hg)	2,065	1,509	3,574	6	2	0.06	33.33
Lead (Pb)	2,065	1,855	3,920	19	5	0.13	26.32
Zinc (Zn)	2,065	1,768	3,833	62	7	0.18	11.29
Nickel (Ni)	2,065	1,720	3,785	14	1	0.03	7.14
Fluoride (F)	440	1,224	1,664	85	6	0.36	7.06
Average				34	4	0.14	14.99

토양오염물질의 지질 분포와의 공간적 개연성을 확인하기 위하여 오염 물질별 토양오염우려지역 1 지역 기준 초과 지점과 지질도를 중첩시켜 기준초과 지점에 분포하는 암상을 확인하였다. 지질도는 한국지질자원연구원서 운영하는 지오빅데이터오픈플랫폼에서 제공하는 자료를 사용하였고, 기준초과 지점과 중첩되는 지질을 선택적으로 표시하였다.

지질 분포와의 개연성을 확인하기 위해서는 외부 오염원으로부터의 영향이 적어야 하며, 지질 분포 범위와의 유사성이 확인되어야 한다. 앞서 외부 오염인자로 영향을 줄 수 있는 산업단지 부지와 광산 영향범위에서의 기준 초과 빈도를 확인하였다. GIS를 이용한 공간분석은 영향범위를 폴리곤으로 설정하고 폴리곤 내에 포함되는 기준 초과 지점을 추출하여 기준초과 빈도를 산정하였다.

아연(Zn), 비소(As), 불소(F) 항목을 제외한 나머지 항목(카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 수은(Hg))은 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 빈도가 1% 미만으로 낮게 나타내고 있어, 산업단지, 광산 분포 등 인위적으로 발생된 오염원이나 지질 분포 등 자연적인 오염원의 영향이 비교적 작기 때문으로 판단된다. 비소(As) 항목의 경우 광산 영향범위 내에서 높은 초과 빈도를 나타내고, 아연(Zn) 항목의 경우 산업단지 부지 내에서 높은 초과 빈도를 나타냄에 따라 오염원으로서 광산 및 산업단지의 영향이 높을 것으로 판단된다.

그러나 불소(F) 항목의 경우 조사지점 수가 가장 적고, 초과 빈도가 가장 높게 나타남에도 불구하고 뚜렷한 인위적 오염원이 확인되지 않았고, 분포 특성 또한 광역적인 연속성을 보이고 있어 불소(F) 항목의 지질별 기준초과 빈도를 확인하였다.

지질과의 개연성이 높을 것으로 판단되는 불소(F) 항목에 대해 토양오염우려기준 1 지역 기준을 초과한 지점과 해당 지점의 지질 분포를 확인하였으며, 항목별 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 지점의 지질은 Table 4와 같다.

불소(F) 항목의 기준초과 지점은 화강암, 호상편마암 등 13개 암상에서 분포하고 있으며, 총적층에서 확인된 기준 초과 지점은 인근 암상에 포함하였다. 퇴적암류(11.76%)보다는 변성암류(41.18%) 및 화강암류(47.06%)에서 높은 기준초과 빈도가 확인되고, 특히 쥐라기 화강암(40.00%)과 선캄브리아기 호상편마암(34.12%)에서 집중적인 초과

빈도를 나타내고 있으며, 초과 지점의 평균 불소(F) 항목의 농도는 쥐라기 화강암(524 mg/kg), 선캄브리아기 호상편마암(503 mg/kg)이 높게 나타나고 있다(Table 4, Fig. 5).

Table 4. Distribution status of points exceeding standards for fluoride (F) by geology

Color in Fig. 5	Geological symbol	Geological period	Rock facies	Number exceeding the standard (ea)	Average (mg/kg)	Standard deviation	Percentage exceeding the standard (%)
	CEOyls	Cambrian	Joseon supergroup of Yeongwol type	4	491	35	4.71
	km6	Cretaceous	Hayang group Haman formation	3	486	83	3.53
	km4	Cretaceous	Hayang group Chilgok formation	1	614	0	1.18
	Jb	Jurassic	Pansong group	1	425	0	1.18
	CEls	Cambrian	Great limestone series	1	404	0	1.18
For all sedimentary rocks				10	487	-	11.76
	PCEkbg	Pre-Cambrian	Banded gneiss	29	503	40	34.12
	PCEses	Pre-Cambrian	Seosan group schists	2	481	25	2.35
	PCEycs	Pre-Cambrian	Yonchon group schists	2	477	4	2.35
	og3	Cambrian	Okchon group phyllite	1	460	0	1.18
	am	Pre-Cambrian	Sobaegsan gneiss complex	1	444	0	1.18
For all metamorphic rocks				35	497	-	41.18
	gr	Unknown	Granite	3	538	14	3.53
	Jfgr	Jurassic	Foliated granite	3	491	20	3.53
	Jgr	Jurassic	Granite	34	524	86	40.00
For all igneous rocks				40	523	-	47.06

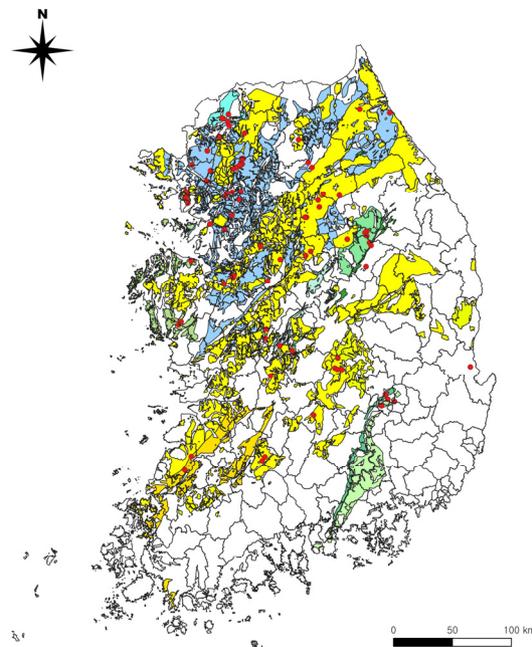


Fig. 5. Geology (colors defined in Fig. 4) in areas with sites at which fluoride (F) exceeds the standard (red circles).

불소(F)는 충치 예방 등으로 적당량 섭취했을 경우 인간의 건강에 도움이 되지만 인체에 과도한 노출이 발생하는 경우 생식기능 장애, 발달 및 지능 장애, 내분비계 또는 신경계 장애 및 뼈와 관련된 질환 등을 발생시킬 수 있다. 불소(F)는 각종 산업 활동 및 비료의 활용 등 다양한 인위적인 원인에 의해 발생할 수 있으나 주로 열수활동 및 화산활동이 활발한 지역 또는 변성암, 화성암지역에서 암석 내에 존재하는 무기염의 용해나 풍화 등에 의해 자연적인 원인으로 생성될 수 있다. 전체 지각의 평균 불소 함량은 500~1,000 mg/kg이지만, 화성암이 주로 분포하는 지역에서 1,000 mg/kg 이상의 불소 농도가 나타날 수 있다고 보고된 바 있으며, 국내의 경우에도 토양오염우려기준 1 지역 기준인 400 mg/kg을 초과한 사례가 빈번히 발생하고 있다(Lee et al., 2019).

불소는 다양한 광물의 형태로 존재하고 불소 함유 광물은 형석, 인회석, 빙정석, 흑운모, 각섬석 등이며, 이들 암석의 OH를 치환하는 F의 용해로부터 기원될 수 있고, 풍화 과정 및 모암으로부터 토양의 형성 과정에서 자연적인 원인에 의한 발생 가능성이 높다(Hwang, 2001).

따라서 화강암과 편마암에 존재하는 높은 불소(F) 함량이 암석의 풍화에 따른 토양의 생성 과정에서 토양의 구성 성분으로 존재함에 따라 이들 암석이 분포하는 지역의 토양 중 불소(F) 농도가 높게 나타난 것으로 판단되며, 토양 중 불소(F) 항목의 토양오염 기준초과와 지질 분포의 공간적 개연성이 매우 높은 것으로 판단된다.

결론

국내에서 관리되고 있는 토양오염물질 중 지질 기원의 영향이 큰 물질로는 비소, 카드뮴, 구리, 납, 아연, 니켈, 수은, 불소 등이 있다. 본 연구에서는 국내 토양오염 조사 자료를 바탕으로 GIS 모델링을 통해 오염물질의 분포 현황을 파악하고 오염원과의 공간적 개연성을 확인하였다.

토양오염물질 중 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 니켈(Ni), 수은(Hg)의 경우 토양오염우려기준 1 지역 기준초과 빈도가 1% 미만으로 낮게 나타내고 있어 산업단지, 광산 분포 등 인위적으로 발생된 오염원이나 지질 분포 등 자연적인 오염원의 영향이 비교적 작기 때문으로 판단된다. 비소(As) 항목의 경우 광산 영향범위 내에서 높은 초과 빈도를 나타내고, 아연(Zn) 항목의 경우 산업단지 부지 내에서 높은 초과 빈도를 나타냄에 따라 오염원으로서 광산 및 산업단지의 영향이 높을 것으로 판단된다. 그러나 불소(F) 항목의 경우 조사 지점 수가 가장 적고, 초과 빈도가 가장 높게 나타남에도 불구하고 뚜렷한 인위적 오염원이 확인되지 않았고, 분포 특성 또한 광역적인 연속성을 보임에 따라 지질과의 개연성이 높을 것으로 추정된다.

불소(F) 항목의 기준초과 지점은 화강암, 호상편마암 등 13개 암상에서 분포하고 있으며, 퇴적암류보다는 변성암류 및 화강암류에서 높은 기준초과 빈도가 확인되고, 특히 쥐라기 화강암과 선캄브리아기 호상편마암에서 집중적인 초과 빈도를 나타내고 있다. 따라서 화강암과 편마암에 존재하는 높은 불소(F) 함량이 암석의 풍화에 따른 토양의 생성 과정에서 토양의 구성 성분으로 존재함에 따라 이들 암석이 분포하는 지역의 토양 중 불소(F) 농도가 높게 나타난 것으로 판단되며, 토양 중 불소(F) 항목의 토양오염 기준초과와 지질 분포의 공간적 개연성이 매우 높은 것으로 판단된다.

지질 기원에 의한 토양오염 기준초과 지역의 거주자는 오염물질로부터 노출이 우려되며, 기준초과에 따른 사후 조치로 경제적 손실이 발생하게 된다. 따라서 지질 기원에 따른 토양오염 기준초과 지역에 대한 별도의 관리체계 구축이 필요하며, 이를 위해서는 지질 기원 기준초과 지역의 별도 관리 구역을 지정할 필요가 있다. 또한 해당 지역의 토지 및 토양 사용을 제한해야 하며, 지질 기원 기준초과 지역의 정보 공개가 필요하다.

사사

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술연구개발사업(2021348A00-2123-CD01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Hwang, J., 2001, Fluorine distribution and attenuation of groundwater within limestone and granite from Keumsan-Wanju fluorite mineralized zone, *Economic and Environmental Geology*, 34(1), 105-117 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., Jeong, J.O., Kim, K.K., Lee, S.W., Kim, S.W., 2019, Geochemical study on the naturally originating fluorine distributed in the area of Yongyudo and Sammokdo, Incheon, *Economic and Environmental Geology*, 52(4), 275-290 (in Korean with English abstract).
- Oh, H.J., Lee, J.Y., 2003, A study on the characteristic evaluation of metals and fluorine concentrations in the southern part of Seoul, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 8(4), 68-73 (in Korean with English abstract).
- Park, Y.H., Yang, J.E., Ok, Y.S., 2005, Policy suggestions regarding to soil quality levels in Korea from a comparison study of the United States, the United Kingdom, Germany, the Netherlands, and Denmark's soil quality policies, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 10(4), 1-12 (in Korean with English abstract).
- Yoon, J.K., Kim, D.H., Kim, T.S., Park, J.G., Chung, I.R., Kim, J.H., Kim, H., 2009, Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14(3), 32-39 (in Korean with English abstract).