

## 휴대용 XRF와 GIS를 이용한 폐광산 지역의 토양오염에 관한 연구

이현규<sup>1</sup> · 최요순<sup>1\*</sup>

### A Study on the Soil Contamination(Maps) Using the Handheld XRF and GIS in Abandoned Mining Areas

Hyeon-Gyu LEE<sup>1</sup> · Yo-Soon CHOI<sup>1\*</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 휴대용 X-선 형광 분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)와 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 이용하여 부산 폐광산 지역의 구리와 납에 관한 토양오염지도를 작성하였다. 연구지역의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용한 수문 분석을 통해 오염원으로부터 오염 물질이 확산될 수 있는 빗물의 흐름방향을 분석하였으며, 이를 고려하여 토양오염도 측정 지점을 24곳 선정하였다. 휴대용 X-선 형광 분석기를 이용하여 24곳 토양에서 구리와 납의 농도를 측정한 결과, 구리는 최대 8,255ppm, 납은 최대 2,146ppm가 검출되었다. 휴대용 X-선 형광 분석기로 측정한 구리와 납의 농도 자료를 ArcGIS 소프트웨어에 입력하였으며, 정규크리깅(ordinary kriging) 기법을 이용하여 공간보간(spatial interpolation)을 수행한 후 구리와 납에 관한 5m 해상도의 토양오염지도를 작성하였다. 그 결과 부산 폐광산 지역에서는 갯구들 주변에 적치되어 있는 폐석 및 광미를 중심으로 고농도의 구리와 납이 토양 내에 존재하는 것을 작성된 토양오염지도로부터 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 휴대용 X-선 형광 분석기와 GIS를 이용한 구리와 납의 토양오염지도 작성방법이 현장에서 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 폐광산, 토양오염, X선 형광분석기, 지리정보시스템

#### ABSTRACT

In this study, soil contamination maps related to Cu and Pb were created at the Busan abandoned mine in Korea using a handheld X-Ray Fluorescence(XRF) and Geographic Information Systems(GIS). Hydrological analysis was performed using the

2014년 5월 30일 접수 Received on May 30, 2014 / 2014년 9월 20일 수정 Revised on September 20, 2014  
/ 2014년 9월 25일 심사완료 Accepted on September 25, 2014

1 부경대학교 에너지자원공학과 Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

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

Digital Elevation Model(DEM) of the study area to identify the flow directions of surface runoff where pollutants can be dispersed from the soil contamination sources. 24 locations for measuring the soil contamination related to Cu and Pb were selected by considering the result of hydrological analysis. The results measured at the 24 locations using the handheld XRF showed that the highest value of Cu contamination is 8,255ppm and that of Pb is 2,146ppm. The field investigation data were entered into ArcGIS software, and then soil contamination maps regarding Cu and Pb with a 5m grid-spacing were created after performing spatial interpolations using the ordinary kriging method. As a result, we could know that high concentrations of Cu and Pb are presented at the waste and tailings dumps around the abandoned mine openings. This study also showed that the handheld XRF and GIS can be utilized to create soil contamination maps related to Cu and Pb in the field.

**KEYWORDS :** Abandoned Mine, Soil Contamination, XRF, 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 방치되어 있는 일부 휴·폐광산은 광해발생의 원인이 되기도 한다(Choi *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2012b; Son *et al.*, 2014). 따라서 휴·폐광산 지역의 수질, 토양 등에 관한 환경오염 상태를 정기적으로 조사하고 광해방지를 위한 적절한 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다(Kim *et al.*, 2012c).

국내에서 휴·폐광산 지역의 토양내 중금속 오염을 조사하는 방법은 환경부에서 고시한 토양오염공정시험 기준을 따른다(MOE, 2009). 이 기준에서는 토양내 각종 오염물질의 정성분석과 정량분석을 위한 방법을 제시한다. 토양내 오염물질의 정량분석을 위해서는 일반적으로 유도결합플라즈마(Inductively Coupled Plasma, ICP) 분석법이 사용된다. ICP 분석법은 다원소를 동시에 분석할 수 있으며, 분석의 정확도가 높아 토양 중금속 오염분석 뿐만 아니라 다양한 응용분야에서 활용되고 있다. 그러나 현장에

서 채취한 토양시료를 건조한 후 액상으로 녹여 전처리를 하는 과정이 매우 복잡하고 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다(Hou *et al.*, 2004). 또한, ICP 분석 장비는 가격이 비싸고 휴대성이 떨어지기 때문에 현장에서 활용하기에는 제약이 따른다(Tolner *et al.*, 2010).

ICP 분석법과는 달리 X-Ray Fluorescence (XRF) 분석법은 고체상태의 시료를 전처리 없이 비파괴 분석할 수 있으며 분석시간이 짧고 장비의 가격도 상대적으로 저렴하다(Kalnicky and Singhvi, 2001; Carr *et al.*, 2008). 또한, 최근에는 휴대용으로 제작되어 현장에서 토양내 중금속 오염 물질의 농도를 직접 분석할 수 있다(Jang *et al.*, 2008). 따라서 휴대용 XRF 장비를 활용할 경우 기존의 ICP 분석법에 비해 현장에서 더 많은 토양시료를 효율적으로 분석할 수 있으며(Radu and Diamond, 2009), 이는 토양오염지도 제작시에도 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

현재 미국에서는 휴대용 XRF를 이용한 분석법을 US.EPA method 6200에 명시하여 토양이나 하천 침전물의 중금속 분석에 활용을 하고 있으며 휴대용 XRF를 이용한 토양조사와 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 국내에서는 도입된 장비의 수가 많지 않고 휴대용 XRF를 이용한 토양조사나 연구는 거의 이루어

어지지 않고 있는 실정이다. 또한, 해외에서는 휴대용 XRF와 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 이용하여 토양오염지도를 제작하기 위한 연구들이 일부 수행되었으나(Carr *et al.*, 2008; Tolner *et al.*, 2010; Higuera *et al.*, 2012), 국내에서 현재까지 이와 관련한 연구가 거의 시도되지 않았다.

본 연구의 목적은 휴대용 XRF와 GIS를 이용하여 폐광산 지역의 토양오염지도를 작성하는 것이다. 부산시 사하구에 위치한 폐금속광산 지역에 대한 사례연구를 통해 휴대용 XRF를 이용한 자료수집 절차와 GIS를 이용한 토양오염지도 작성방법이 현장에서 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하고자 한다.

## 연구지역

부산광산은 부산광역시 사하구 괴정동에 위치한 폐금속 광산이다. 부산광산에서는 1986년까지 약 2천 톤의 철이 생산되었으며 현재는 2개의 갱구가 폐쇄된 상태이다. 갱구 주변에 약 4000m<sup>2</sup>의 폐석과 광미가 적치되어 있으며, 경사면을 따라 하류방향으로 약 30m 정도 폐석 및 광미의 유실이 일어나고 있음을 현장에서 확인할 수 있었다(그림 1). 이 지역에서는 갱구 주변에 적치되어 있는 폐석 및 광미 이외에 다

른 오염원은 발견되지 않았다(MOE, 2007).

## 연구방법

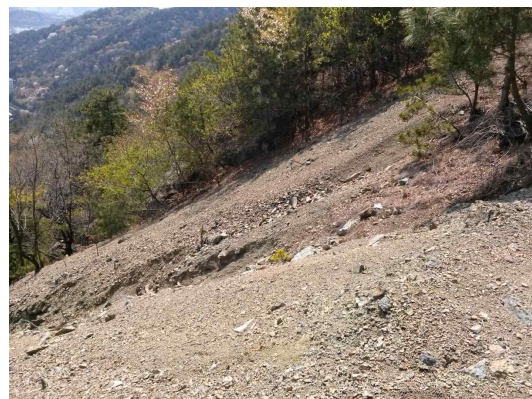
본 연구에서는 3단계의 절차에 따라 연구지역의 토양오염지도를 작성하였다. 첫째, 빗물 흐름에 관한 지형분석을 실시하여 토양내 중금속 함량 분석을 수행할 지점들을 선정하였다. 둘째, 선정된 지점들의 토양에 존재하는 구리와 납의 함량을 휴대용 XRF 장비를 이용하여 측정하였다. 셋째, 구리와 납에 관한 토양 오염도 측정 결과를 GIS 소프트웨어에 입력한 후 지구통계학적 기법을 사용하여 토양오염지도를 작성하였다.

### 1. 지형공간분석을 통한 측정지점의 선정

휴·폐광산 지역에서 토양 중금속 오염의 분포 패턴은 강우나 수계의 영향을 크게 받는다(Choi *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2012a). 따라서 연구지역의 빗물흐름 패턴과 집수구역 경계 등을 분석하는 것은 토양오염도 측정을 실시할 지점들의 선택에 있어 매우 중요하다(Lee *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2006). 본 연구에서는 연구지역의 수치지형도와 ArcGIS 소프트웨어를 사용하여 측정지점의 선정을 위한 지형공간분석을 수행하였다. 국가



(a)



(b)

FIGURE 1. Views of the Busan abandoned mine (a) Openings (b) Mine waste and tailings dumps

공간정보유통시스템(<https://www.nsic.go.kr>)에서 구입한 1:5000 축척의 수치지형도를 사용하였으며, 구입한 수치지도로부터 지형등고선 레이어를 추출한 후, 이를 이용하여 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 생성하였다. 수치표고모델의 격자 해상도는 5m로 설정하여 분석을 수행하였다. 연구지역내의 오염원은 폐석 및 광미 적치장으로 설정하였고, 오염원이 포함되어 있는 집수구역의 범위와 빗물의 흐름 방향을 수치표고모델 자료와 ArcGIS 소프트웨어가 제공하는 Hydrology 도구를 이용하여 분석하였다(그림 2).

지형공간분석을 통해 폐석 및 광미 적치장의 집수구역을 예측한 결과를 바탕으로 연구지역

에서 토양 오염도 측정을 실시할 24곳의 위치를 선정하였다(그림 3). 5, 6, 7번 측정지점들은 오염원들이 분포한 장소이다. 그림 2c에 제시된 빗물의 흐름방향 분석 결과를 참고하여 8, 15, 20번 측정지점들은 7번 지점의 오염원으로부터 서쪽 경사로 오염 물질이 확산되는 것을 확인하기 위해 선정하였으며, 12번, 13번, 23번 측정지점들은 5, 6번 지점의 오염원으로부터 남쪽 경사로 오염 물질이 확산되는 것을 확인하기 위해 선정하였다. 나머지 측정지점들은 지형을 고려할 때 현장에서 접근이 용이한 장소 중 토양오염지도 작성영역을 기준으로 공간적 위치가 편중되지 않도록 선정하였다.

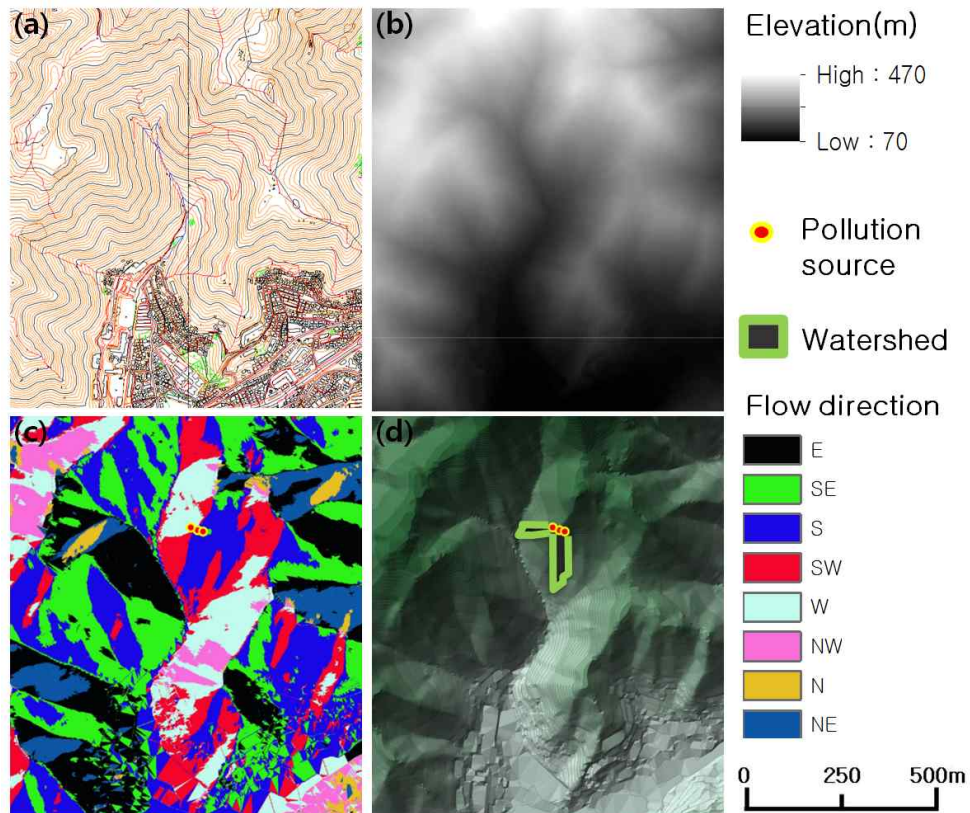


FIGURE 2. Hydrological analysis at the study area (a) Digital topographical map. (b) Digital elevation model (c) Flow direction of surface runoff (d) Watershed boundary

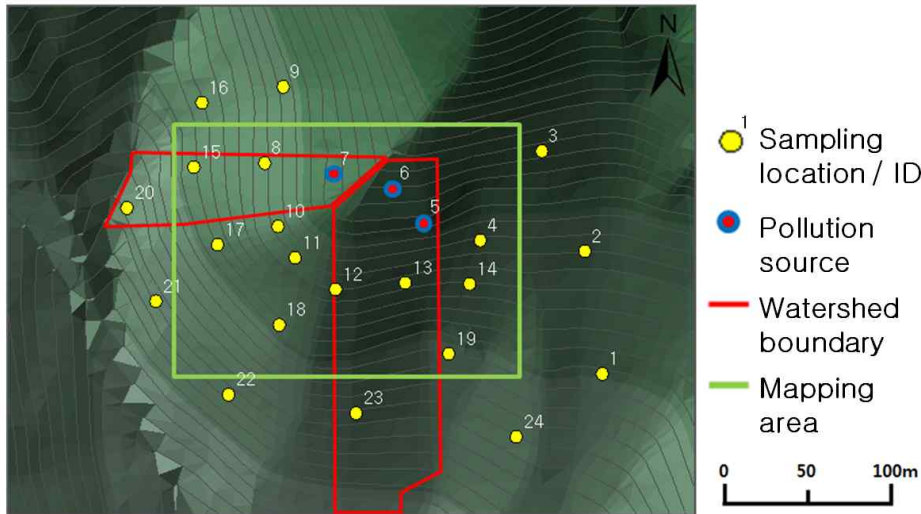


FIGURE 3. Selected locations for soil contamination survey using the portable X-Ray Fluorescence. The size of mapping area is 23,952m<sup>2</sup>

2. 휴대용 XRF를 이용한 토양 오염도 측정

본 연구에서는 OLYMPUS에서 개발한 휴대용 XRF 장비인 ‘Innov-X DELTA handheld XRF analyzer’ 를 이용하여 연구지역 토양의 구리와 납에 관한 중금속 오염도를 측정하였다. 휴대용 XRF를 이용하여 현장에서 중금속 오염도를 측정한 결과는 토양 내의 수분 함량과 측정 시간의 길이에 따라 달라질 수 있다(Tolner *et al.*, 2010). Tolner *et al.*(2010)의 연구결과에 따르면 완전 건조된 토양 내의 중금속 함량을 100%라고 가정할 때, 수분 함량이 10%일 때 검출되는 금속원소의 함량은 완전 건조된 토양보다 약 1~3%가 낮고, 수분 함량이 15%일 때는 23~30%, 수분 함량이 20%일 때는 30~39%로 중금속의 검출량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한, 측정 시간의 길이에

따라 1분간 측정할 경우 측정 오차가 30%이하로 줄어들고, 2분간 측정할 경우에는 측정 오차가 20% 이하로 줄어드는 경향을 보였다. 따라서 본 연구에서는 수분 측정기를 이용하여 측정 지점의 토양내 수분 함량이 10% 이하일 때 휴대용 XRF를 이용하여 구리와 납에 관한 함량 분석을 수행하였으며, 각 지점에서의 측정 시간은 2분 이상으로 하였다.

본 연구에서 사용한 휴대용 XRF 장비의 측정 정확도를 확인하기 위하여 미국표준기술연구소에서 제작한 토양표준물질 SRM 2710a의 구리와 납의 함량을 ICP 방법과 휴대용 XRF를 이용하여 측정하고 그 결과를 비교하였다(표 1). 동일한 토양표준물질 시료를 ICP 방법으로 분석한 결과와 휴대용 XRF로 8회 측정한 결과의 평균값을 비교했을 때 오차는 약 1% 정도

TABEL 1. Comparison of Cu and Pb concentrations measured by the ICP method and those by the portable XRF used in this study

Element	ICP(ppm)	Portable XRF(ppm)								Error(%)	
		1	2	3	4	5	6	7	8		Avg.
Cu	3,420	3,448	3,479	3,408	3,416	3,495	3,465	3,485	3,441	3,455	1
Pb	5,520	5,604	5,582	5,515	5,583	5,643	5,580	5,589	5,616	5,589	1

로 나타났다. 따라서 구리와 납의 경우에는 본 연구에서 사용한 휴대용 XRF 장비의 측정 결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다.

### 3. 토양오염지도작성

연구지역의 토양에 대한 정확한 중금속 오염 분포를 파악하기 위해서 가장 확실한 방법은 모든 지점들에 대해 자료를 획득하는 것이다. 그러나 휴대용 XRF를 사용하더라도 연구지역의 모든 지점들에 대한 자료를 획득하는 것은 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 휴대용 XRF로 측정한 구리와 납에 관한 토양 오염도 측정 결과를 공간보간하여 자료가 취득되지 않은 지점들의 값을 예측한 후 그 결과를 바탕으로 토양오염지도를 작성하였다.

본 연구에서는 자료 값의 공간보간을 위해서 대표적인 지구통계학적 기법인 크리깅 기법을 사용하였다. 크리깅은 이미 값을 알고 있는 자료들의 가중선형조합으로 특정 위치에서의 미지의 값을 예측하는 지구통계적 기법이다(Park *et al.*, 2012; Choi, 2013). 이를 식으로 표현하면 다음과 같다(식 1).

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (1)$$

여기서  $z^*$ 는 예측지점에서 크리깅 예측치,  $n$ 은 사용한 자료의 총 수,  $\lambda_i$ 는 각 자료의 가중치,  $z_i$ 는 위치를 알고 있는 자료의 값을 의미한다.

식(1)에서 각 자료의 가중치를 결정하는 방법에 따라 크리깅 기법은 단순크리깅, 정규크리깅, 구역크리깅, 공동크리깅, 일반크리깅 등의 기법으로 세분된다. 부산광산 지역의 구리와 납의 토양오염분포를 조사한 기존의 연구결과(MOE, 2007)를 검토한 결과, 본 연구에서는 연구지역의 구리와 납의 토양오염분포가 약 2차 불변성을 만족하며 특정경향을 나타내지 않는다고 판단하였다. 따라서 자료가 약 2차 불변성을 만족하며 특정경향을 나타내지 않을 경우에 주로 사용되는 정규크리깅(ordinary kriging) 기

법을 공간보간 기법으로 선택하였다. 정규크리깅 기법은 미지의 값을 예측할 때 오차분산을 최소로 하면서 편향되지 않도록 하는 특징이 있다(Jang *et al.*, 2013). 만약 자료가 약 2차 불변성을 만족하지 않으며 특정경향을 나타낼 경우에는 정규크리깅 기법을 사용하는 것이 합리적이지 못하며, 대안으로써 일반크리깅 등과 같은 방법을 사용할 수 있다(Park *et al.*, 2012; Choi, 2013).

## 연구결과

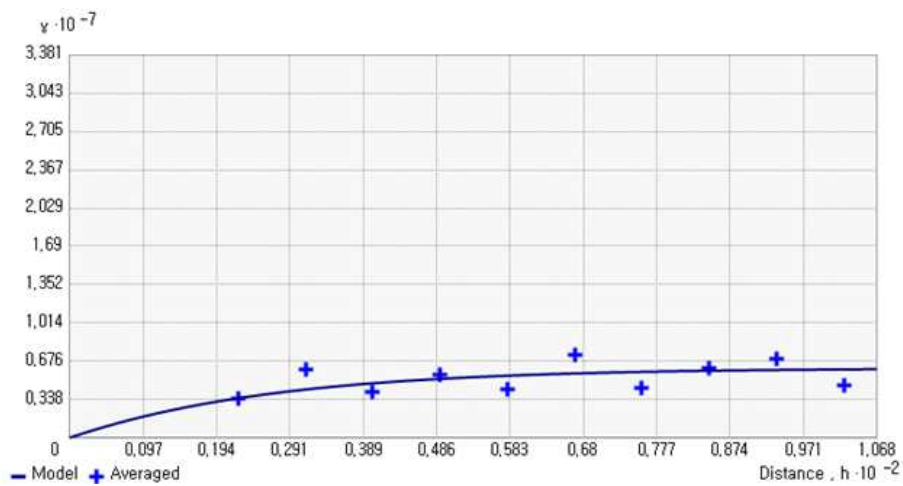
2013년 09월 28일 앞서 제시한 총 24곳의 측정지점에서 휴대용 XRF를 이용하여 구리와 납에 관한 토양 오염도 측정을 실시하였다(표 2). 한 지점 당 수분함량이 10%미만인 토양에 대하여 2분 동안 1회 측정을 실시하였으며, 그 결과 연구지역에서 구리는 최대 8,255ppm, 납은 최대 2,146ppm이 검출되었다. 특히 폐석 및 광미 적치장 주위에서 고농도의 토양오염 물질이 검출되는 것을 확인할 수 있었다.

토양 오염도 측정결과를 ArcGIS 소프트웨어에 입력한 후 토양오염지도를 작성하기 위해 공간보간을 수행하였다. 먼저 측정지점들에서 검출된 오염 물질들 농도의 공간적 상관관계를 파악하기 위해 베리오그램 모델링을 실시하였다(그림 4). 베리오그램 모델은 여러 가지 분리거리(lag distance)조건을 실험하여 선정하였으며, 이방성 테스트 결과 주어진 자료만으로는 뚜렷한 이방성을 찾을 수 없어 등방성 모델을 선택하였다. 구리와 납에 관한 베리오그램 모델링 결과를 정리하면 표 3과 같다. 구리와 납의 베리오그램 모델링 결과 두 모델의 상관거리는 같게 설정되었다.

베리오그램 모델링 결과를 바탕으로 정규크리깅 기법을 이용하여 연구지역의 토양오염지도(해상도 5m)를 작성한 결과는 그림 5와 같다. 연구 지역의 토양오염 물질의 분포 패턴을 분석한 결과 폐석 및 광미 적치장으로부터 지형 경사에 따라 각각 남쪽과 서쪽으로 오염 물질이 확산된 것을 확인할 수 있었다. 오염원의

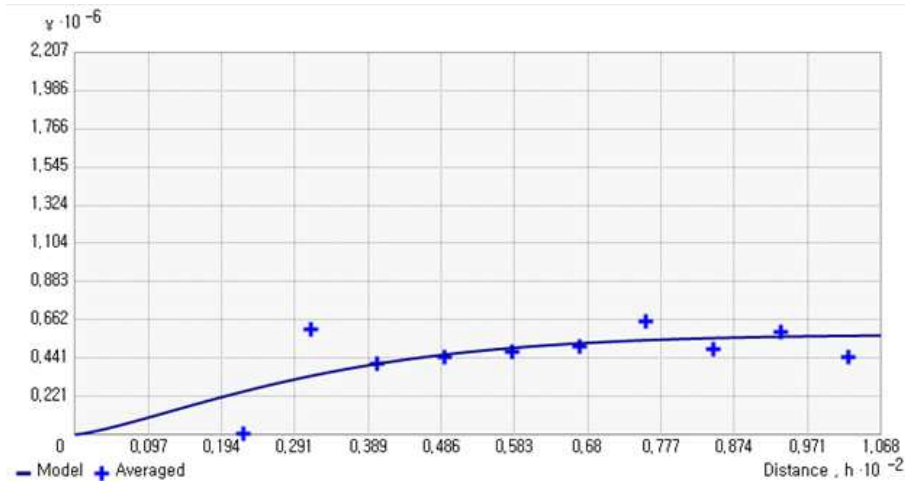
TABLE 2. Results from soil contamination survey using the portable XRF

ID	Latitude	Longitude	Cu(ppm)	Pb(ppm)
1	35.11190528	129.0020244	39	61
2	35.11271393	129.0016322	673	961
3	35.11307702	129.0016231	42	79
4	35.11282726	129.0009992	1,381	515
5	35.11293576	129.0006982	3,694	2,010
6	35.11295449	129.0005443	8,255	2,146
7	35.11330125	129.0001237	2,571	1,131
8	35.11326626	128.9999341	6,261	1,895
9	35.11355075	128.9998981	46	52
10	35.11298609	128.9998772	167	109
11	35.11280433	128.9999156	74	88
12	35.11260895	129.0000942	55	63
13	35.11257048	129.0005718	1,869	556
14	35.11259831	129.0009218	1,738	617
15	35.11313068	128.9996262	4,460	1,292
16	35.11351265	128.9994876	85	197
17	35.11290345	128.9993613	39	45
18	35.11226261	128.9996781	23	70
19	35.11232187	128.9996471	32	74
20	35.11305508	128.9989214	1,980	587
21	35.11202586	128.9997027	21	42
22	35.11284758	129.0000034	33	69
23	35.11158502	129.0005614	390	121
24	35.11133452	129.0012439	40	44



(a)

FIGURE 4. Results from variogram modeling (a) Cu (b) Pb

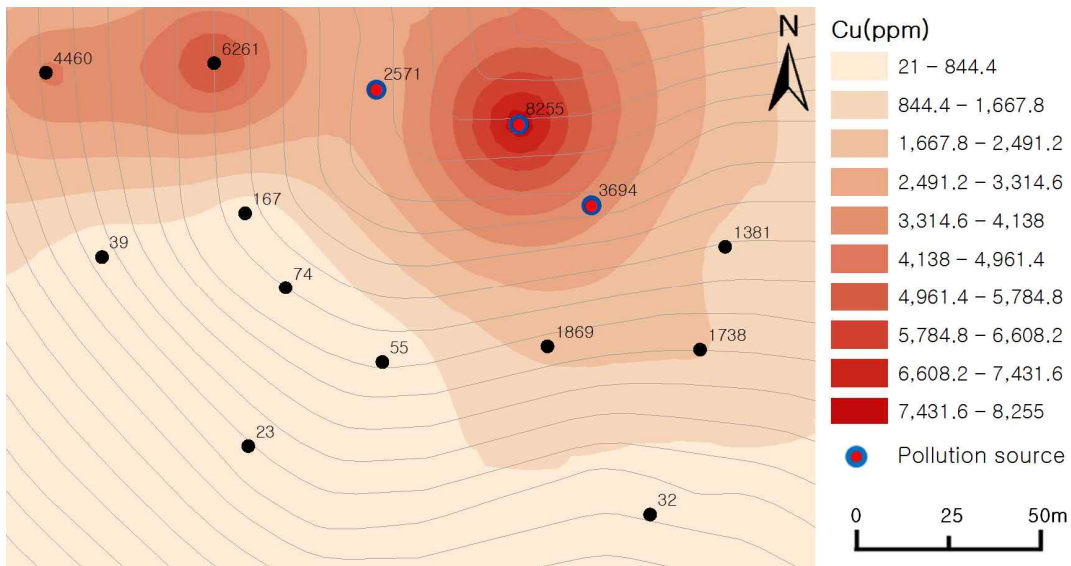


(b)

FIGURE 4. Continued

TABLE 3. Parameters of the variogram models for Cu and Pb

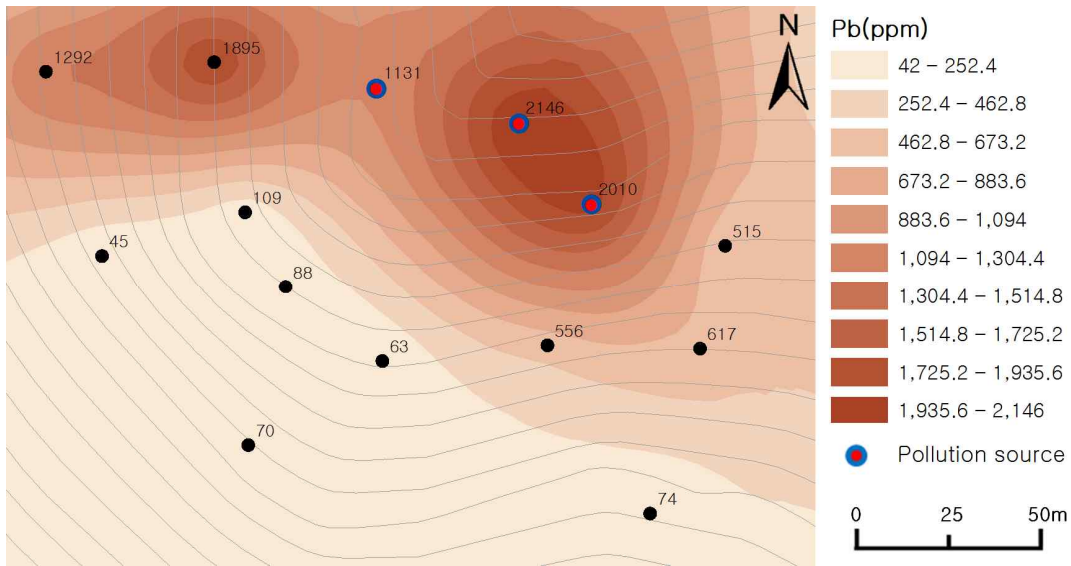
	Model	Sill	Nugget	Range
Cu	Spherical	0.6163	0	0.7846
Pb	Spherical	0.5781	0	0.7846



(a)

FIGURE 5. Soil contamination maps in the study area related to (a) Cu and (b) Pb





(b)

FIGURE 5. Continued

집수구역 외부에 위치한 지역에서는 상대적으로 구리와 납의 오염 농도가 낮게 나타났다. 고농도 오염지역에 대해서는 기존의 ICP 분석법을 병행한 보다 상세한 조사가 필요할 것으로 판단된다.

### 결론

본 연구에서는 부산시 사하구에 위치한 폐금속광산을 대상으로 휴대용 XRF와 GIS를 이용하여 토양오염지도를 작성하였다. 수치표고모형을 이용한 지형분석을 통해 총 24곳의 측정지점을 선정하였으며, 휴대용 XRF를 이용하여 현장에서 토양내 존재하는 구리와 납의 농도를 측정하였다. 그 결과 구리는 최대 8,255ppm, 납은 최대 2,146ppm가 검출되었다. 24곳의 측정결과를 바탕으로 정규크리깅 기법을 이용하여 공간보간을 수행하였으며 구리와 납에 관한 연구지역의 토양오염지도를 작성하였다. 갯구 주변에 위치한 폐석 및 광미 적치장을 중심으로 구리와 납이 고농도로 분포하는 것을 볼 수 있으며 지형경사를 따라 오염 물질이 확산되는

패턴을 확인할 수 있었다.


일반적인 토양오염 조사는 환경부의 기준에 따라 현장에서 샘플을 채취한 후 건조, 분쇄, 체질 등 다양한 시료의 전처리 과정을 거쳐 ICP분석법에 의해 토양의 성분을 분석한다. 그러나 ICP 분석법만을 사용할 경우에는 시간과 비용적인 측면을 고려할 때 많은 지점의 토양오염도 측정 결과를 확보하기 어려운 한계가 있다. 그 결과 자료 수의 부족으로 인해 GIS를 이용한 토양오염지도 작성이 어려울 수 있다. 휴대용 XRF를 이용할 경우 많은 지점에서의 토양 오염도 분석 결과를 효율적으로 확보할 수 있기 때문에 GIS를 이용한 토양오염지도 작성을 보다 수월하게 할 수 있다.

본 연구에서는 부산광산 지역에 대한 사례연구를 통해 휴대용 XRF와 GIS를 이용한 토양오염지도 작성방법이 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 휴대용 XRF를 이용한 방법이 기존의 ICP 분석법을 완전히 대체할 수 있는 것은 아니다. 휴대용 XRF는 현장에서 1차 스크리닝 장비로서 사용되어야 하며 오염 물질이 고농도로 검출된 지역에 대해서는

기존의 ICP 분석법을 함께 사용하여 휴대용 XRF 측정결과의 정확도를 확인하고 토양오염지도를 검증하는 작업이 필요할 것이라 판단된다.

토양오염지도 작성시 사용된 크리깅 결과에는 불확실성 또는 오차가 반드시 수반되기 때문에 크리깅 결과의 신뢰성 분석에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한, 본 연구에서는 정규 크리깅 기법만을 적용했으나 향후 연구에서는 지시자 크리깅(indicator kriging)과 같은 기법의 적용 가능성에 대해서도 검토할 필요가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)의 지원으로 수행되었다. 

### REFERENCES

- Carr, R., C. Zhang, N. Moles and M. Harder. 2008. Identification and mapping of heavy metal pollution in soils of a sports ground in Galway City, Ireland, using a portable XRF analyser and GIS. *Environmental Geochemistry and Health* 30:45-52.
- Choi, J.K. 2013. *Geostatistics*. Sogma Press. Seoul. Korea. pp.133-218 (최종근. 2013. 지구통계학. 시그마프레스. 서울. 대한민국. 133-218쪽).
- Choi, Y., H.D. Park and C. Sunwoo. 2006. Control of open-pit mine drainage for mine reclamation using geographic information systems. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering* 43(5):429-438 (최요순, 박형동, 선우춘. 2006. 광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화. 한국지구시스템공학회지 43(5):429-438.).
- Choi, Y., S. Oh, H.D. Park, H.H. Kwon, S.H. Yoon, and W.R. Go. 2009. Development of a GIS based decision support system for planning the reforestation at abandoned coal mines. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering* 46(6):691-702 (최요순, 오승찬, 박형동, 권현호, 윤석호, 고와라. 2009. 폐탄광 지역 산림훼손지 복구를 위한 GIS 기반의 의사결정지원시스템 개발. 한국지구시스템공학회지 46(6):691-702).
- Higuera, P., R. Oyarzun, J.M. Iraizoz, S. Lorenzo, J.M. Esbri and A. Martinez-Coronado. 2012. Low-cost geochemical surveys for environmental studies in developing countries: testing a field portable XRF instrument under quasi-realistic conditions. *Journal of Geochemical Exploration* 113:3-12.
- Hou, X., Y. He and B.T. Jones. 2004. Recent advances in portable X-ray fluorescence spectrometry. *Applied Spectroscopy Reviews* 39(1):1-25.
- Jang, M., S.J. Choi and Y.C. Lim. 2008. Assessment of applicability of portable X-ray fluorescence for the rapid analysis of soil contamination in the vicinity of abandoned metallic mines. *Mine Reclamation Technology* 2(1):102-111 (장민, 최승진, 임영철. 2008. 폐금속 광산지역의 신속한 토양오염 조사를 위한 휴대용 XRF의 적용성 평가. 광해방지기술 2(1):102-111).
- Jang, M. and Y. Choi. 2013. Assessment of wave power potential in the Kangwon and Dongnam regions, Korea. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 16(4):91-105 (장미향, 최요순. 2013. 강원권 및

- 동남권 지역의 파력발전 잠재성 평가. 한국 지리정보학회지 16(4):91-105).
- Kalnicky, D.J. and R. Singhvi. 2001. Field portable XRF analysis of environmental samples. *Journal of Hazardous Materials* 83:93-122.
- Kim, S.M., Y. Choi, H.D. Park, H.H. Kwon, S.H. Yoon and W.R. Go. 2011. Analysis of mine leachate transport pathway on the surface using GIS. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering* 48(5):560-572 (김성민, 최요순, 박형동, 권현호, 윤석호, 고와라. 2011. GIS를 이용한 광산폐기물 침출수의 지표 이동경로 분석모델 개발. 한국지구시스템공학회지 48(5):560-572).
- Kim, S.M., Y. Choi, H.D. Park and T.H. Kim. 2012a. Prediction of mine leachate pathway by considering divergent flow of surface runoff. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering* 49(6):736-745 (김성민, 최요순, 박형동, 김태혁. 2012a. 지표수의 확산 흐름을 고려한 광산 침출수 유출경로 예측. 한국지구시스템공학회지 49(6):736-745).
- Kim, S.M., Y. Choi, J. Suh, S. Oh, H.D. Park and S.H. Yoon. 2012b. Estimation of soil erosion and sediment yield from mine tailing dumps using GIS: a case study at the Samgwang mine, Korea. *Geosystem Engineering* 15(1):2-9.
- Kim, S.M., Y. Choi, J. Suh, S. Oh, H.D. Park, S.H. Yoon and W.R. Go. 2012c. ArcMine: a GIS extension to support mine reclamation planning. *Computers & Geosciences* 46(9):84-95.
- Lee, Y.K., S.C. Park and K.S. Lee. 2003. Flood runoff analysis of small river basin using geographic information system. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 6(1):24-36 (이연길, 박성천, 이관수. 2003. 지리정보시스템을 이용한 소하천유역의 홍수유출 해석. 한국지리정보학회지 6(1):24-36).
- MOE. 2007. Soil contamination assessment report in abandoned metallic mines. Gwachun, Kyunggi, Korea. pp.973-987 (환경부. 2007. 폐금속광산 토양오염실태 정밀조사 보고서. 과천. 대한민국. 973-987쪽).
- MOE. 2009. The Korean standard test (KST) methods for soils(in Korean). Gwachun, Kyunggi, Korea. 296pp (환경부. 2009. 토양오염공정시험. 과천. 대한민국. 296쪽).
- Park, H.J., H.S. Shin, Y.H. Roh, K.M. Kim and K.H. Park. 2012. Estimating forest carbon stock in Danyang using kriging methods for aboveground biomass. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1):16-33 (박현주, 신휴석, 노영희, 김경민, 박기호. 2012. 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림 탄소저장량 추정. 한국지리정보학회지 15(1):16-33).
- Radu, T. and D. Diamond. 2009. Comparison of soil pollution concentrations determined using AAS and portable XRF techniques. *Journal of Hazardous Materials* 171:1168-1171.
- Son, J., Y. Choi, H.D. Park and W.R. Go. 2014. GIS-based decision support model for establishing promotion policy of abandoned mining areas with considering local characteristics. *Journal of the Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers* 51(1):

- 41-54 (손진, 최요순, 박형동, 고와라. 2014. 지역 특성을 고려한 폐광지역 진흥정책 수립을 위한 GIS 기반의 의사결정지원모델 개발. 한국자원공학회지 51(1):41-54).
- Tolner, M., E. Vaszita and K. Gruiz. 2010. On-site screening and monitoring of pollution by a field-portable x-ray fluorescence measuring device. Proceedings of the Consoil 2010 Conference. Salzburg, Austria. Sep. 22-24 (ISBN 978-3-00-032099-6). **KAGIS**