

폐금속 광산의 토양 중금속 오염 조사 자료 해석을 위한 핫스팟 분석의 적용*

이채영¹ · 김성민² · 최요순³*

Application of Hot Spot Analysis for Interpreting Soil Heavy-Metal Concentration Data in Abandoned Mines*

Chae-Young LEE¹ · Sung-Min KIM² · Yo-Soon CHOI³*

요 약

본 연구에서는 핫스팟 분석을 통해 폐금속 광산의 토양 중금속 오염 조사 자료를 통계적 유의수준에 따라 해석할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 이상 값을 나타내는 토양 중금속 오염 조사 자료들이 특정한 공간에 집중 또는 분산되어 나타나는지를 확인하기 위해 자료들의 공간적 자기상관성을 Getis-Ord Gi* 통계량을 이용하여 분석하였다. 그 결과 폐금속 광산지역에서 이상 값을 나타내는 자료들이 통계적으로 얼마나 유의미하게 집중되어 있는지 확인할 수 있었다. 각각의 자료들이 가지는 중금속 원소별 오염도 값과 Getis-Ord Gi* 통계량 계산 결과를 이용하여 자료들을 (1) 오염도와 집중도가 모두 높은 것, (2) 오염도는 높으나 집중도가 낮은 것, (3) 오염도는 낮으나 집중도가 높은 것, (4) 오염도와 집중도가 모두 낮은 것 중 하나의 유형으로 분류할 수 있었다. 이러한 분류 결과를 활용하면 토양 중금속 오염 조사 자료를 통계적 유의수준에 따라 해석할 수 있으며, 폐광산 지역의 토양오염 관리와 관련하여 합리적인 의사결정을 지원할 수 있으리라 판단된다.

주요어 : 폐광산, 토양오염, 핫스팟 분석, 지리정보시스템

ABSTRACT

In this study, a hotspot analysis was conducted to suggest a new method for interpreting soil heavy-metal contamination data of abandoned metal mines according to

2019년 03월 15일 접수 Received on March 15, 2019 / 2019년 03월 28일 수정 Revised on March 28, 2019 /
2019년 03월 28일 심사완료 Accepted on March 28, 2019

* 본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 이공학 개인기초연구지원사업(2018R1D1A1A09083947)의 지원을 받아 수행되었다.

1 한국교통연구원 교통빅데이터연구본부 Dept. of Transport Big Data, The Korea Transport Institute, Sejong, Korea

2 강원대학교 에너지공학부 Dept. of Energy Engineering, Kangwon National University, Samcheok, Korea

3 부경대학교 에너지자원공학과 Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

※ Corresponding Author E-mail : energy@pknu.ac.kr

statistical significance level. The spatial autocorrelation of the data was analyzed using the Getis-Ord G_i^* statistic in order to check whether soil heavy metal contamination data showing abnormal values appeared concentrated or dispersed in a specific space. As a result, the statistically significant data showing abnormal values in the mine area could be classified as follows: (1) the contamination degree and the hotspot value (z -score) were both high, (2) the contamination degree was high but the z -score was low, (3) the contamination degree was low but the z -score was high and (4) the contamination degree and the z -score were both low. The proposed method can be used to interpret the soil heavy metal contamination data according to the statistical significance level and to support a rational decision for soil contamination management in abandoned mines.

KEYWORDS : Abandoned Mine, Soil Contamination, Hot Spot Analysis, GIS

서론

광업은 국가 발전에 필요한 에너지와 원료를 공급하는 중요한 산업이다. 그러나 환경을 고려하지 않은 광산 개발은 때로는 광해를 발생시켜 지역주민의 건강을 위협하고, 자연경관을 훼손하며, 환경오염을 초래할 수 있다. 특히, 적절한 복구 대책이 없이 방치된 일부 휴·폐광산은 광해 발생의 원인이 되기도 한다(Kim *et al.*, 2012). 따라서 휴·폐광산 지역의 수질, 토양 등에 관한 환경오염 상태를 정기적으로 조사하고 광해방지를 위한 적절한 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다(Lee and Choi, 2014).

환경부에서는 일부 폐금속 광산에 대한 토양 오염의 실태를 정밀조사하고 이를 공간자료로 구축한 바 있다(MOE, 2007). 오염된 토양 중에 함유된 잠재적 독성 원소(potentially toxic trace elements, PTEs)는 토양 자체를 오염시킬 뿐 아니라 주변 지역에 유해한 영향을 줄 수 있다. 따라서 토양 중에 함유된 PTEs의 오염 정도를 정량화하고 공간적인 분포를 조사하는 것은 환경 대책 수립을 위해 매우 중요한 과정이다.

토양 중금속 오염 자료의 해석을 위해 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)이 유용하게 활용됐다(Kim *et al.*, 2012; Lee and Choi, 2014). GIS는 PTEs의 공간적

분포를 파악하는데 활용될 수 있으며, 지구통계학적 기법들과 함께 사용하면 미측정 지점의 토양오염 정도를 예측하는 데도 효과적이다(Kim *et al.*, 2017). 이러한 지구통계 방법을 활용하면 대상 지역에 대한 토양 오염지도를 쉽게 작성할 수 있다. 그러나 폐금속 광산 주변 지역에서 수집되는 토양오염 조사자료는 대부분 정규 분포를 따르지 않고 일부의 데이터가 과도하게 큰 값을 가지는 이상치를 포함하고 있으므로 지구통계 기법을 사용하는데 어려움이 있다(Kim and Choi, 2017). 또한, 가장 널리 사용되는 지구통계 기반의 보간법인 크리깅(kriging)의 경우에는 미지의 값을 예측하기 위해서 데이터의 공분산을 이용하지만, 관측치 자체의 통계적 유의미성은 제공하지 못한다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 통계적으로 유의미한 지역을 판단하기 위해 핫스팟 분석 기법을 적용하였다.

일반적으로 PTEs의 함량이 큰 값을 가지는 관측치는 토양오염 분석에 있어서 관심의 대상이 되며 지구통계 기법을 적용하는 데도 큰 영향력을 가지게 된다. 그러나 관측치가 큰 값을 가지더라도 다른 큰 값들로부터 고립되어 있다면 통계적으로 중요한 관측치가 아닐 수 있다. 통계적으로 중요한 관측치라면 자신의 값이 클 뿐 아니라 주변의 값들도 큰 값으로 둘러싸여 있을 필요가 있다. 핫스팟 분석 기법은 이처럼 통계적으로 유의미한 자료를 파악하기 위해서

제안되었으며(Getis and Ord, 1992), 관측치의 통계적 유의미성을 고려하지 못하는 지구통계 방법의 한계점을 보완할 수 있다는 장점이 있다. 핫스팟 분석은 일반적으로 질병이나 범죄, 의료 등과 관련된 다양한 사회과학 분야에서 많이 활용되어 왔다(Jeong *et al.*, 2009; Ceccato *et al.*, 2011; Leslie *et al.*, 2012; Ma *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Kim, 2014; Lee and Chon, 2016). 지질 관련 분야에서는 매우 드물게 적용됐으나 최근 일부의 연구에서는 토양의 오염

도 평가나 지하의 광물 매장량 평가에 있어 핫스팟 분석 기술을 적용하고 있다(Kim and Choi, 2019). 폐광산에서 신뢰할만한 토양 샘플링이 이루어졌는지 판단하고 향후의 샘플링 계획을 지원하기 위해 핫스팟 분석이 적용된 바 있으며(Kim and Choi, 2017), 산업화 이후의 환경에서 납 오염의 위험성을 평가하기 위한 적용 사례도 있다(McClintock, 2012). 또한, 핫스팟 분석 기술과 함께 모란 지수를 활용하여 위치 오차의 영향을 고려함으로써 토양 중 중금속 오염을 시뮬레이션한 사례도 있다(Griffith

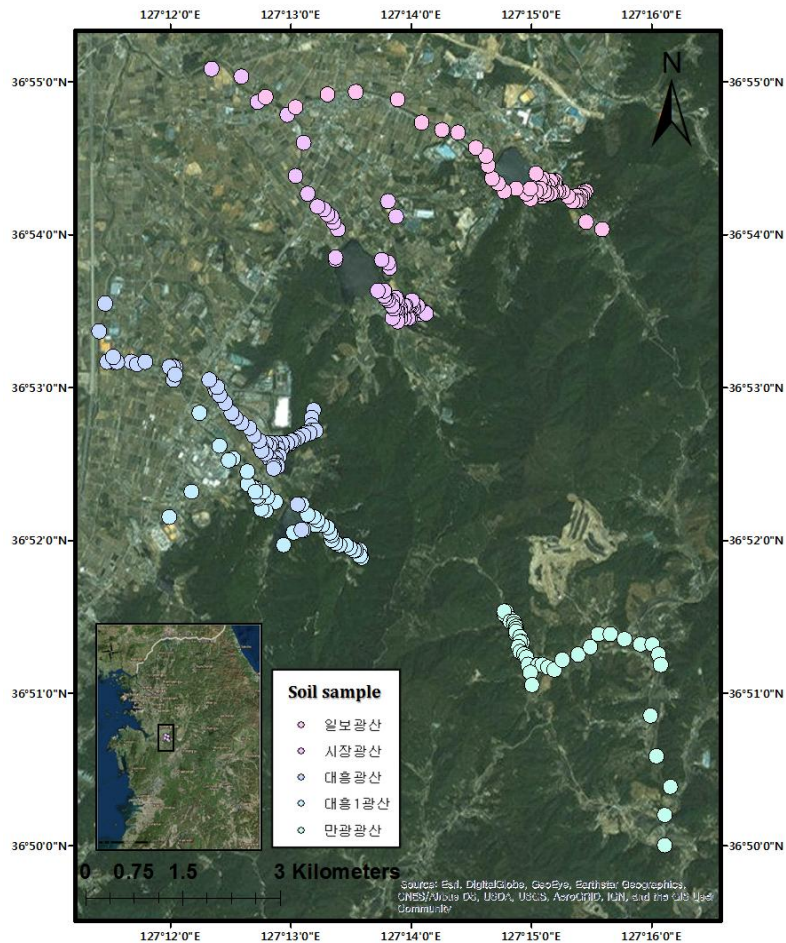


FIGURE 1. Distribution of soil concentration survey data in the study area

et al., 2016).

본 연구에서는 폐금속 광산 지역에서 발생할 수 있는 잠재오염을 확인하기 위해 핫스팟 분석을 통해 토양 중금속 오염 조사자료를 통계적 유의수준에 따라 해석할 수 있는 새로운 방법을 제시하고자 한다. 또한, 핫스팟 분석을 통해 얻은 통계적 유의수준 값과 토양오염 기준값을 이용하여 토양오염 주제도를 만들고, 토양오염실태를 공간적으로 분석하였다. 분석을 위해서는 환경부에서 구축한 폐금속 광산의 토양오염 조사자료를 활용하였다. 본 연구의 결과는 통계적 유의성 분석에 기반한 토양오염 주제도를 제시함으로써 토양오염복원 우선순위 선정 및 합리적인 의사결정 지원에 있어 도움을 줄 수 있으리라 판단된다.

연구지역 및 자료

본 연구에서는 환경부에서 제공한 “폐금속광산 토양오염실태 정밀조사” 보고서를 활용하였다(MOE, 2007). 이 보고서에 수록된 토양 중금속 오염 조사자료 중 충청남도 천안시에 있는 5개의 광산의 자료를 활용하였다(그림 1). 5개

광산은 시장/대장광산(입장면 호당리), 대흥(성거)광산(성거읍 천흥리), 대흥1광산(성거읍 천흥리), 만광광산(북면 남안리), 일보광산(입장면 도림리)이다. 조사대상 광산들에 대한 지질 및 현황을 간단하게 표 1에 요약하였다. 또한, 각 광산의 오염원 분포 현황에 대해 표 2에 제시하였다.

토양오염공정시험방법으로 분석한 결과에서 토양오염 환경기준을 초과한 성분이 비소가 많이 검출되었으므로 비소를 대상으로 핫스팟 분석을 수행하였다. 비소에 대한 통계치는 표 3과 같다. 또한, 연구지역에 분포하는 비소의 농도 값을 공간적으로 그림 2와 같이 나타내었다.

연구방법

본 연구에서는 그림 3과 같은 절차로 토양 중금속 오염 조사 자료의 분포를 확인하고, 공간 자기 상관성 분석을 수행하였다. 분석을 통해 얻은 거리 기준으로 핫스팟 분석을 수행하였고, 이를 통해 토양오염 환경기준과 통계적 유의수준에 따른 토양 중금속 오염 자료를 해석하였다.

TABLE 1. Summary of geology for mines

Name	Type of mineral	Geology	Total output
Ilbo mine	Gold, Silver	Gneiss rocks of the Precambrian basin, Late-invasive granite	Unknown
Sijang/Daejang mine	Gold, Silver	Muscovite gneiss	Au 386kg, Ag 3kg
Daeheung(Seong-geo) mine	Gold, Silver	Biotite gneiss, Mica schist	Au 182.3kg
Daeheung 1 mine	Gold, Silver	Granite gneiss, Schist, Granite, Muscovite	Au 200,631g
Mangwang mine	Gold, Silver	Gneiss	a few

TABLE 2. Number of contamination sources at the study area

Name	Contamination sources	
	Waste(m ²)	Tailing(m ²)
Ilbo mine	30	4
Sijang/Daejang mine	N/A	1
Daeheung(Seong-geo) mine	N/A	N/A
Daeheung 1 mine	3	8
Mangwang mine	N/A	N/A

TABLE 3. Descriptive statistics of arsenic concentration at the study area.

Name	As(mg/kg)				
	Mean	Std. Dev.	Median	Minimum	Maximum
Ilbo mine	35.09	131.53	2.40	0.00	1,032.46
Sijang/Daejang mine	25.20	139.24	1.39	0.00	1,162.75
Daeheung(Seong-geo) mine	18.15	78.73	1.10	0.00	603.92
Daeheung 1 mine	30.18	75.73	3.24	0.00	353.94
Mangwang mine	0.93	2.92	0.00	0.00	17.69

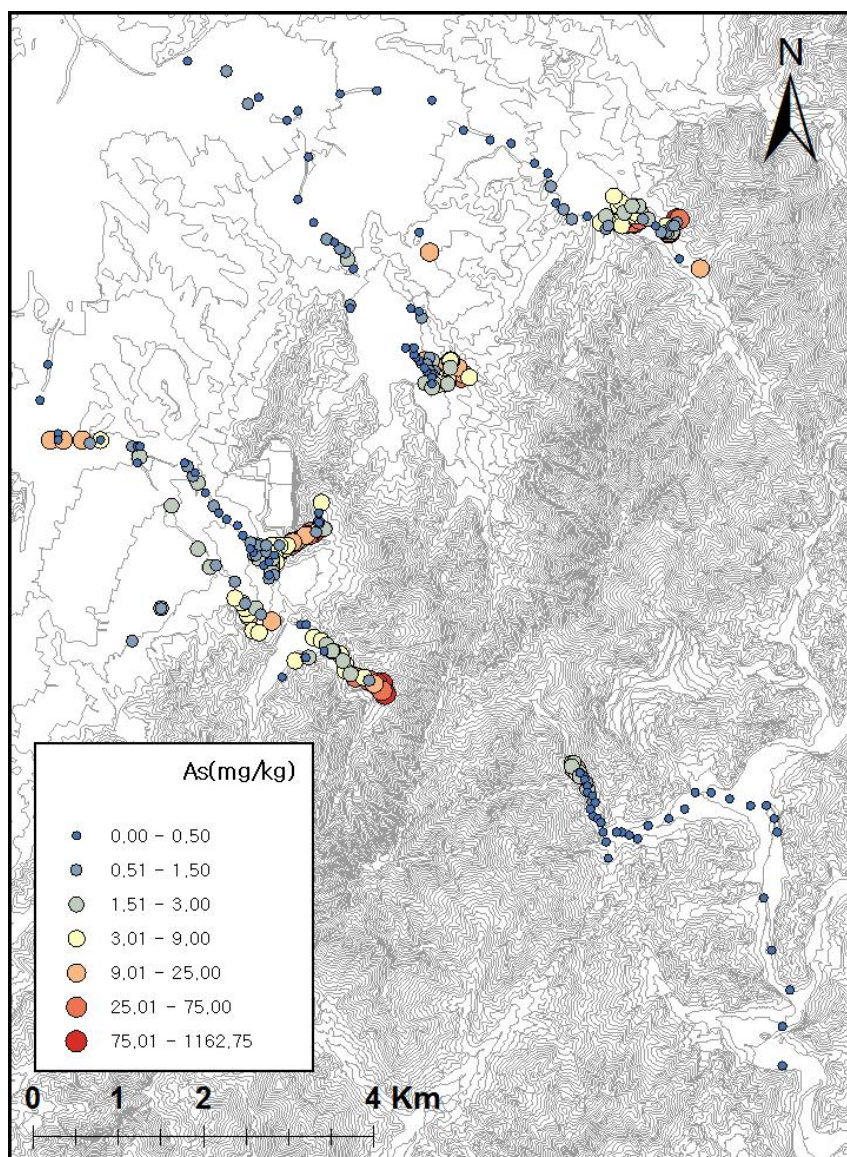


FIGURE 2. Distribution of Arsenic concentration in soils

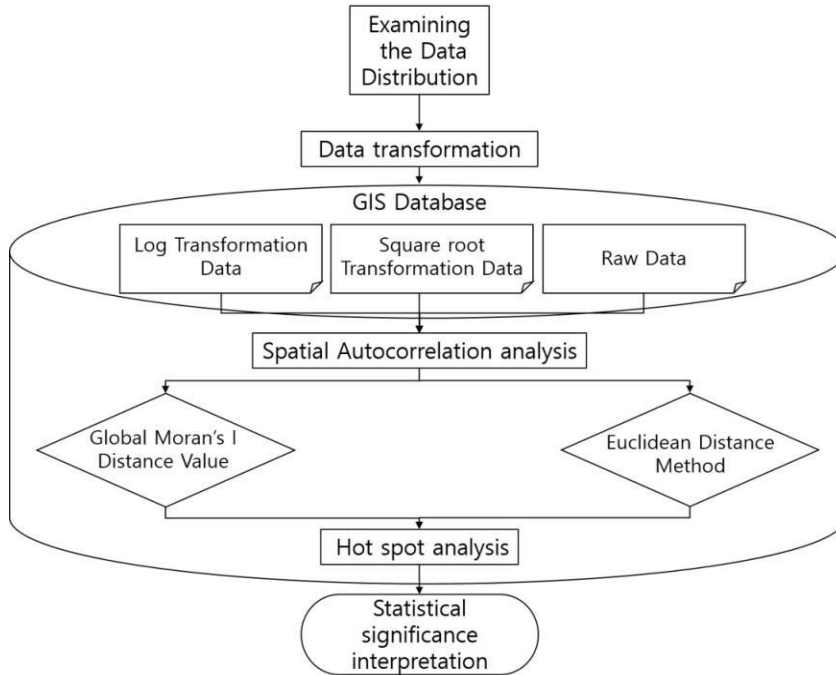


FIGURE 3. Procedure of hot spot analysis for interpreting survey data of soil heavy-metal concentrations

1. 자료 변환과 공간통계분석

연구지역의 자료는 이상치를 포함하여 왜도가 큰 비정규 분포를 나타냈다. 따라서 원자료 값을 로그변환과 제곱근변환을 수행한 후 공간 분석을 수행하였다. 그리고 핫스팟 분석을 통해 인접한 거리와 패턴을 분석하는 것뿐만 아니라 그 위치의 속성값 분포를 평가하여 특정한 현상이 공간에 집중 또는 분산되어 나타나는지를 판단하고자 하였다. 본 연구에서는 핫스팟 분석을 위해 데이터가 지니는 속성 값과 그 공간의 가중치를 통해 계산하는 Getis-Ord G_i^* 통계량을 이용하였다(Getis and Ord, 1992). 그 결과로 산정된 p값과 z값의 높고 낮음을 통해서 공간적인 군집성을 판단할 수 있다. Getis-Ord G_i^* 통계량을 계산하는 수식은 다음과 같다.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2}{n-1}}}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

여기서 x_j 는 j 지점에 대한 속성값, $w_{i,j}$ 는 i 지점과 j 지점 사이의 공간가중치, n은 전체 지점 개수이다. 지점 간의 거리를 고려해서 산정된 Getis-Ord G_i^* 통계량은 Z 검정을 통해 통계적 유의성을 판정한다. 즉, 높은 값과 낮은 값이 얼마나 집중되어 있는지를 통계적인 유의성을 통해서 판단한다. Z 값이 양(+)의 값이면

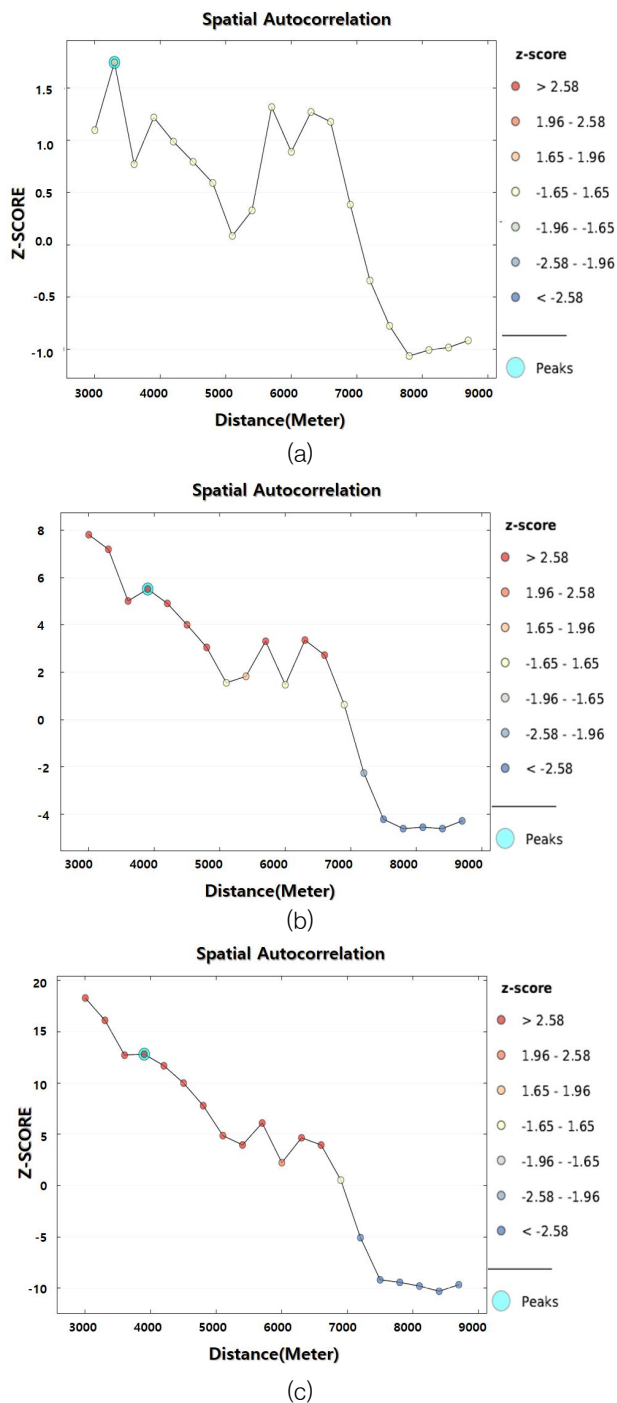


FIGURE 4. Spatial autocorrelations of (a) raw data, (b) square root transformed data and (c) log transformed data.

높은 값의 조사자료들이 공간적으로 군집되어 있다고 판단하고, Z 값이 음(-)의 값이면 낮은 값의 조사자료들이 공간적으로 군집되어 있다고 판단한다(Getis and Ord, 1992).

핫스팟 분석을 수행하기 위해서는 공간적 자기 상관성 분석이 선행되어야 한다. 공간적 자기 상관성 분석은 거리에 따른 값들의 유사성, 즉 공간적인 상관성을 확인하는 기술이다. 본 연구에서는 일정한 거리 기준을 정하기 위해 원 데이터와 로그변환 데이터, 제곱근변환 데이터에 대해서 각각 공간적 자기 상관성 분석을 수행하였으며, 3,900m 거리에서 자료들의 자기 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다(그림 4). 그리고 그 결과에 따라 3,900m 거릿값을 기준으로 핫스팟 분석을 수행하였다.

2. 통계적 유의수준

핫스팟 분석 결과를 통계적 유의수준에 따라 해석하기 위해 신뢰수준 99% 기준과 토양환경보전법상의 토양오염 대책 기준값인 75mg/kg을 기준으로 그림 5와 같이 그래프를 도시하였다. 이 그래프에서 I은 오염도와 집중도가 높은 HH이고, II는 오염도는 높고, 집중도는 낮은 HL, III은 오염도는 낮고, 집중도는 높은 LH, IV는 오염도와 집중도가 낮은 LL이다. 이러한 분류 결과를 활용하면 토양 중금속 오염

조사자료를 통계적 유의수준에 따라 해석할 수 있다.

연구결과

연구지역의 원자료와 제곱근변환자료, 로그변환자료로 각각 핫스팟 분석을 수행한 결과는 표 4와 같다. 평균적으로 시장/대장광산에서 z값이 높게 산정되어 핫스팟 지역으로 분석되었다. 반면, 만광광산은 z값이 낮은 콜드스팟으로 분석되었다.

핫스팟 분석 결과를 지도상에 도시한 결과는 그림 6과 같다. 로그변환자료로 분석한 핫스팟 지역이 좀 더 널리 분포함을 알 수 있었다. 로그변환자료로 통계적 유의수준을 판단할 수 있는 그래프에 적용해 본 결과, 시장/대장광산에서 3곳, 일보광산에서 2곳이 오염도와 집중도가 높은 HH가 나타났다. 시장/대장광산과 일보광산에서 나타난 지점들은 광미가 있거나 갱구와 인접한 지점으로 토양오염대책 기준을 초과한 시료이다. 이 두 광산 이외에 대흥(성거)광산과 대흥1광산도 집중도가 높은 핫스팟 지역으로 나타났으나 오염도가 시장/대장광산과 일보광산보다 덜 했기 때문에 LH가 나타났다(그림 7). 따라서 천안시에 있는 폐금속 광산중 시장/대장광산을 토양복원사업 수행시 우선하여 검토할 필요가 있다고 판단된다.

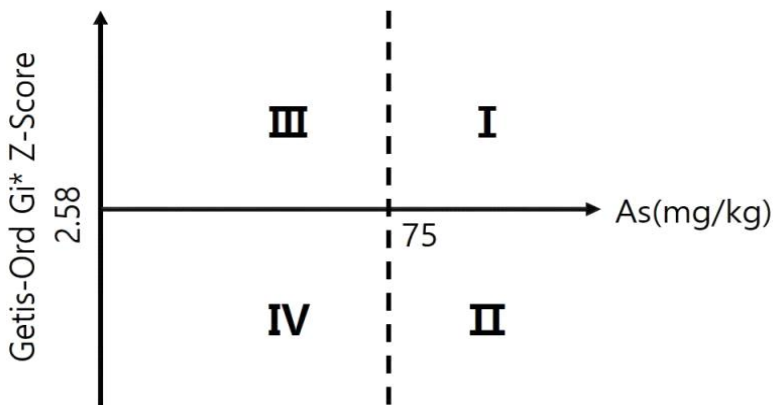
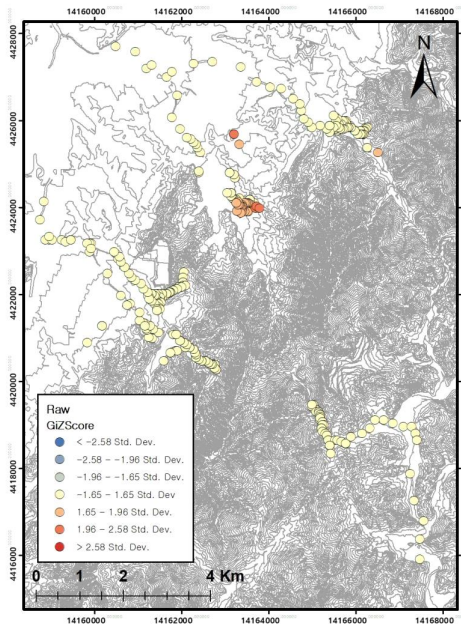


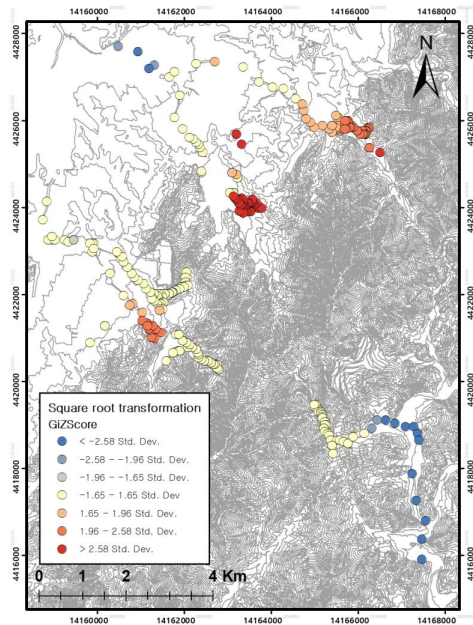
FIGURE 5. Graph of statistical significance for interpreting As contamination in soils

TABLE 4. Descriptive statistics of G_i^* z-scores determined by hotspot analysis

Item	Name	G_i^* z-score				
		Mean	Std. Dev.	Median	Minimum	Maximum
Raw data	Total	0.56	0.94	0.43	-1.64	2.04
	Ilbo mine	1.31	0.43	1.37	-1.54	1.69
	Sijang/Daejang mine	1.27	0.92	1.85	-1.60	2.04
	Daeheung(Seong-geo) mine	0.16	0.56	0.41	-1.54	0.55
	Daeheung 1 mine	0.33	0.27	0.25	-0.40	0.82
	Mangwang mine	-0.67	0.52	-0.54	-1.64	-0.08
Square root transformed data	Total	1.18	1.75	1.5	-3.61	4.07
	Ilbo mine	1.89	0.69	1.89	-2.46	2.60
	Sijang/Daejang mine	2.64	1.74	2.64	-2.70	4.07
	Daeheung(Seong-geo) mine	1.02	0.96	1.02	-1.91	1.68
	Daeheung 1 mine	1.25	0.51	1.25	0.53	2.10
Log transformed data	Total	1.78	2.60	2.45	-5.45	5.70
	Ilbo mine	2.36	0.91	2.36	-3.29	3.36
	Sijang/Daejang mine	3.85	2.41	3.85	-4.08	5.70
	Daeheung(Seong-geo) mine	2.10	1.19	2.10	-1.62	3.07
	Daeheung 1 mine	2.30	0.77	2.30	1.27	3.47
	Mangwang mine	-2.87	1.38	-2.87	-5.45	-1.92

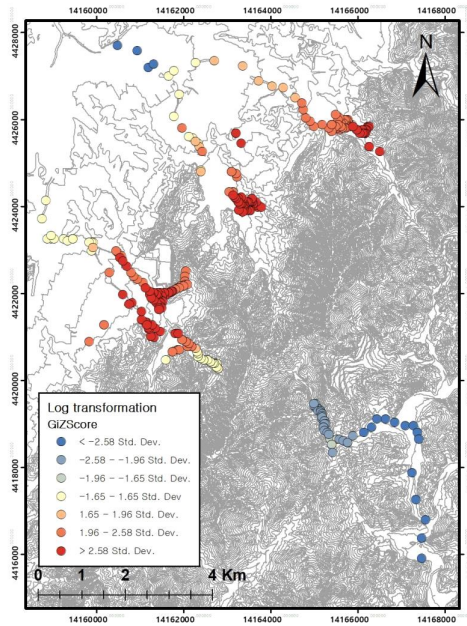


(a)



(b)

FIGURE 6. Results of hotspot analysis using (a) raw data, (b) square root transformed data and (c) Log transformed data



(c)

FIGURE 6. Continued

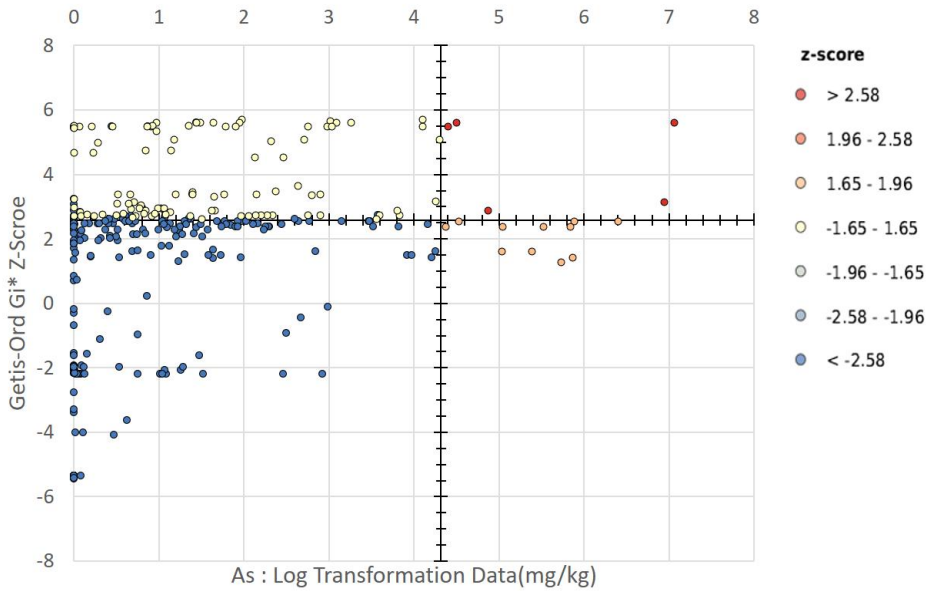


FIGURE 7. Result showing the statistical significance for interpreting As contamination in soils

결론

본 연구에서는 폐금속 광산 지역의 토양 중금속 오염 조사자료를 해석하기 위해 핫스팟 분석을 수행하였다. 그리고 핫스팟 분석을 통해 얻은 통계적 유의수준 값과 토양오염 대책 기준값을 이용하여 토양 중금속 오염 조사 자료를 해석할 수 있는 그래프를 작성하였다. 충청남도 천안시에 있는 5개의 광산 주변에서 채취한 토양 시료를 이용하여 핫스팟 분석을 수행한 결과 시장/대장광산과 일보광산이 핫스팟 지역으로 나타났다. 분석을 통해 얻은 z값과 토양오염대책 기준값에 따라 통계적 유의성 그래프에 적용한 결과 오염도와 집중도가 모두 높은 지점이 시장/대장광산과 일보광산에서 총 다섯 지점 발견되었다. 본 연구에서 적용된 핫스팟 기법은 지점별 토양 중금속 오염 측정값의 통계적 유의성을 판단하고, 토양오염 관리와 관련하여 합리적인 의사결정을 지원하는데 기여할 수 있을 것이다. **KAGIS**

REFERENCES

- Jeong, K.S., T.H. Moon, J.H. Jeong, and S.Y. Heo, 2009. Anaysis of Spatio-temporal Pattern of Urban Crime and Its Influencing Factors. *Journal of the Association of Korean Geographers* 12 (1):12-25 (정경석, 문태현, 정재희, 허선영. 2009. GIS와 공간통계기법을 이용한 시 공간적 도시범죄 패턴 및 범죄발생 영향요인 분석 12(1):12-25).
- Kim, D.Y. 2014. Spatial Analysis for Forest Fire Using GIS. *The Geographical Journal of Korea* 48(3):325-336 (김대영. 2014. GIS를 이용한 산불발생의 공간적 분석 48(3):325-336).
- Kim, S.M., Y. Choi, J. Suh, S. Oh, H.D. Park, and S.H. Yoon, 2012. Estimation of soil erosion and sediment yield from mine tailing dumps using GIS: A case study at the Samgwang mine, Korea, *Geosystem Engineering* 15:2-9.
- Kim, S.M. and Y. Choi, 2017. Assessing Statistically Significant Heavy-Metal Concentrations in Abandoned Mine Areas via Hot Spot Analysis of Portable XRF Data. *International Journal of Environment Research and Public Health* 14:654.
- Kim, S.M., Y. Choi, H. Yi, and H.D. Park, 2017. Geostatistical prediction of heavy metal concentrations in stream sediments considering the stream networks, *Environmental Earth Sciences* 76:72-89.
- Kim, S.M. and Y. Choi, 2019. Mapping Heavy Metal Concentrations in Beach Sands Using GIS and Portable XRF Data, *Journal of Marine Science and Engineering* 7(2):42.
- Lee, H. and Y. Choi, 2014. A Study on the soil contamination maps using the
- Ceccato, V. and L. Dolmen, 2011. Crime in rural Sweden. *Applied Geography* 31:119-135.
- Getis, A. and J.K. Ord, 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics, *Geographical Analysis* 24:189-206.
- Griffith, D.A., Y. Chun, and M. Lee, 2016. Locational Error Impacts on Local Spatial Autocorrelation Indices: A Syracuse Soil Sample Pb-Level Data Case Study. *Proceedings of the Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Montpellier, France, 5-8 July, pp.136-143.

- handheld XRF and GIS in abandoned mining areas, *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies* 17(3):195-206 (이현규, 최요순. 2014. 휴대용 XRF와 GIS를 이용한 폐광산 지역의 토양오염에 관한 연구. *한국지리정보학회지* 17(3):195-206).
- Lee, J.S. and J.B. Chon, 2016. Factors Affecting the Spatial Clustering Pattern of Major Office Buildings in Seoul : Changing Impacts between 2003 and 2012. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 32(7):105-109 (이재수, 전재범. 2016. 서울시 대형 오피스 건물의 공간적 군집패턴과 영향요인 - 2003~2012년 변화 32(7):105-109).
- Leslie, T.F., C.L. Frankenfeld, and M.A. Makara, 2012. The spatial food environment of the DC metropolitan area: Clustering, co-location, and categorical differentiation. *Applied Geography* 35:300-307.
- Ma, Z., B. Zuckerberg, W.F. Porter, and L. Zhang, 2012. Use of localized descriptive statistics for exploring the spatial pattern changes of bird species richness at multiple scales, *Applied Geography* 32:185-194.
- McClintock, N. 2012. Assessing soil lead contamination at multiple scales in Oakland, California: Implications for urban agriculture and environmental justice, *Applied Geography* 35:460-473.
- MOE. 2007. Detailed investigation of soil contamination of waste metal mine. pp. 268-342 (환경부. 2007년도 폐금속광산 토양오염실태 정밀조사).
- Wang, F., D. Guo, and S. McLafferty, 2012. Constructing geographic areas for cancer data analysis: A case study on late-stage breast cancer risk in Illinois, *Applied Geography* 35:1-11.
- Zhang, P., D.W. Wong, B.K.L. So, and H. Lin, 2012. An exploratory spatial analysis of western medical services in Republican Beijing, *Applied Geography* 32:556-565. 