



까지 529개소에 대해 정밀조사를 실시하였다[22].

최근 휴폐광산에 대한 복원대책으로 일부 민원이 발생되고 있는 지역을 중심으로 중금속에 의한 토양오염복원노력을 하고 있다. 그러나 정량적이고 과학적인 방법과는 거리가 먼 단순 토목공사에 의한 광미의 차단정도에 불과하다[11]. 또한, 폐광된 광산들은 채광 당시 필요했던 모든 장비들을 그대로 방치한 채 갱 입구만 단순히 폐쇄시키기 때문에 지하수의 오염이 가중되고[15] 채광시 산사면에 버려진 폐석과 광미들이 강우시 빗물과 반응하여 다량의 강한 산성배수(acid mine drainage)를 발생시킬 수 있다. 따라서 주변 지하수와 하천수는 물론 인근 농토 및 임야 등이 오염될 가능성이 있어 이에 따른 대책마련이 시급하다. 무엇보다 광산활동으로 인해 발생하고 있는 환경오염은 사회적인 문제로 대두되고 있으며 광산부지내 중금속 오염정도에 대한 현황 파악은 매우 절실한 상태이다.

그러므로 본 연구의 목적은 강원광산으로부터 획득한 토양 자료를 바탕으로 중금속 오염 분포 양상을 공간학적 통계기법을 활용하여 살펴보고 그 특징을 파악하고자 한다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1 연구대상지역

강원(동원)광산은 강원도 정선군 동면 물운리에 위치해 있으며 공간적 경위도 영역은 북위 37°19' 1.16"N과 동경 128°48'37.58"E이다 (Fig. 1). 강원광산은 금과 은 등의 광물자원이 풍부하여 일제시대부터 개발되어 왔으나 광물의 채산성이 약화됨에 따라 1993년 폐광되었다. 현장조사결과 오랜시간 폐광이 되었음에도 불구하고, 광미와 폐석더미가 그대로 방치되어 있으며 1.5km 떨어진 거리에는 사금 채취장이 위치해 있었다. 특히, 갱구 상단부의 일부가 지속적으로 무너져 내리고 있어 추후 갱구 붕락으로 인한 추가 피해가 우려되었으며 갱내수 유출 현상도 상당부분 진행되고 있었다[23].

대상지역의 총면적은 1,505ha(15.05km<sup>2</sup>)이며 전체면적의 89.4%(1,346ha)가 대부분 임지이고 10%미만은 경작지로 나타났다. 표토 토성은 미사질양토(silt loam)로 일반지역보다 높은 수준으로 표토의 침식이 넓은 면적에 발생한 것으로 조사되었다. 또한 연구대상지역의 지질은 풍촌석회암층군으로 나타났다.

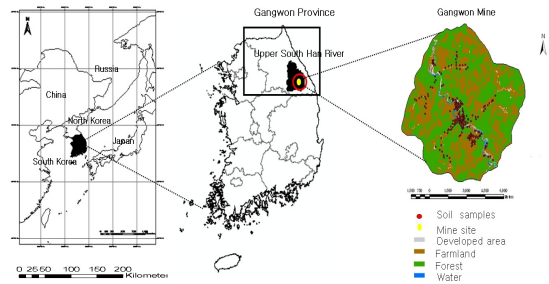


Fig. 1. Map of location of the mine sites

### 2.2 기상조건

강원광산의 주변하천으로는 한강수계 남한강 중상류 유역(중권역), 오대천함류(단위유역) 그리고 어천상류(표준유역)가 흐르고 있고 지형적으로 태백산에 이르는 백두대간 서부의 남부 태백산지로 인하여 경사가 일반 지역보다 높아 유출량이 많으며 유량변동이 큰 편이다. 예를 들어, 연 평균 강수량(1989년~2008년)은 1,378mm로 나타났으며 당해 연도(2008년)연구기간과 동일한 시기(1월~10월)의 강수량은 연 강수량의 약 95%인 1,314mm로 조사되었다. 따라서 수도권을 포함한 서부 저지대보다 약 20%정도 이상이 많은 다우지이며 대부분 산지로 둘러싸여져 있다. 따라서, 폐석 더미에 포함되어 있는 각종 중금속이 침출수를 타고 흘러내려 산사태의 원인이 되는 산림훼손[18] 문제를 야기시킬 수 있으며 토양과 하천오염 그리고 지반침하 등의 문제도 일으킬 수 있다.

### 2.3 시료채취 및 분석방법

중금속 분석은 Cd, Pb, Cu, Ni, Zn, As, Hg, 그리고 Cr<sup>6+</sup> 등 8개의 항목에 대해 실시하였다. 그 외 토성은 비중계법[4]을 이용하였으며 토양의 수소전위(pH)는 토양오염공정시험분석법을 적용하여 풍건토 5g에 물 25ml를 가한 후 pH meter(Orion, USA)를 사용하여 측정하였다[24]. 토양에 함유된 중금속원소의 측정은 공정시험법에 의거한 중금속 추출 전처리법을 적용하였다. 예를 들어 Cd, Cu, Pb는 건조 토양 5g에 0.1 N HCl 25ml(As 경우 1N HCl)를 가한 후 30°C에서 1시간(100회/분, 진폭 10cm)동안 진탕 한 후 여과하여 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer)로 분석하였다. Ni, Zn는 왕수시험법으로 하여 중금속을 추출

하여 ICP-OES로 분석하였다. 또, 토양 중 Hg 농도 분석은 토양오염공정시험방법에 준하여 전처리한 시료를 환원기화 장치가 장착된 원자흡광분석장치를 이용하여 253.7nm에서 측정하고 미리 작성한 검량선으로부터 수은의 양을 구하여 함량(mg/kg)을 산출하였다. As의 총 농도는 왕수법(HNO<sub>3</sub>: HCl=1:3)을 전처리법으로 하여 추출한 후 ICP-OES와 GFAAS(Graphite furnace atomic adsorption spectrometry)로 측정하였다.

## 2.4 시료채취지점

시료 채취지점은 표토와 심토를 구분하여 채취하였다. 표토는 토양 유기물 층을 제거하고 10cm 이내 깊이로 하였고 심토는 10cm-1m(암반층)까지의 유효 토심을 대상으로 하였다. 표토 시료는 우려기준 초과 예상지역을 선정하여 1,500m<sup>2</sup>당 1개 지점에서 채취하고 심토 중 10-30cm 깊이 시료는 표토 시료 수 3개 지점당 1개 지점의 비율로, 깊이별 시료(30-60cm, 60-100cm)는 표토 시료수 6개 지점당 1개 지점의 비율로 채취하였다.

광산에서 시료 채취는 광산지역 특성에 따라 거리별 조사지점수를 조정(Fig. 2)하였으며 심토는 농경지 토양을 위주로 하였다. 토양 시료 채취시, 특이 지점인 광미 및 선광장에서는 광미시료 1점과 광미적치장 내 토양 표토 1점, 심토 1점을 최소 시료 단위로 각 지점의 면적을 고려하여 시료수(조사밀도)를 증가시켜 채취하였다. 거리별 시료수는 폐광 하류방향 500m 이내 지점에서 표토 10점, 심토 5점, 하류방향 500-1km지점권역에서 표토 10점, 심토 5점과 하류방향 1-2km권역에서 표토 6점을 채취하였다. 또한, 대조군 토양으로 하류방향으로 2 km이외의 권역에서 3점을 채취하였다.

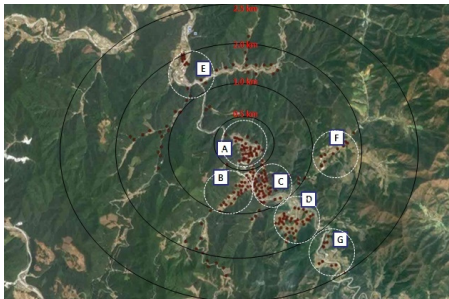


Fig. 2. The range of study areas for clusters in the Gangwon mine

## 2.5 지구통계분석

크리깅은 공간통계에서 남아프리카공화국의 광산 기술자인 Krige(1951)[2]에 의해 금광산에서 얻은 표본자료를 가지고 새로운 광상의 분포를 추정하기 위하여 개념이 제안되었고 후에 프랑스의 지질학자인 Matheron(1963)[3]에 의해 발전되었다.

Matheron은 예측오차를 최소화 하면서 알려진 주위값들의 가중선형조합으로 미계측지점의 미지값을 예측하는 기법을 개발하여 크리깅이라 명하였다[3]. 크리깅을 하기 위해서는 두 지점간의 떨어진 거리에 대한 공간 자료의 분산(variance)이 제공되어야 한다. 그러므로 공간상 분포하는 자료의 연속성은 반베리오그램(semivariogram)으로 나타내는데 여기서 베리오그램이란 일정거리 h만큼 떨어진 두 자료들간의 차이를 제공한 것의 기댓값[20]으로 정의된다(수식1).

$$\gamma(h, \alpha) = \frac{1}{2N(h, \alpha)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

$\gamma(h, \alpha)$  = 지연 거리(lag distance) 혹은 분리 벡터(separation vector, h) 그리고 이러한 요소들의 방향(direction,  $\alpha$ )의 함수인 반베리오그램,  $N(h, \alpha)$  = 거리(h)와 방향( $\alpha$ )의 자료 쌍 개수,  $Z(X_i)$  = 임의의 위치 ( $X_i$ ) 에서의 자료값을 의미한다. 즉, 광산에서 관측한 자료로부터 식(1)을 적용하여 얻어진 것을 경험적 베리오그램(empirical variogram)이라고 한다. 그러나 자료로부터 추출한 경험적 베리오그램을 그대로 사용하기 어렵기 때문에 일정한 형상으로 표현되는 이론적 베리오그램을 널리 사용한다[17]. 이론적 베리오그램은 경험적 베리오그램을 통하여 계산된 거리와 베리오그램의 공간적 상관관계를 이상적으로 표현하여 상수를 결정하는데 이들 상수를 너깃(nugget), 문턱값(sill), 상관거리(range or correlation length)라 한다. 각 용어에 대한 정의는 Ersoy[1]와 Hoftmann[10] 등에 잘 나타나 있다. 이론적 베리오그램의 종류에는 여러 가지가 있으나 대표적인 모델로 수식 2, 3, 4와 같이 구형모델(spherical model), 지수모델(exponential model), 가우시안모델(gaussian model) 등이 많이 사용된다[10].

구형모델

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 < h \leq a \\ C_0 + C, & h = 0 \end{cases} \quad (2)$$

지수모델

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right], & h > 0 \\ C_0 + C, & h = 0 \end{cases} \quad (3)$$

가우시안모델

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right], & h > 0 \\ C_0 + C, & h = 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $C_0$ 는 너깃(nugget) 효과,  $C_0+C$ 는 문턱값(sill)이고  $a$  는 상관거리이다. 너깃은 덩어리라고도 불리워지면 일반적으로 거리  $h=0$ 이면 두 변수의 차의 분산으로  $\gamma(0)=0$ 이 되어야 한다. 그러나 자료에 따라서는  $h$ 가 “0”에 가까워질때 “0”으로 수렴하지 않는 경우가 있다. 이러한 경우를 너깃 효과라고 한다[14].

크리깅 개념은 표본지점들간의 Z값(식5)과 이들 지점들 간의 거리에 대한 평균 분산의 차이를 베리오그램(variogram)으로 나타내고 이러한 베리오그램을 토대로 하여 실측되지 않은 지점에 대한 Z값을 추정하는 것이다[6, 25]. 가장 많이 사용되고 있는 정규크리깅(ordinary Kriging)은 관심지점에서의 값을 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위값들의 선형조합으로 식5와 같이 미지 값을 예측할 수 있다.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n_0} \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

$Z^*(x_0)$ 는 위치가 알려진  $x_0$  지점에서의 예측값,  $Z(x_i)$ 는 위치  $x_i$ 에서  $Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n_0} \lambda_i Z(x_i)$ 의 기지의 자료값,  $\lambda_i$ 는 자료값  $Z(x_i)$ 의 가중치를 의미한다. 일반적으로 크리깅기법은 주어진 공간 자료 분포 특성에 따라 다양하다.

### 2.6 연구방법

본 연구에서는 다변량 통계분석방법 중 하나인 주성분 분석(Principal Component Analysis)을 적용하였고, 중금속 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Zn, Ni 이 분석에 이용되었다. 가용된 소프트웨어로는 SAS 8.2(SAS Institute Inc, USA), SPSS 12.0(LEAD Technologies, USA), S-PLUS 6.2(Insightful corp., USA)를 통하여 통계분석에 이용하였으며 예측된 공간 분포 패턴은 ArcGIS 9.3(ESRI, USA)을 이용하여 분석하였다(Fig.3). 또, 크리깅(Kriging)을 실시하기 전 자료의 경험적 분포 패턴을 파악하기 위해서 탐색적 공간자료 분석(ESDA, Exploratory Spatial Data Analysis)을 수행하였으며 모델검증은 교차검증법을 이용하여 평균 절대 오차(mean absolute error: MAE), 평균 제곱 오차(mean square error: MSE) 및 편향 (bias)으로 예측능력을 산출하였다.

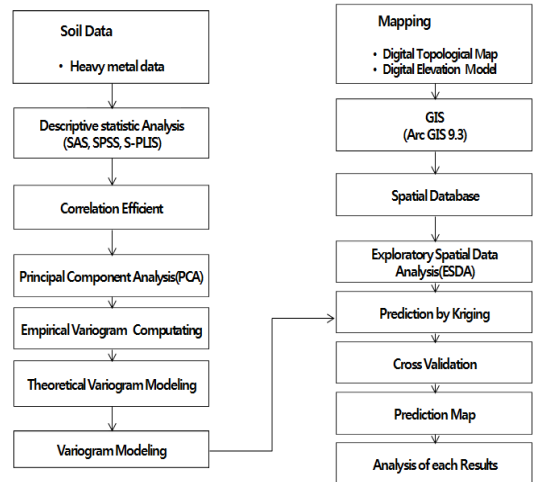


Fig. 3. The flow structure of study method

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [I^*(\mu_i; z_k) - I(\mu_i; z_k)] \quad (6)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I^*(\mu_i; z_k) - I(\mu_i; z_k)| \quad (7)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [I^*(\mu_i; z_k) - I(\mu_i; z_k)]^2 \quad (8)$$

여기서,  $I^*(\mu_i; z_k)$  는  $i$  번째 지점의 위치에서 측

정된 실제자료값이고  $I(\mu_i; z_k)$  는  $i$  번째 자료를 제외한 자료를 이용하여 얻은  $i$  번째 자료값의 예측값을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 기술적 통계

원자료의 비소(As)와 니켈(Ni)농도는 표토와 심토 전체 구역에서 환경부 토양오염기준 중 우려기준과 대책기준을 초과하였고 아연(Zn)도 마찬가지로 토양오염 우려기준을 상회하였다. 또한, 각 성분별 농도분포를 알아보기 위하여 계급간 누적분포도(histogram)를 수행하였다. 그 결과 Ni, Zn, As, Hg에서 왜도(skewed)가 왼쪽으로 편향된 특징을 보여주었다(Table 1). 이것은 주로 광산활동으로 인한 중금속 원소가 다른 원소보다 상대적으로 높은 농도로 오염이 심화되어 있음을 지시하는 것이다. 따라서 이러한 중금속에 대하여 정규분포화를 취해주기 위해 로그화를 하였다.

Table 1. Descriptive statistics data by soil depth at the Gangwon mine (unit:mg/kg)

| Heavy Metals | Soil depth 10cm(Top) |       |      |        | Soil depth 60cm(Sub) |       |      |        |
|--------------|----------------------|-------|------|--------|----------------------|-------|------|--------|
|              | Mean                 | Max   | Min  | Skewed | Mean                 | Max   | Min  | Skewed |
| pH           | 6.6                  | 8.5   | 4.0  | -0.25  | 6.5                  | 8.6   | 4.3  | -0.19  |
| Cd           | 0.1                  | 0.5   | 0.0  | -0.37  | 0.1                  | 0.7   | 0.0  | 3.86   |
| Pb           | 1.5                  | 12.4  | 0.0  | 2.52   | 1.6                  | 17.1  | 0.0  | 3.65   |
| Cu           | 2.1                  | 15.5  | 0.0  | 2.27   | 2.3                  | 22.3  | 0.0  | 3.49   |
| Ni           | 28.2                 | 426.8 | 9.0  | 9.67   | 30.5                 | 970.3 | 6.3  | 13.34  |
| Zn           | 70.6                 | 324.5 | 23.5 | -0.01  | 73.9                 | 436.0 | 20.8 | 4.86   |
| As           | 2.5                  | 101.2 | 0.0  | 8.85   | 2.4                  | 136.2 | 0.0  | 10.63  |
| Cr           | 0.2                  | 2.1   | 0.0  | 2.91   | 0.2                  | 0.8   | 0.0  | 1.41   |
| Hg           | 0.0                  | 0.9   | 0.0  | 5.83   | 0.1                  | 1.4   | 0.0  | 6.75   |

#### 3.2 주성분 분석

##### 3.2.1 표토

주성분 분석을 통해 산출된 3개의 주성분은 전체 분산의 63.53%를 설명해 주었다(Table 2). 여기서, 31.52%를 설명하고 있는 주성분 1(PC1)은 고유값(Eigen Value)이 가장 높았으며, 주성분 2와 3(PC2, PC3)은 각각 19.67%, 12.33%를 설명하였고, 고유값은 1.968, 1.233로 나타났다. 그러므로 본 연

구에서는 적재값이 높은 주성분 1(PC1)과 주성분 2(PC2)를 대표값으로 사용하였다. 또한, 주성분 점수(Score)는 각 중금속의 특성을 이해하고 크리깅 분석을 위한 공간자료로 이용되었다(Table 3).

주성분 1(PC1)은 Cu, Cr, Cd, Pb에 대하여 적재(loading)값이 높았으며 이에 따른 각각의 중금속에 대한 주성분 점수는 0.35, 0.27, 0.25, 0.23으로 나타났다. 반면 pH와 고도에 대해서는 -0.218, -0.142로 음의 값을 보였다. McBride et al(1997)의 연구 결과에 의하면 구리는 토양층내에서 쉽게 침출(leached)되지 않고 표면층(표토)에도 축적되는 경향을 보인다고 하였다[7]. 특히, 6가크롬의 경우 독성을 가지고 있기 때문에 토양내 쉽게 이동하거나 암석층에 흡착하는 성질이 있다[9]. 따라서 주성분 1은 고도에 의한 자연적인 영향보다 광산으로 인한 인위적인 오염에 의해 토양과 암석층에 축적되어 중금속 성분이 증가했음을 함축하고 있다.

주성분 2(PC2)는 Zn, Cd, Hg, As에 대하여 높은 양의 적재값을 가졌고 상대적으로 Pb과 Cu, 그리고 Cr은 음의 적재값을 보였다(Table 2). Zn의 적재값(0.21)이 높은 이유는 소유역에서 하천의 혼합에 의한 영향이 크기 때문이다. 또한, pH가 높은 적재값을 가진다는 것은 중금속 농도가 증가할수록 산성화가 되어가고 있다는 것을 의미하며 전반적으로 이러한 결과는 광산활동으로 인한 인위적인 오염이 진행되어 왔음을 시사하고 있다. 카드뮴은 점토층에서 농도가 넓게 분포하는 성질이 있으며 석회질 토양층에도 축적되는 경향[2]이 있어 일반적으로 토양

Table 2. Total variance explained in the topsoil at the Gangwon mine site

| Component | Initial Eigenvalues |               |                | Extraction Sums of Squared Loadings |               |                |
|-----------|---------------------|---------------|----------------|-------------------------------------|---------------|----------------|
|           | Total               | % of Variance | Cumulative (%) | Total                               | % of Variance | Cumulative (%) |
| 1         | 3.15                | 31.52         | 31.52          | 3.15                                | 31.52         | 31.52          |
| 2         | 1.96                | 19.67         | 51.20          | 1.96                                | 19.67         | 51.20          |
| 3         | 1.23                | 12.33         | 63.53          |                                     |               |                |
| 4         | 0.94                | 9.42          | 72.95          |                                     |               |                |
| 5         | 0.86                | 8.60          | 81.55          |                                     |               |                |
| 6         | 0.61                | 6.13          | 87.69          |                                     |               |                |
| 7         | 0.53                | 5.33          | 93.02          |                                     |               |                |
| 8         | 0.28                | 2.87          | 95.90          |                                     |               |                |
| 9         | 0.25                | 2.53          | 98.43          |                                     |               |                |
| 10        | 0.15                | 1.56          | 100.00         |                                     |               |                |

Table 3. The component score coefficient by PCA

|           | Component |        |
|-----------|-----------|--------|
|           | 1         | 2      |
| pH        | -0.218    | 0.336  |
| Cd        | 0.253     | 0.308  |
| Pb        | 0.232     | -0.256 |
| Cu        | 0.359     | -0.004 |
| Ni        | 0.020     | 0.079  |
| Zn        | 0.107     | 0.431  |
| As        | 0.062     | 0.085  |
| Cr        | 0.279     | -0.071 |
| Hg        | 0.181     | 0.232  |
| Elevation | -0.142    | 0.133  |

타입(type)과 모재(parent materials)에 따라 다양하다. 무엇보다 현장조사결과 이 지역의 지층은 조선누층군의 캄브리아-오르도비스기의 석회암으로 구성되어 있다. 따라서 카드뮴이 오염토양내 쉽게 흡착할 수 있음을 알 수 있다.

3.2.2 심토

심토의 경우 주성분 분석결과 3개의 주성분이 전체분산의 50.11%를 설명해 주었다(Table 4). 즉, 주성분 1, 2, 3(PC1, PC2, PC3)은 각각 전체분산의 20.97%, 18.62%, 10.51%를 차지하였으며 고유값은 2.097, 1.863, 1.051로 나타났다. 주성분 점수에서 주성분 1(PC1)은 Zn, Ni, Cd이 양의 값으로 높게 적재되었고 주성분 2(PC2)는 Cd, Zn, Hg이 높게 적재되었다(Table 5). 반면 상대적으로 니켈(Ni)은 -0.053으로 음의 값을 보였다. 따라서 심토는 표토에 비해 광산으로 인한 영향력이 다소 적었으나 여전히 아

Table 4. Total variance explained in the subsoil at the Gangwon mine site

| Component | Initial Eigenvalues |               |              | Extraction Sums of Squared Loadings |               |                |
|-----------|---------------------|---------------|--------------|-------------------------------------|---------------|----------------|
|           | Total               | % of Variance | Cumulative % | Total                               | % of Variance | Cumulative (%) |
| 1         | 2.09                | 20.97         | 20.97        | 2.09                                | 20.97         | 20.97          |
| 2         | 1.86                | 18.62         | 39.59        | 1.86                                | 18.62         | 39.59          |
| 3         | 1.05                | 10.51         | 50.11        |                                     |               |                |
| 4         | 1.02                | 10.21         | 60.32        |                                     |               |                |
| 5         | 0.96                | 9.66          | 69.98        |                                     |               |                |
| 6         | 0.85                | 8.52          | 78.51        |                                     |               |                |
| 7         | 0.72                | 7.21          | 85.72        |                                     |               |                |
| 8         | 0.62                | 6.20          | 91.92        |                                     |               |                |
| 9         | 0.42                | 4.29          | 96.22        |                                     |               |                |
| 10        | 0.37                | 3.78          | 100.00       |                                     |               |                |

Table 5. The component score coefficient by PCA

|           | Component |        |
|-----------|-----------|--------|
|           | 1         | 2      |
| pH        | -0.342    | 0.052  |
| Cd        | 0.074     | 0.433  |
| Pb        | -0.307    | 0.026  |
| Cu        | -0.289    | 0.260  |
| Ni        | 0.076     | -0.053 |
| Zn        | 0.217     | 0.375  |
| As        | -0.009    | 0.089  |
| Cr        | -0.271    | 0.129  |
| Hg        | 0.004     | 0.330  |
| Elevation | -0.224    | -0.044 |

연과 니켈과 같은 성분이 하천에 잔존하고 있었다는 것을 알 수 있었다.

표토에서 나타난 주성분 1(PC1)과 달리 심토에서의 주성분 1은 구리, 크롬, 그리고 납성분이 모두 높은 음의 적재값(<-0.27)을 가졌다. 또한, 주성분 2(PC2)는 카드뮴, 아연, 수은에 대하여 높은 적재 성분 점수(>0.3)을 나타냈다. pH의 경우 양의 적재값(0.052)을 가졌고 니켈은 음의 적재값을 보였다. 전반적으로 아연, 니켈, 카드뮴, 수은이 양의 적재값을 가졌으며 비소도 -0.009로 같은 성분 범주에 속하였다. 이는 토양 연령이 오래되어 이러한 구리, 크롬, 납과 같은 중금속의 영향을 덜 받고 지질매체내 머물러 있거나 아연, 니켈, 카드뮴, 수은등의 중금속이 표토내 흡착 되었기 때문이라고 풀이된다.

3.3 베리오그램에 따른 공간적 구조

베리오그램 분석 결과 D그룹에서 공간자기상관계가 높게 나타났으며 베리오그램의 이론적모델로 구형(Spherical)모델이 적합하게 모의되었다(Fig. 4). 전체 중금속 중, 비소(As)와 구리(Cu)성분에서 높은 자기상관계를 보였으며 이외 다른 그룹에서는 공간적 분산 구조가 형성되지 않았다. 이러한 이유는 공간상에 표본자료가 2차 정상성(Stationary)을 만족하지 못했으며 임의의 두 자료값들 사이의 분산이 거리와 방향에 따라 상관 관계가 없기 때문이다. 그 이유는 오염부지에서 중금속의 공간적 분포가 불균질[10]할 뿐만 아니라 토양은 매우 복잡한 구조를 가지고 있어 공간변이가 토양의 성질 그리고 주변 지리 환경과 인간에 의한 활동(광산)등에 의해 다양한 영향을 받았기 때문이라고 판단된다.



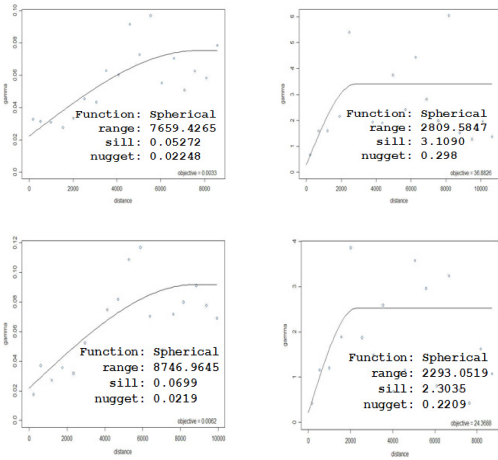


Fig. 4. The results of semi-variogram

분석 결과 비소(As)의 경우 물리적으로 의미를 가지는 상관거리(range)는 표토에서 7,659.42m, 심토에서 8,746.96m로 나타나 지속적으로 비소의 농도가 증가하고 있다는 것을 알 수 있었다. 반면, 구리(Cu)는 상관거리가 비소에 비해 다소 짧았다. 즉, 표토에서는 2,809.58m, 심토에서는 2,293.05m의 상관거리를 각각 보였다. 이러한 이유는 강원광산을 기점으로 거리가 멀어질수록 바람과 물의 이동 그리고 중력에 의해 인근 농경지나 임야 등에서 중금속에 의해 일부 오염이 진행되고 있음을 간접적으로 지시하고 있는 것이다.

### 3.4 크리깅에 의한 공간 분포 예측

#### 3.4.1 주성분

주성분에 의한 크리깅 분석 결과, 주성분 1(PC1)의 경우에는 표토에서 연구대상지역으로부터 중남부방향으로 구리와 크롬의 농도가 높은 값을 가졌다(Fig. 5). 이는 일제시대 탄광촌이 있었던 자리로 광산활동에 의한 오염이 주된 인자임을 알 수 있었다. 주성분 2(PC2)는 공간분포 패턴이 모래시계 형태로 북부와 남부지역에서 카드뮴, 수은, 비소와 같은 중금속의 농도가 점진적으로 증가할 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수은과 비소 성분이 토양광물 표면에 흡착하는 성질[1]이 있고 정북방향으로 하천(어천 하류)이 흐르고 있기 때문에 빗물이나 바람에 의해 이동할 수 있다는 것을 복합적으로 지시하고 있다. 특히, 표토에 비해 암반층 심토에서의 주성분 2(PC2)는 중남부 주변에서 카드뮴과 수은

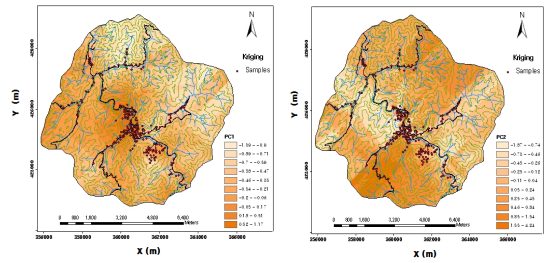


Fig. 5. Map of kriging at the topsoil

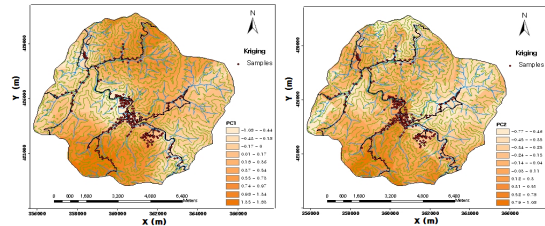


Fig. 6. Map of kriging at the subsoil

함량의 농도가 높았다(Fig. 6). 반면, 주성분 1(PC1)은 정남쪽에서 정북방향으로 향해 아연과 니켈성분이 확산될 것으로 추정되었다. 이는 강원광산 인근 주변에서 아연과 니켈과 같은 다양한 금속이 채굴되었음을 간접적으로 시사하고 있고, 폐탄광 방치로 오랜시간 광물찌꺼기 및 폐석이 강우에 의해 표토뿐만 아니라 암반층 심토까지 토양오염이 가중되었기 때문이라고 풀이된다.

#### 3.4.2 클러스터

비소의 경우 서북지역에서 농도 값이 높게 나타났다(0.83mg/kg). 그러나 환경부에서 제시한 토양오염기준치보다 낮았고 심각한 수준은 아니었다. 또, 구리는 강원도 정선군 물운리지역 주변을 대상으로 최대 농도값이 6.2mg/kg로 나타났으며 정동방향으로 오염이 확산되고 있었다(Fig. 7). 비록 이 두 개의 중금속 함량 농도가 환경부에서 제시한 토양오염기준치보다 낮다 하더라도 비소의 경우 발암성 물질로 지정되어 있을 뿐만 아니라 독성을 가지고 있기 때문에 안전하다고 단언하기는 어렵다.

따라서, 정책당국자들은 이 지역에 대한 위해성평가를 시행하여 관리방안을 조속히 수립하여야 하며 환경영향평가를 시행할 경우 평가항목에 발암성 물질에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 할 것이다. 특히, 강원광산의 토양 형태는 67.6%가 Entisol로 형성되어 있어 광산의 갱구 붕락이 우려된다. 그 이

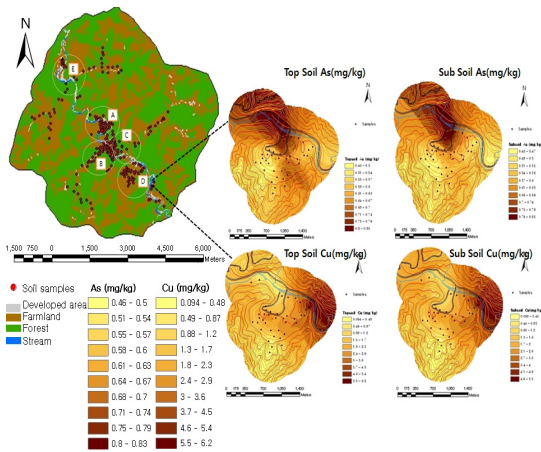


Fig. 7. Map of kriging produced by cluster

유는 Entisol은 모래(sand)함량이 높고 토양의 층위가 파괴된 형태로 상대적으로 토양 침식 등에 영향을 받기 쉽기 때문이다. 실제로 2008년 5월 조사 당시, 갯구의 상단부가 무너져 내리고 있어 이 지역의 비소와 구리로 인한 중금속 오염이 심화되지 않기 위해서는 갯내수 유출 및 토양 오염 피해를 저감할 수 있는 대책마련이 조속히 마련되어야 할 것이다.

### 3.5 검증

크리깅 분석의 정확성을 판정하기 위하여 실험테이타에 대한 교차 타당성 검정을 하였다. 이 방법은 임의로 특정 샘플 위치의 자료를 제거한 후에 나머지 시공간 자료값들을 이용하여 값이 제거된 위치의 값을 추정하는 방식[13]으로 모든 샘플위치에서 이 과정을 반복함으로써 모든 샘플 위치에서의 예측값을 얻게 되고 이렇게 예측된 값과 원래 참값을 비교함으로써 추정 오차를 계산할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 평균 절대 오차(mean absolute error: MAE), 평균 제곱 오차(mean square error: MSE) 및 편향 (bias)에 의해 오차의 크기를 판단하였다.

그 결과, 참값 예측 오차의 크기를 나타내는 MAE와 MSE의 경우, 비소에서 평균적으로 클러스터 D 그룹에서 가장 낮은 값을 보였다. 유사한 양상으로 구리의 경우 D그룹에서 예측오차가 가장 작게 나타나 전반적으로 예측능력이 제일 우수한 그룹이 D그룹으로 판명되었으며 참값과의 경향성 또한 가장 높았다.

편향정도를 파악할 수 있는 bias의 경우, 평균적

으로 비소에서는 A그룹과 C그룹에서 참값을 과추정하는 결과를 보였다. 그 이유는 모집단의 추정식 평균의 차가 크기 때문이다. 반면, 편향이 가장 약한 그룹으로는 B그룹과 D그룹으로 나타났다. 구리의 경우, 상대적으로 비소에 비하여 과추정정도가 대체로 작았으며 일부 저추정 양상도 보였다. 특히, 표토와 심토에서 니켈과 아연성분의 경우, 평균적으로 예측오차가 가장 크게 나타났다.

따라서 정확도를 높이기 위해서는 공간적으로 자료의 수를 늘리는 방법과 자기상관성을 고려하여 연관성이 높은 부가자료를 이용할 필요성이 있다. 그 대표적인 방법이 코크리깅(cokriging)방법이 있다. 이 방법은 두가지이상의 변수의 선형조합을 사용하여 자료가 알려지지 않은 지점에서 값을 예측하는 크리깅이다[21]. 또 이 지역은 주변이 산으로 둘러 싸여져 있어 지형의 변화가 크다. 따라서 지형의 변화가 큰 지역의 경우 베리오그램이 증가하는 경향이 있기 때문에 일반 크리깅(Universal Kriging)을 적용하여 정밀도를 높일 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 한강중상류유역에 위치한 강원광산부지로부터 발생한 중금속의 오염실태를 파악하고자 주성분 분석과 크리깅 공간통계기법을 시도하였다.

토양 상부층(표토)에서 주성분 1은 구리와 크롬 함량이 높았으며 주성분 2에서는 아연과 카드뮴 성분이 높은 양의 적재값을 보였다. 반면, 토양 하층(심토)에서의 주성분 1(PC1)은 정남쪽에서 정북방향으로 아연과 니켈 성분의 농도가 확산되고 있었고 주성분 2(PC2)의 경우 중남부지역에서 카드뮴과 수은 함량의 농도가 높아질 것으로 예측되었다. 이는 광산활동으로 인한 인위적인 오염에 의해 토양 상층부 표면 흡착과 하층부 암석층에 중금속 성분이 축적되어 있음을 알 수 있었고 오랜시간 폐탄광부지가 방치되면서 바람과 물의 이동에 의해 주변 경작지와 소유역하천에서도 일부 오염이 진행되고 있음을 알 수 있었다.

크리깅에 의한 추정치를 구하기 위해서는 자료간의 공분산값이 요구되는데 공간상에 존재하는 표본 자료가 클러스터 D그룹에서 자기상관관계가 가장 높았다. 그 결과, 비소의 경우 강원도 정선군 물은리지역에서 북서부지역방향으로 최대 0.83mg/kg 농



도를 보였고, 구리는 동부지역주변에서 최대 6.2mg/kg을 나타냈다.

특히, 이러한 지역의 오염현황을 규명하기 위해서는 모든 지점에서 샘플링을 하여 자료를 취득하여야 하는데 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구는 폐탄광 주변을 대상으로 GIS를 이용하여 공간통계기법을 적용하였으며 그 결과 공간학적 자료를 정량적으로 접근하고 해석하는데 효과적이었다. 따라서, 향후, 방치된 휴·폐광산부지를 중심으로 토양오염으로 인한 중금속 분포 양상 뿐만 아니라 암반층의 토질 및 지반침하의 예측 등 다양한 학문에 GIS연구가 접목될 수 있기 때문에 단순한 GIS의 광산도면시스템의 이미지 파일이 아닌 3차원의 지하공간을 가시화하는 “광해방지 GIS 공간통계연구”가 이루어져야 할 것이다. 그 이유는 폐광이 된 이후에도 갱구붕락 등 오랜 기간 위험요소가 내재되어 있기 때문에 공간학적 모니터링이 필요하고 현재 이러한 공간학적 통계 기법을 활용한 폐탄광 GIS연구가 미비하기 때문이다. 그러므로, 본 연구는 광해로 인한 폐탄광지역의 중·장기 개발 및 오염 토양에 대한 환경복원정책을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Ersoy, T.Y. Yundel, and M. Cetin, 2004, “Characterization of lead contaminated by past heavy metal mining using geostatistical methods,” *Archive of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 46, pp. 162-175.
- [2] D.G. Krige, 1951, “A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand,” *Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, vol. 52, no. 6, pp. 119-139.
- [3] G. Matheron, 1971, “The theory of regionalized variables and its application,” *Cahiers du Centre de Morphologic Mathematique, Ecole des Miners*, pp. 211.
- [4] G.W. Gee, and J.W. Bauder, 1986, “Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Method of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*,” *Agronomy, Soil Science Society of America, Inc., and American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA*, vol. 9, pp. 383-411.
- [5] J. Bech, C. Poschenrieder, M. Llugany, J. Barceló, P. Tume, F.J. Tobis, J.L. Baranzuela, and E.R. Vásquez, 1997, “Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru, *The Science of the Total Environment*,” vol. 203, no.1, pp. 83-91.
- [6] M. David, 1977, *Geostatistical Ore Reserve Estimation*, Elsevier, Amsterdam.
- [7] M.B. McBride, S. Sauve, and W.H. Hendershot, 1997, “Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soil,” *European Journal of Soil Science* vol. 48, pp. 337-346.
- [8] R. Boluda, V. Andreu, V. Pons, and J. Sanchez, 1988, “Contenido en metales pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en suelos de la comarca La Plana de Requena-Utiel (Valencia),” *Anales de Edafologia y Agrobiologia*, vol. 47, pp. 1485-1502.
- [9] S. E. Fendorf, M.G. Stapleton, G.M. Lambie, M.J. Kelley, and D.L. Sparks, 1994, “Mechanisms of chromium(III) sorption on silica. I: An X-ray absorption fine structure spectroscopic analysis,” *Environmental Science Technology*, vol. 28, no.2, pp. 284-289.
- [10] T. Hoftmann, A. Darsow, and M.T. Schafmeister, 2010, “Importance of the nugget effect in variography on modeling zinc leaching from a contaminated site using simulated annealing,” *Hydrology*, vol. 389, no.1, pp. 78-89.
- [11] 강창수, 2007, 폐광산 토양, 유출수 및 식물의 중금속 오염과 phytoremediation을 위한 식물 선별, 경희대학교 환경학과 박사학위.
- [12] 과학기술부, 2007, 21세기 프론티어 연구 개발사업: 수자원의 지속적 확보기술개발 사업(지하수 순환/유동시스템 모델링 기반기술개발), 한국지질자원연구원 연구보고서.
- [13] 박노옥, 2011, “시계열 환경변수 분포도 작성 및 불확실성 모델링: 미세먼지 농도 분포도작성 사례 연구,” *한국지구과학회지*, 제 32권, 제 33호, pp.

249-264.

- [14] 박민규, 박창열, 신기일, 유철상, 2010, “일강 우량의 적정 베리오그램,” 대한토목학회논문집, 제30권, 제6B호, pp. 525-532.
- [15] 박성민, 김준영, 최승원, 유충석, 김정진, 2006, “폐금속광산(Ag, Au, Cu) 갱내수 및 침출수에 대한 지화학적 특성 연구,” 한국암석 학회지, 제9권, 제 4호, pp. 89-90.
- [16] 서영진, 김찬용, 박만, 이동훈, 최충렬, 김광 섭, 최 정, 2002, “폐광산 인근 논토양과 수도의 비소함량 조사,” 한국응용생명화학학회지, 제 45권, 제 3호, pp. 152-156.
- [17] 신기일, 2008, 공간통계학 강의, 한국외국어 대학교 내부자료.
- [18] 정문섭, 김윤상, 최용복, 2002, “폐탄광GIS 구축방안에 관한 연구,” 한국GIS학회지, 제10권, 제1호, pp. 136-150.
- [19] 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, “불균질 이방성 대수층의 지하수 유동 분석에 지구통계기법의 응용, 대한지질공학 회지,” 제9권, 제 2호, pp. 147-159.
- [20] 최선영, 고아라, 윤왕중, 황세호, 강문경, 2003, “지구통계기법과 GIS를 이용한 연안지역 해수침투 분포 파악,” 한국GIS학회지, 제11권, 제3호, pp. 251-260.
- [21] 최종근, 2007, 『지구통계학』, 시그마프레스.
- [22] 최진원, 유근제, 구명서, 박준홍, 2012, “폐광산 주변 토양 중금속 오염노출농도 우려기준과 위해성 비교 연구,” 대한토목학회논문집, 제 32권, 제 4B호, pp. 261-266.
- [23] 한강수계위원회, 2008, 수계별 광산 유출수 영향 조사, 2년차 보고서.
- [24] 환경부, 2001, 『공정시험방법』, 동화기술.
- [25] 황진욱, 2007, GIS 공간분석과 수치해도의 활용에 관한 연구, 부산대 지형정보협동과, 석사학위논문.

논문접수 : 2012.05.16  
 수정일 : 1차 2012.08.01 / 2차 2012.08.13  
 심사완료 : 2012.08.17



**김 순 아**

2004년~2005년 국립환경과학원 물환경연구부 연구원  
 2011년 고려대학교 대학원 환경생태공학과 이학박사  
 2011년~현재 한국환경통계정보학회

이사

2011년~현재 한림대학교 환경생명공학과 연구교수  
 관심분야는 GIS공간통계, 토양오염거동예측, 기후변화



**이 우 균**

1989년 고려대학교 대학원 입학석사  
 1993년 독일 Göttingen 대학원 입학박사  
 1996년~현재 고려대학교 환경생태공학과 교수

2010년~현재 한국공간정보학회 이사

관심분야는 GIS/RS, 산림경영계획, 기후변화



**김 정 규**

1988년 고려대학교 대학원 농학박사  
 1985년~1994년 국립환경과학원 연구관  
 1994년 고려대학교 환경생태공학부 교수

2012년~현재 한국토양비료학회 부회장

관심분야는 토양학, 식물오염, 오염물질 거동

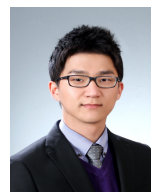


**신 기 일**

1985년 서울대학교 통계학과 이학사  
 1987년 서울대학교 대학원 통계학전공 이학석사  
 1992년 미국 North Carolina State University 통계학 박사

1993년~현재 한국외국어대학교 통계학과 정교수

관심분야는 공간통계학, 시계열 분석, 표본론

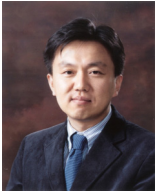


**권 태 협**

2009년 고려대학교 환경생태공학부 학사  
 2011년 고려대학교 환경생태공학과 석사

2012년 현재 LG 회사 근무

관심분야는 GIS/RS, 기후변화, 산림정책



현 승 훈

1996년 고려대학교 농화학과 학사  
1998년 고려대학교 대학원 석사  
2003년 미국 Purdue University 박사  
2003년~2006년 퍼듀대학교 박사후  
연구원

2006년~현재 고려대학교 환경생태공학과 교수  
관심분야는 토양학, 오염 토양 위해성 평가 및 저감, 오  
염물질 거동



양 재 의

1982년 강원대학교 대학원 농화학과  
석사  
1987년 미국 Montana주립대  
토양환경화학 박사  
2010~현재 강원대학교 농업생명과학

대학 학장  
관심분야는 농업환경, 비료·식물영양학, 토양학