

# GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포분석

## Spatial Distribution Analysis of Metallic Elements in Dustfall using GIS

윤 훈 주 · 김 동 술

경희대학교 환경학과 및 환경연구소

(1997년 9월 1일 접수, 1997년 11월 20일 채택)

Hoon-Joo Yoon, Dong-Sool Kim

*Department of Environmental Science and Institute of Environmental Studies,  
Kyung Hee University-Suwon Campus*

(Received 1 September 1997; accepted 20 November 1997)

### Abstracts

Metallic elements in dustfall have been known as notable air pollutants directly or indirectly influencing human health and wealth. The first aim of this study was to obtain precise spatial distribution patterns of 5 elements (Pb, Zn, K, Cr, and Al) in dustfall around Suwon area. To predict isometric lines of metal fluxes deposited on unsupervised random sites, the study has applied both spatial statistics as a receptor model and a GIS (geographic information system).

Total of 31 sampling sites were selected in the study area (roughly 3 by 3 km grid basis) and dustfall samples were then collected monthly basis by the British deposit gauges from Dec., 1995 to Nov., 1996. The metallic elements in the dustfall were then analyzed by an atomic absorption spectrometer (AAS). On the other hand, a base map overlapped by 7 layers was constructed by using the AutoCAD R13 and ARC/INFO 3.4D.

Four different spatial interpolation and expolation techniques such as IDW (inverse distance weighted averaging), TIN (triangulated irregular network), polynomial regression, and kriging technique were examined to compare spatial distribution patterns. Each pattern obtained by each technique was substantially different as varying pollutant types, land of use types, and topological conditions, etc. Thus, our study focused intensively on uncertainty analysis based on a concept of the jackknife and the sum of error distance. It was found that a kriging technique was the best applicable in this study area.

**Key words** : spatial statistics, receptor model, dustfall, GIS, kriging, uncertainty analysis

### 1. 서 론

다양한 오염배출원에서 대기 중으로 방출된 분진

은 습식침착 (wet deposition)과 건식침착 (dry deposition) 등의 기본 메커니즘을 통해 소멸된다. 강하분진은 각종 금속성분과 유기물 등을 함유하고 있어 인체 및 복지에 직, 간접적으로 영향을 주고 있다.

이러한 분진의 침착량은 지형적 특성과 기상학적 특성에 따라 지역별로 차이가 있으며, 오염원의 지리적 위치에 커다란 영향을 받는다. 따라서, 강하분진의 공간적 거동을 파악하기 위해서는 대기 중에 방출된 오염물질들의 지역적 분포를 면밀히 검토할 필요가 있다.

공간분석법 (spatial analysis)은 수용모델 (receptor models)의 한 부류로서, 수용체 (receptor)에서 측정된 가스상 및 입자상 오염물질의 물리화학적 특성 자료에 입각하여 공기의 질을 분석하거나 각종 오염원의 기여도를 정성적 또는 정량적으로 평가하는 방법론이다 (Hopke, 1991). 특히 지형인자에 중점을 둔 공간분석법으로 동일시간에 지역적으로 상이한 수용체에서 측정된 자료를 한 평면상에서 시각적으로 평가할 수 있다. 최근까지 공간분석에서 가장 선호되고 있는 내삽방법으로는 거리반비례평균법 (inverse distance weighted averaging)과 kriging법 등이 있다. 우선, 1970년대 Matheron에 의해 개발된 kriging법은 (Matheron, 1971) 주로 지리와 자원공학 분야에서 석유탐사 등의 연구에 응용된 바 있으며, 산성비의 공간적 분포도 및 대기 중 SO<sub>x</sub>와 NO<sub>x</sub>의 분포도 작성 등에 사용된 바 있다 (Akula, 1988). 거리반비례평균법 역시 각종 환경분야에서 응용되고 있다 (이규성, 1996).

최근 공간분석은 지리정보시스템 (GIS : geographic information system)과 함께 응용되고 있다. GIS란 기본자료에 응용하고자 하는 자료를 중첩시켜, 공간자료를 효율적으로 분석 및 조작하기 위한 수치자료처리방법으로 자료의 입력과 분석된 자료의 출력에 관계된 장치들을 총칭한다. Stockwell 등 (1993)은 GIS를 이용하여 독성 화학물질의 방출과 생태계 파괴와의 관련 여부를 연구한 바 있으며, Falke와 Husar (1996)는 거리반비례법과 GIS를 응용하여 미국내 오존의 농도분포에 관한 연구를 수행하고 미국 전지역의 오존현황을 연도별로 시각적으로 도출하여 비교한 바 있다. 이 과정에서 그들은 미측정 지점에 대한 거리반비례평균법의 불확실성에 관한 연구를 병행하였다 (Falke and Husar, 1996).

본 연구는 강하분진 중 중금속의 공간분포의 추이 및 최적의 분포패턴을 확보하기 위한 방법론에 중점을 두었다. 이를 위해 현재 가장 많이 활용되고 있는 4가지의 공간내삽 및 외삽법 (spatial interpola-

tion and expolation technique)을 도입하고 불확실도를 분석하여 최적의 분석법을 결정하고자 하였다. 즉, 불확실도 분석을 통하여 공간분석법 간의 추정능력의 우월성을 비교하고 최적의 분석법을 결정하고자 하였다. 한편, 자료의 효율적 분석과 시각적 효과를 얻기 위하여, 또한, 연구지역의 지형분석을 위하여 GIS software인 ARC/INFO를 도입하여 응용하였으며, 지형의 고도변화에 대한 영향을 가시적으로 분석하고자 하였다.

## 2. 실험방법 및 이론적 고찰

### 2.1 강하분진의 포집 및 분석

강하분진의 시료포집은 1995년 12월부터 1996년 11월말까지 수원지역의 강하분진량 조사 및 오염발생원의 정량적 추정에 관한 연구 (SAMP: Suwon Aerosol Monitoring Program)의 일환으로 수행되었다. 강하분진은 매달 평균 1회씩 총 12차에 걸쳐 포집되었으나, 집중강우로 빗물이 포집통을 넘친 1996년 7월자료는 폐기하였다. 연구대상지역은 수원시

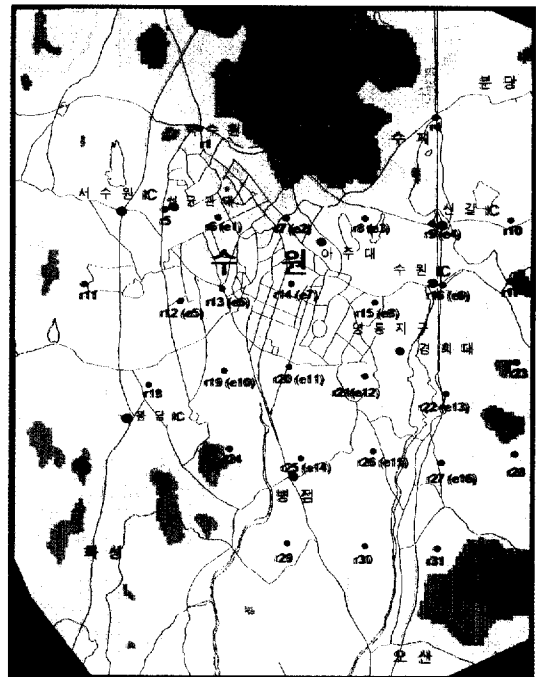


Fig. 1. Suwon city map constructed by 7 layers and monitoring sites.

전역과 외곽의 경기도 지역을 포함하여, 그림 1과 같이 경기도 분당~수원으로 이어지는 X축: TM405~TM428, Y축: TM189~TM213 지역에 대해 3×3 km 격자방식으로 대상지역을 나누고 교차지점에 총 35개의 강하분진포집기를 설치하였다.

강하분진 포집을 위해 British deposit gauge가 사용되었다. 포집기는 개구면의 직경이 30 cm인 깔대기와 깔대기 하부에 5 l 용기를 연결하여 구성하였으며, 발생할 수 있는 난류의 영향을 최소화하기 위하여 1.8 m 높이의 지지대에 포집장치를 설치하였다. 35개 측정지점에서의 동시간 측정기간은 매회 약 30일 정도로 우수량을 고려하여 공기 중에 노출시켰으며, 기상상태, 온도 및 포집기의 이상유무는 일별로 점검되었다. 연구기간 중 포집된 시료는 진공펌프로 membrane filter (diameter: 47 mm, pore size 1.0 μm : Whatman)에 여과시켜 여지 상의 잔류물과 여액으로 분류하여, 여지의 잔류물을 불용성물질로, 여액상 물질을 수용성물질로 분류하였다. 불용성물질은 건조기속에서 80°C로 완전히 건조시키고 칭량하여 불용성물질의 양을 구하였다. 또한 여지를 통과한 수용성물질은 hot plate 상에서 증발시켰고 건조기속에서 80°C로 완전히 건조시켜 칭량하였다. 총강하분진은 수용성성분과 불용성성분을 합하여 산출하였다. 또한 각 시료는 AAS분석을 위하여 미국 EPA에서 1992년 고시한 즉, CWA (Clean Water Act)의 microwave 전처리법을 이용한 질산법으로 전처리하였다. 수용성 및 불용성 시료는 각각 원자흡광광도계 (AAS; atomic absorption spectrophotometer, Hitachi, Model Z-8100)를 사용하여 무기원소 (Al, Cr, K, Zn, Pb)의 농도를 결정하였다. 강하분진의 침착량 W는 건식 및 습식침착이 혼합된 크기로서 다음과 같은 일반적 공식을 사용하여 추정하였다.

$$W = VC / TA \quad (1)$$

여기서, V = 포집된 강수량 (l)

C = 포집된 강수 중 오염물질의 농도 (kg/l)

T = 포집시간 (day)

A = 포집면적 (km<sup>2</sup>)

## 2.2 지형자료의 구축

지형정보의 정밀성을 추구하기 위해 1993년 국립지리원에서 재편집 발행한 1 : 50,000 경기도 지역 지

도를 이용하였다. 행정구역도, 도로, 건물, 등고선 등을 트레이싱 종이에 도식한 후, contex scanner를 이용하여 래스터 방식으로 재현하였다. 이것을 Sunsparc Station을 이용하여 vectorizing하였고, AutoCAD R13 (1995)으로 재편집하였다. 이때 정밀한 지역분석을 위해 7개의 layer로 분리하였고, 각 layer를 시각적으로 분류하고자 각기 다른 색상으로 표현하였다. 자료의 변환을 위해 dxf 화일형식을 이용하였다. 중금속 농도분포와 지형과의 관계를 나타내기 위해 등고선은 고도별로 축적값을 주어 ARC/INFO (ESRI, 1992)에서 TIN으로 처리하였다.

## 2.3 공간분석의 이론적 고찰

AutoCAD R13 (1995)과 ARC/INFO (ESRI, 1992)에서 작성한 주제도를 기본도로 이용하여 공간분석 소프트웨어인 Surfer (1994)로 구축된 중금속 분포도를 중첩시켜 공간분석을 시도하였다. 본 연구에서는 일반적으로 공간분석에 이용되고 있는 4가지 공간내삽 및 외삽법을 비교·검토하고 불확실도를 조사하였다. 즉, 거리반비례평균법 (IDW: inverse distance weighted averaging), TIN (triangulated irregular network), 다항회귀분석법 (polynomial regression) 및 krging 분석법을 비교·검토하였다.

### 2.3.1 거리반비례평균법 (inverse distance weighted averaging)

35개 지역 중 31개 측정지점의 좌표자료와 각 지점에서 측정된 금속의 침착농도자료를 바탕으로 우선 거리반비례평균법을 이용하였다. 이때 미측정지역에 대한 중금속의 미지농도 (unknown concentration)는 측정지점의 기지농도 (known concentration)  $Z_i$ 의 가중평균에 의하여 산출되며 산출식은 다음과 같았다.

$$\hat{Z} = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (2)$$

여기서,

$w_i$  = 거리가중치

$Z_i$  = 측정된 중금속의 flux 량

$\hat{Z}$  = 예측된 중금속의 flux 량

이때 거리가중치  $w_i$ 는 농도추정지점으로부터 인근 측정지점까지의 거리에 의해 결정된다. 즉,

$$w_i = \frac{d_i^k}{\sum_{i=1}^n d_i^k} \quad (3)$$

여기서,

$w_i$  = 거리가중치

$k$  = 중심가중치

$d_i$  = 주변의 측정지점  $i$ 까지의 거리

본 연구에서는 다행히 측정지점간의 거리가 일정한 간격을 유지하므로 추정하고자 하는 미측정지점에서의 중금속농도는 해당지점에서 가까운 측정지점의 농도값들을 가중평균하여 사용하였다. 즉,  $d_i$ 는 미측정지점에서 주변의 측정지점  $i$ 까지의 거리를 의미한다. 결국 미측정지점에서의 농도추정치는 이 지점에서 가장 가까운 측정점의 농도값에 큰 영향을 받게 되고, 멀리 떨어진 측정점의 농도값에는 상대적으로 작은 영향을 받게 된다.

2. 3. 2 다항회귀분석법 (polynomial regression analysis)

중금속의 농도분포도가 실제 등농도 곡면에 최대한 근접하도록 표현한 수학적 곡면 즉, 일반적인 분포경향을 재현하는 곡면을 지역경향면이라 한다. 이 지역경향면을 도식하기 위해 여러 가지 수리통계학적 함수를 이용할 수 있다. 그 중 다항회귀분석법에 의해 급속침착농도인 종속변수  $Z$ 는 독립변수  $X$  및  $Y$ 의 위치좌표의 함수로 표현할 수 있다. 즉,

$$Z_{ij} = f(X_i, Y_j) + E_{ij} \quad (4)$$

여기서,  $f(X_i, Y_j)$ 는 전체 측정지점의 농도정보를 함축한 지역경향면이며,  $E_{ij}$ 는 각 지점에서의 실제농도와 추정농도간의 차이인 잔차를 의미한다. 또한, 예로서 중금속의 농도분포경향을 다항식으로 표현할 때 1차 농도분포경향면  ${}_1Z_{ij}$ 와 2차 농도분포경향면  ${}_2Z_{ij}$ 의 다항식은 다음과 같다.

즉,

$${}_1Z_{ij} = b_0 + b_1X + b_2Y \quad (5)$$

$${}_2Z_{ij} = b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5Y^2 \quad (6)$$

일반적으로 동일한 자료를 1차 농도경향면으로 표현할 때보다 2차가, 2차보다는 3차가 더욱 양호한 결과를 제공한다. 본 연구에서는 3차 다항회귀식을

다항회귀분석법의 대표분석법으로 결정하고 사용하였다.

2. 3. 3 TIN 분석법 (Triangulated Irregular Network Analysis)

TIN 분석법은 지형의 고저곡면을 평면에 효과적으로 도식하기 위해 고안된 일종의 위상학적 분석 기법 (topological analysis)이다. 즉, 특정지형의 고저곡면은 공간위치좌표  $X, Y, Z$  값으로 결정된 점들을 비정형 삼각형으로 연결하여 2차원 평면으로 표현할 수 있다. 즉, 3차원 지형의 각 점들은 고도라는 정보를 갖게 되며, 이 점들은 표면에 대해 불규칙적인 공간점들과의 교점으로 구성된 삼각구조로 표현할 수 있다. 각 삼각형은 실제 지형에 대한 고저곡면의 단면으로 인식될 수 있다.

본 연구에서는 일단 기지의 측정농도에 의한 구성점들간의 관계를 TIN 분석으로 파악한 후, TIN 분석을 통해 이미 파악된 삼각형 모형에 대하여 1차 회귀식을 구하고 추정될 농도값을 산출하였다. 이때 각 추정 농도값들은 삼각형으로 정의된 평면과 수직교차하는 선분 상에서 결정된다고 가정하였다.

2. 3. 4 Kriging 분석법

공간내삽방법 중 kriging 이론은 비교적 최신의 수리통계학적 기법이다. Matheron(1971)에 의해 개발된 이 분석법의 기본 수식은 다음과 같다.

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^m \lambda(Y_i) \quad (7)$$

여기서,  $\lambda$  = kriging 가중치

$\hat{Y}$  = 중금속의 추정 flux량

$Y_i$  = 측정된 중금속의 flux량

Kriging 가중치  $\lambda$ 는 주변의 농도값들에 의해 Gaussian분포, logarithmic 분포, exponential 분포 등의 분포특성을 가지며, 분포특성은 평균, 거리, 분산 등과 같은 통계치에 의해 결정된다. 따라서, kriging 분석법에서는 연속공간에서 특정한 분포특성을 갖는 통계치를 최우선으로 파악해야 한다(Ripley, 1981). 본 연구에서는 각종 공간내삽법간의 비교분석에서 위치좌표에 입각한 거리만을 독립변수로 사용하였기 때문에 kriging 분석에서도 거리만을 독립변수로 사용하였다. 만약  $\lambda$ 에 대한 확률분포함수를  $Z(X_i)$ 라고 한다면, 특정지점에 대한 추정농도의 함수는 지

점  $X_i$ 와  $X_j$  간의 거리  $h$ 로 표현된 확률분포특성을 가질 수 있다. 즉,

$$Z(X_i), \dots, Z(X_k) = f(Z(X_i+h), \dots, Z(X_k+h)) + E(Z(X_i), \dots, Z(X_k)) \quad (8)$$

여기서  $E(Z(X))$ 는 확률분포함수의 오차항으로 변이도(variogram)이라 칭한다. 만약  $X_1$  지점과  $X_2$  지점간의 거리를  $h$ 라 한다면, 변이도는  $Z(X_1)$ 과  $Z(X_2)$ 의 공분산(covariance)로 표현될 수 있다. 또한, 변이도의 함수로 표현되는 준변이도(semi-variogram)  $\gamma(h)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma(h) = \gamma(X_1; X_2) = \frac{1}{2} E[(Z(X_1) - Z(X_2))^2] \quad (9)$$

한편, 준변이도는 비편중추정자(unbiased estimator)로서 주어진 응용조건에 따라 여러 가지 model로 설명할 수 있다. 본 연구에서는 변이도분석 소프트웨어인 GEOEAS(1988)를 이용하여 kriging 분석에서 보편적으로 사용되고 있는 spherical model을 사용하였다. 즉, 본 연구에서 사용된 준변이도의 함수는 다음과 같다. 여기서,  $C$ 와  $a$ 는 상수이다.

$$\gamma(h) = C \left[ \frac{3}{2} \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} \frac{|h|^3}{a^3} \right] \quad (|h| \leq a) \quad (10)$$

$$\gamma(h) = C \quad (|h| > a)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 금속원소의 월별 침착량

본 연구에서는 강하분진 중에 침착된 금속성분 중 Pb, Zn, K, Cr, Al 만을 분석하였다. 표 1은 31개 지점에서 측정된 금속원소의 월평균 농도를 보여주고 있다. 먼저 Pb는 1993년 이후 계속된 무연휘발유 전환정책으로 주요발생원인 유연휘발유의 사용량은 급격히 감소하였으나, 강하분진 중의 Pb의 농도는 전반적으로 감소하지 않고 있었다. 이는 최근에 공급되는 무연휘발유에 대한 납의 허용함유량이 1/당 0.0013g 이하로서 비록 소량의 납이 포함되어 있으나, 경부고속도로를 포함한 연구대상 지역의 교통량 역시 크게 증가하여 대기 중 납의 총배출량에는 큰 변화가 없었기 때문으로 사료된다. 또한 본 연구지역의 경우 납 오염도에 기여한 오염원은 유연휘발유 이외에도 토양을 비롯한 기타 납의 발생

원들이 영향을 미치는 것으로 추정된다. 납의 침착량은 1월에 0.211 kg/km<sup>2</sup>/day, 3월에 0.146 kg/km<sup>2</sup>/day, 4월에 0.126 kg/km<sup>2</sup>/day로 높은 침착량을 보여 주었으며 3월을 정점으로 11월의 0.039 kg/km<sup>2</sup>/day 까지 지속적인 감소추세를 보였다. 즉, 겨울철과 봄철에 높은 침착량을 보였다.

Zn는 기름연료 사용과 자동차 브레이크 라이닝 마모, 자동차 타이어 마모 등에서 발생한다(Hopke, 1985). 월별로 분석해 보면 4월과 5월에 각각 0.303 kg/km<sup>2</sup>/day와 0.478 kg/km<sup>2</sup>/day로 높은 침착량을 보여 주었으며, 9월에도 0.525 kg/km<sup>2</sup>/day로 높은 수치를 보여 주었다. 반면 연료소비량이 적은 8월에는 0.188 kg/km<sup>2</sup>/day로 낮은 침착량을 보여 주었다.

Table 1. Monthly average fluxes of 5 metals in the total fallout particles measured around Suwon area in 1996. (Unit: kg/km<sup>2</sup>/day)

Site Code	Pb	Zn	K	Cr	Al
R- 1	0.095	0.347	1.391	0.021	1.873
R- 2	0.086	0.262	1.098	0.021	1.708
R- 3	0.065	0.196	1.255	0.025	2.230
R- 4	0.078	0.215	1.358	0.040	2.063
R- 5	0.083	0.249	1.463	0.040	2.506
R- 6	0.096	0.401	1.465	0.025	2.194
R- 7	0.101	0.230	1.445	0.033	2.525
R- 8	0.084	0.267	1.645	0.027	2.053
R- 9	0.092	0.625	1.565	0.031	2.046
R-10	0.071	0.171	1.187	0.042	1.871
R-11	0.085	0.509	1.252	0.042	1.810
R-12	0.083	0.298	1.403	0.042	1.912
R-13	0.101	0.321	1.469	0.031	2.032
R-14	0.090	0.259	1.318	0.026	2.281
R-15	0.133	0.385	2.157	0.050	2.698
R-16	0.083	0.200	1.454	0.050	2.562
R-17	0.097	0.499	1.380	0.038	1.892
R-18	0.084	0.258	1.194	0.046	1.834
R-19	0.095	0.237	1.987	0.037	2.603
R-20	0.092	0.238	1.410	0.052	1.662
R-21	0.107	0.258	1.536	0.030	2.300
R-22	0.075	0.263	3.018	0.023	1.497
R-23	0.072	0.182	1.278	0.028	1.764
R-24	0.092	0.264	1.482	0.034	1.636
R-25	0.152	0.350	1.800	0.028	2.383
R-26	0.086	0.314	1.606	0.026	2.343
R-27	0.078	0.191	1.323	0.021	1.509
R-28	0.089	0.448	0.994	0.023	1.428
R-29	0.087	0.182	1.354	0.032	1.634
R-30	0.098	0.248	1.344	0.024	2.022
R-31	0.101	0.193	1.324	0.059	2.117
Average	0.092	0.292	1.482	0.034	2.032

K는 3월과 4월에 각각 1.755 kg/km<sup>2</sup>/day와 2.254 kg/km<sup>2</sup>/day로 다른 달에 비해 높은 침착량을 보여 주었으며, 11월도 2.147 kg/km<sup>2</sup>/day로 높게 나타났다. 그외의 달에는 매우 고른 분포를 보여 주었다. 따라서 K는 쓰레기 종량제 이후 실시되고 있는 각종 불법소각이 원인이 되어 봄과 가을철에 높은 침착량을 보여주는 것으로 사료된다.

대표적인 인위적 오염물질인 Cr의 경우, 월별, 계절별로 뚜렷한 변화가 있었다. 3월이 0.090 kg/km<sup>2</sup>/day와 10월이 0.073 kg/km<sup>2</sup>/day로 높은 값을 보여주었고, 6월과 8월이 각각 0.004 kg/km<sup>2</sup>/day와 0.018 kg/km<sup>2</sup>/day로 나타나 큰 차이를 보였다. 즉, 봄과 가을에 높은 침착량을 보였고 여름에는 봄과 가을에 비해 매우 낮은 침착량을 보여주었다.

주로 토양성분 중에 다량 함유되어 있는 Al의 침착량은 4월이 4.92 kg/km<sup>2</sup>/day로 가장 높았으며, 3월이 2.08 kg/km<sup>2</sup>/day, 5월이 2.69 kg/km<sup>2</sup>/day로 비교적 높은 침착량을 보였고 4월을 기점으로 9월의 0.60 kg/km<sup>2</sup>/day까지 점차적으로 감소추세를 보였다. 계절별로는 봄철이 높은 침착량을 보였고, 여름과 가을이 낮은 침착량을 보였다.

### 3.2 금속원소의 공간분포 경향

공간분석의 주목적은 연구대상지역에 산재한 다량의 정보특징을 정확히 분류하고 묘사하는데 있으며, 이를 응용하기 위해서는 자료의 확보 및 특성 파악이 선행되어야 한다. 하지만, 공간분석의 가장 큰 단점은 미래상황에 대한 추정능력을 기대할 수 없다는 것이다. 본 연구에서도 특정 연구기간 중에 포집된 강하분진의 자료를 입력자료로 활용했기 때문에 분진오염의 시간별 예측경향은 연구에서 제외하였다. 앞에서 언급한 4가지 공간분석법의 수행 결과, 전반적인 미측정지점에 대한 추정농도의 경향은 유사하였다. 하지만, 오염물질별로 추정된 농도치는 각 분석법간에 실질적인 차이를 보였으며 이로 인해 오염원의 정성적 확인결과도 달랐다.

먼저 Pb에 대해 살펴보면, 거리반비례평균법, TIN 분석, kriging 분석의 결과, 강하분진 중 납의 침착량은 TM (206, 418)지역과 TM (203, 412)지역에 집중되고 있었다(그림 2). 우선 TM (206, 418) 지역은 대단위 주택건설이 진행되고 있는 영동지역으로, 공사에 따른 각종 장비들의 사용과 건축폐자재의 불법

소각 및 토양분진의 비산 등으로 고농도의 Pb가 방출되었을 것으로 사료된다. Pb의 또 다른 주요 방출지역은 TM (203, 412)인 병점지역으로 이 곳은 각종 공장들이 혼재하고 화물철도역인 병점역이 있으며 지형적으로는 고지대의 안쪽에 위치하는 분지지역이었다. 이 지역은 연구대상지역 중 가장 높은 납의 침착량을 보였다. 한편, 다항회귀분석에 의한 결과는 다른 분석법에 의한 결과와는 다소 차이가 있었다. 즉, 다항회귀분석은 나머지 3개 분석법이 따로 분리한 두 개의 인근 오염지역을 하나의 지역으로 묶어 수원시 남부에서 북동쪽으로 길게 띠형태로 오염밀집지역을 표시하고 있다. 납의 침착량이 비교적 높은 TM (208, 421)지역은 경부고속도로의 신갈 인터체인지 부근으로 연중 교통이 정체되는 구간이다. 이 지역은 측정점이 최북단 외곽에 존재하기 때문에 두 개의 점과 한 개의 선을 기본으로 추정침착량을 외삽분석하는 TIN 분석법으로는 확인할 수 없었다. 한편, 수원의 서북쪽 고지대는 Pb의 침착량이 매우 낮았다.

Zn는 상습 정체구간인 경부고속도로의 신갈인터체인지 부근(TM (208, 421)지역)에서 6.0~6.5 kg/km<sup>2</sup>/day로 다른지역에 비해 침착량이 가장 많았고 특히 3월과 11월에 침착이 집중되는 것으로 나타났다. 이 지역의 월평균 침착량도 0.625 kg/km<sup>2</sup>/day로 높게 나타났다. 거리반비례평균법, TIN 분석법, kriging 분석법 등 모든 분석결과가 동일하게 나타났다. TM (208, 421)지역을 제외하고는 비교적 고른 침착농도분포를 보였다.

K의 침착량은 기흥 인터체인지 부근인 신갈저수지 동남쪽 TM (208, 413)지역에서 매우 높게 나타났다. TIN 분석결과, K는 이 지역과 대단위 주택건설지역인 영동지구까지 확대분포하는 것으로 나타났다. 또한 K의 침착량은 저지대를 따라 남쪽에서 북서쪽까지 넓게 분포함을 보여 지형이 강하분진의 지역별 침착량에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

Cr은 전체 연구대상지역에 걸쳐 폭넓게 분포함을 볼 수 있었다. 이는 Cr이 주로 강하분진 중 미세분진 영역에 존재하며, 미세분진의 대기 중 장기체류 시간과 무관하지 않다. 하지만, Cr의 경우, 하나의 특정 오염원이 전지역에 영향을 미치는 것이 아니었다. 즉, 거리반비례평균법에서는 4개 지역, TIN 분석법은 5개 지역, 다항회귀분석법은 3개 지역 그리

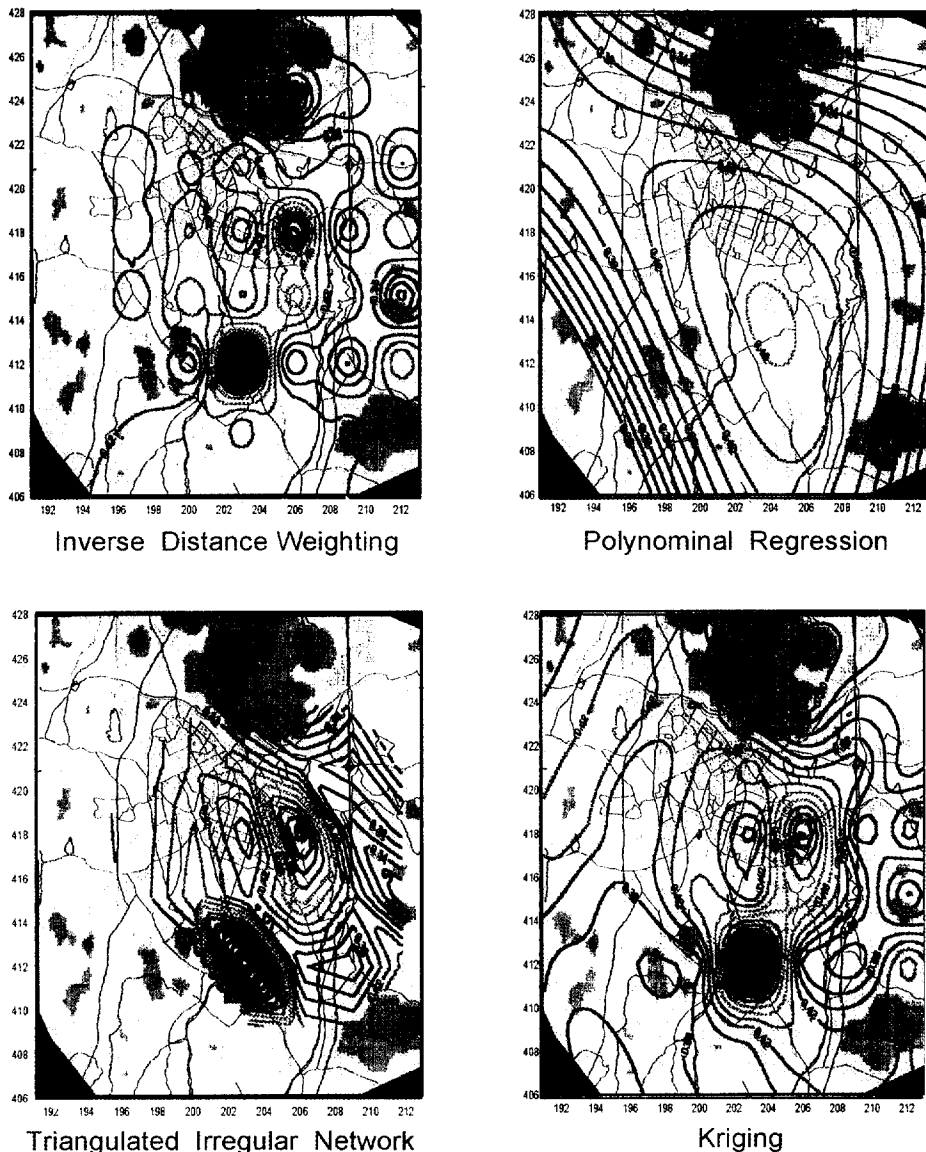


Fig. 2. Spatial interpolation map for Pb.

고 kiging분석법은 6개 지역을 주요오염지역으로 분리하였다. 전반적으로 영통개발지구 (TM (206, 418))의 침착농도가 높았다. 특이한 점은 TM (209, 409)지점의 침착량이 높았는데 이는 주변 오산에서 유입된 것으로 사료된다. Cr의 등농도분포곡선을 분석해 보면, 신갈 저수지 지역에 농도가 집중됨을 알 수 있었으며, 강하분진 중 Cr의 침착이 수질오염에

커다란 기여를 할 것으로 사료된다.

Al은 토양에서 검출되는 대표적인 무기원소로서 연구대상지역 거의 전역에서 다발적으로 나타났다. Al의 침착량은 도시내부보다는 개발 중인 도시외곽 지역에서 농도가 높았고 외곽지역의 토양분진이 도시내부로 지형에 따라 유입되는 형태를 보여주었다. 특히 영통지구의 북쪽지역(TM (206, 418))은 수

원시 내부 4 km까지 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 지역은 월평균 2.698 kg/km<sup>2</sup>/day의 침착량을 보였고 연구기간 중 총 26.0~27.0kg/km<sup>2</sup>의 침착량을 보였다.

3.3 공간분석법 평가를 위한 불확실도 분석

앞의 분석결과에서 살펴보았듯이, 공간분포의 경향은 내삽 또는 외삽의 방법에 따라 큰 차이가 있을 수 있다. 따라서, 상업용 패키지가 제공하는 그래픽 software의 무비판적 사용은 연구결과를 크게 왜곡시킬 수 있다. 특히, 한정된 대기오염 측정망의 수를 가지고 있는 국내실정에서는 지형과 오염물질의 종류에 따른 최적 공간분석법의 결정이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 공간분석법에 내재한 각종 분석방법에 대한 검증용 불확실도 분석(uncertainty analysis)에 입각하여 수행하였다.

상기 4가지 공간내삽 및 외삽분석법을 이용하여 미측정지점에 대한 추정능력을 검증하였다. 이를 위해 jackknife 개념 (Miller, 1974)과 오차거리(error distance) 개념을 이용한 불확실성 분석을 수행하였다. 우선 전체 31개 측정점 중 내삽만이 가능한 TIN 분석을 동등하게 고려하여 전체 측정점 내부에 위치한 16개 측정점(검사지점)만을 검증 대상으로 선정하였다(표 2와 그림 1 참고). 먼저 jackknife 개념을 도입하여 각 측정점에서의 실측치를 한번에 하나씩 순차적으로 제거한 상태에서, 나머지 15개 측정점에서의 실측치에 입각하여 제거된 측정점의 농도를 추정하였다. 이 때의 추정치와 실측치간의 차의 절대값을 오차거리로 정의하였다. 이 과정을 15개 전 측정점에 확대하고 반복하여 비로소 1개 측정점을 제거했을 때의 '오차거리의 합(sum of error distance)'을 계산하였다. 즉,

$$E_i = \sum_{l=1}^k (|P_m - P_l|) \tag{11}$$

여기서, E<sub>i</sub> = i개 측정점을 제거했을 때의 오차거리의 합

P<sub>m</sub> = 강하분진 중 실측된 금속의 침착량

P<sub>l</sub> = i개 측정점을 제거했을 때 나머지

측정점만으로 추정된 금속의 침착량

k = 내삽이 가능한 측정점의 수

Table 2. Test site codes and their coordinations located inner part of the study area.

Test Site Code	TMX	TM Y	Classification
E- 1	200.2	421.2	Residential
E- 2	203.6	420.4	Residential
E- 3	206.0	421.0	Green
E- 4	209.4	421.0	Highway
E- 5	197.8	417.9	Green
E- 6	200.0	418.0	Industrial
E- 7	203.0	418.0	Commercial
E- 8	205.8	418.0	Industrial
E- 9	209.0	418.3	Highway
E-10	201.0	415.8	Commercial
E-11	204.0	415.3	Green
E-12	205.5	413.6	Residential
E-13	209.2	413.3	Highway
E-14	203.0	412.0	Industrial
E-15	206.3	412.0	Green
E-16	209.4	412.1	Green

하지만, 2개 이상의 측정점을 제거하고 나머지 측정점의 자료로 금속의 침착량을 추정할 때 경우의 수가 상당수 존재하므로, 본 연구에서는 제거될 측정점의 무작위추출 방법을 사용하였다. 무작위추출을 위해 난수발생(random number generation) 개념을 도입하였다. 이를 위해 Turbo-C의 난수를 발생시키는 확률함수를 이용하였다. 이와 같이 측정점을 무작위로 1개에서 16개까지 순차적으로 선정하고 제거하면서 각각 5회에 걸쳐 측정치와 추정치를 구하고 오차거리의 합을 구하였다.

31개 강하분진 측정점에 적용한 순위번호는 측정지점 번호(site code)와 검사지점 번호(testing site code)로 차별을 두었다. 이는 오차거리의 분석에 사용된 16개 측정점이 불규칙하게 나열되기 때문이다. 즉, 난수발생 프로그램의 수행과정을 단순화하기 위함이다. 표 2는 16개 측정점에 대한 TM좌표와 지역특성을 보여주고 있다.

3.3.1 미측정지점에 대한 추정능 평가

그림 3은 5개 원소 각각에 대해 4가지 분석법을 적용하고 기지의 측정점을 하나씩 추가로 제거한 후, 오차거리의 합을 계산하여 도식한 것이다. 즉, 오차거리의 합이 증가할수록 불확실도는 증가한다고 하겠다. Pb의 경우, 1~3개의 측정점을 제거할 때까지는 거리반비례평균법의 추정능이 우수하였고



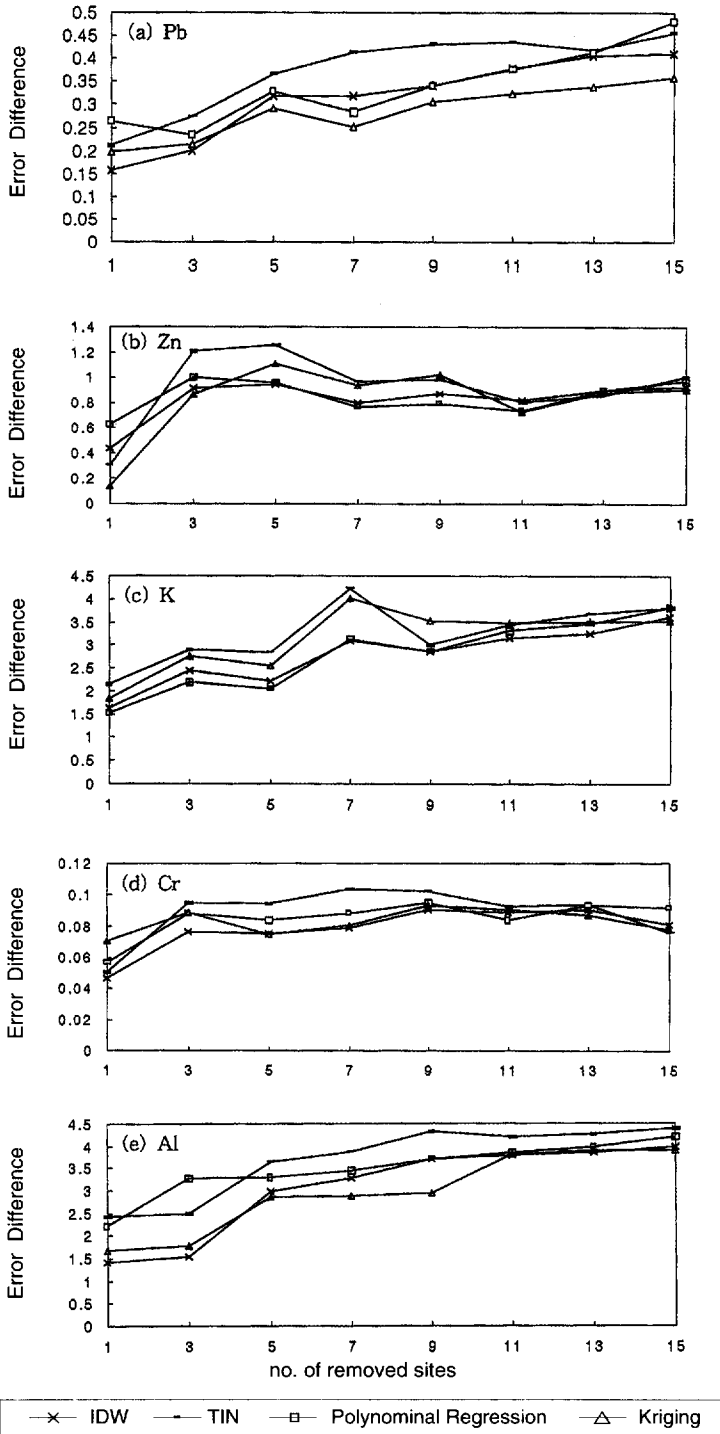


Fig. 3. Uncertainty analysis results to compare 4 different spatial interpolation techniques when increasing number of sites removed of (a) Pb, (b) Zn, (c) K, (d) Cr, and (e) Al.

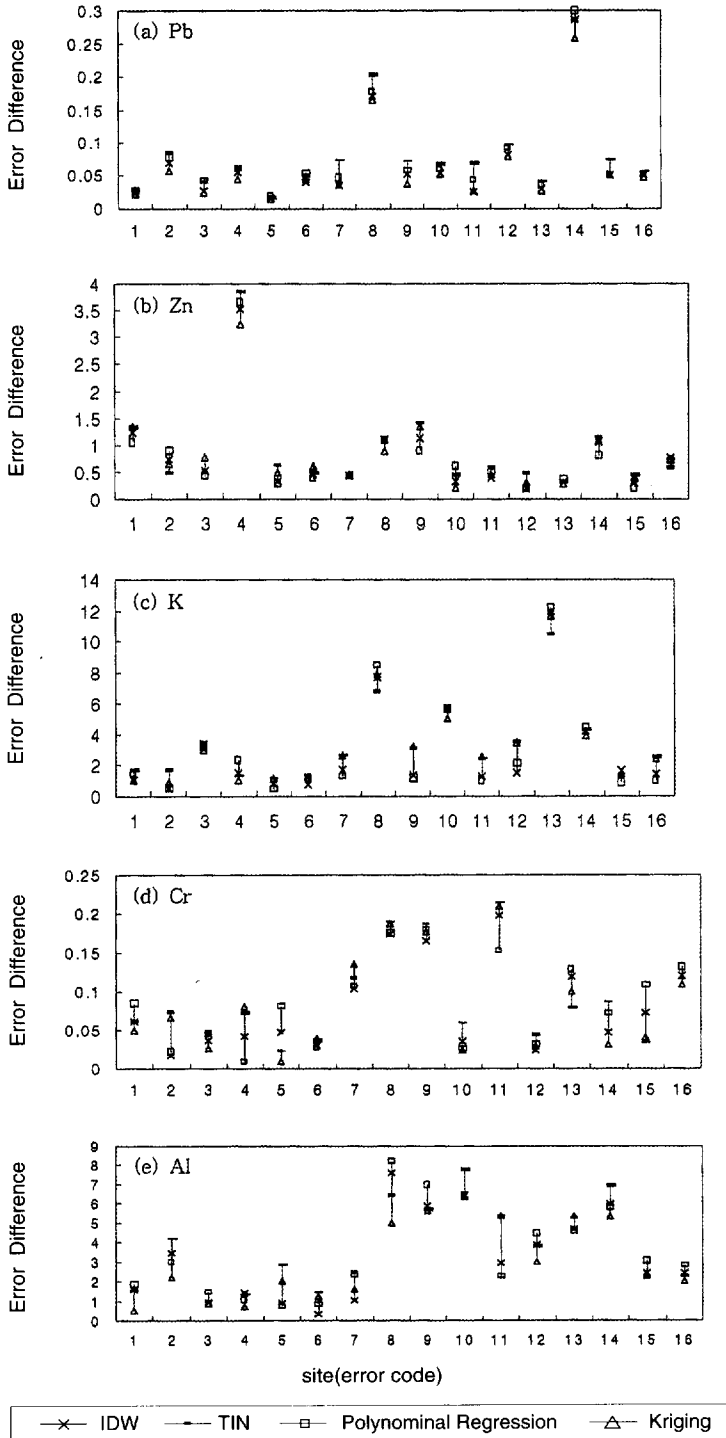


Fig. 4. Uncertainty analysis results for each testing site to compare 4 different spatial interpolation techniques when using metal flux data of (a) Pb, (b) Zn, (c) K, (d) Cr, and (e) Al.

kriging 분석법은 5~15개의 측정점을 제거할 때까지 상대적으로 추정능이 우수하였다. 즉, 기지의 측정점의 수가 감소하더라도 타 분석법보다는 불확실도가 작았다. TIN 분석의 경우, 상대적으로 불확실도가 컸으며, 제거되는 측정점이 많아질수록 kriging 분석에 의한 불확실도가 타 분석법보다 상대적으로 감소하였다.

Zn의 경우, 기지의 측정점의 수가 많을수록 kriging 분석에 의한 추정이 불확실도가 작았으며, 미지의 측정점의 수가 증가할수록 분석법간의 추정능력의 차이는 없었고 전반적인 불확실도는 수렴하는 경향을 보였다. 이는 경부고속도로의 상습적 지체구간인 TM (209, 421)지점만이 커다란 오염원으로 간주되었고 그 외 지역은 침착농도가 높지 않았기 때문인데, 이와 같이 국소지역의 오염경향이 뚜렷하고 오염의 영향이 연구대상 전지역에 확산되지 않은 경우에는 분석법간에 커다란 차이는 발견되지 않았다. 즉, 불확실도를 희석시키는 경우라고 하겠다.

K의 경우, 전반적 불확실도는 미측정점의 수가 증가할수록 상향하는 경향을 보였다. 특히 4가지 분석법 중 다항회귀분석법이 가장 우수한 추정능을 보였는데, 이는 연구대상지역에서 오염원으로 사료되는 2개의 측정점이 서로 인접하고 그 중 한 곳이 난수로 선정되어 제거될 경우 다항회귀분석법은 나머지 다른 한 곳의 영향을 그대로 포용하기 때문이다. 즉 농도의 경향이 유사한 두 개의 인접지점을 오히려 한 개의 측정점으로 인식하는 다항회귀분석법의 속성상 이 경우의 불확실도는 감소하였다.

연구대상지역에서 Cr의 침착량은 산발적으로 농도가 높았는데, 1~3개의 측정점을 제거할 때까지는 거리반비례평균법의 추정능이 우수하였고 kriging 분석법은 5~15개의 측정점을 제거할 때까지 상대적으로 추정능이 우수하였다. 침착농도의 경향이 뚜렷하지 않고 지역적으로 불규칙하였기 때문에 분석법간의 커다란 차이를 보이지 않았다.

Al의 경우, Pb와 비슷한 결과를 보였는데, 1~3개의 측정점을 제거할 때까지는 거리반비례평균법의 추정능이 우수하였고 kriging 분석법은 5~15개의 측정점을 제거할 때까지 상대적으로 추정능이 우수하였다.

### 3.3.2 검사지점별 추정능 평가

그림 4는 오차거리 분석에 이용된 16개의 검사지점 각각에 대해 오염물질별로 불확실도를 평가하고 그 결과를 도식한 것이다. 불확실도의 평가는 상기 제시한 방법과 동일하게 수행하였다. 이 평가의 목적은 검사지점별로 서로 다른 4가지 공간분석법의 우수성을 상대적으로 비교·검토하는데 있으며, 지점별 불확실도를 검증하므로써 해당 측정점의 중요도를 파악하고자 하였다.

우선 Pb의 침착농도에 입각하여 검사지점별로 불확실도를 조사하였다. E-8과 E-14가 오차거리가 큰 이유는 해당지역의 침착농도가 주변의 농도보다 큰 차이를 보였기 때문으로 주요 오염원이 인근에 존재하는 경우 불확실도는 상승한다. 전반적으로 kriging 분석이 우수하게 평가되었으며 거리반비례평균법과는 크게 차이가 없었다. TIN 분석의 경우, 주거지역인 E-1, E-5, E-16 지점에서는 다른 분석법과 큰 차이가 없었으나 그 외 지역에서는 불확실도가 매우 높았다.

Zn의 경우는 경부고속도로의 상습적 지체구간인 신갈인터체인지인 E-4 지점의 침착농도가 매우 높았고 그로 인해 모든 분석법의 불확실도 역시 동반적으로 매우 높았다. 이 지점은 Zn에 관한 오염도를 측정할 때 반드시 측정점으로 선정해야 할 것으로 사료된다. 그 외 영통지구 북쪽에 위치한 E-8지점의 침착농도가 높았다. 전반적으로 kriging분석과 다항회귀분석이 우수하게 평가되었다. K의 경우는 E-13 지점이 가장 불확실도가 컸고 E-8과 E-10 지역 역시 높은 지역이었다. K 오염감시를 위한 측정지점을 선정한다면 E-13, E-8, E-10 순으로 결정되어야 할 것이다. K의 경우, 분석법 간의 우열을 평가하기는 어려우나 불확실도가 클 경우 TIN 분석이 양호한 결과를 보였다.

Cr의 경우는 연구대상지역에서 오염분포는 산발적으로 조사되었는데 E-11의 불확실도가 가장 컸으며, E-8, E-9, E-7, E-13 역시 높았다. 불확실도가 큰 경우 다항회귀분석과 거리반비례평균법이 우수한 결과를 보였으며 불확실도가 작은 경우 kriging 분석이 우수하였다. Al의 경우, E-8, E-9, E-10 지점의 불확실도가 높았으며 전반적으로 kriging 분석이 양호한 결과를 보였다.

## 4. 결 론

강하분진 중 금속원소의 침착농도분포를 파악하기 위하여 우선 GIS를 도입하여 구체적인 금속원소의 오염패턴과 추이를 시각적으로 도출하였으며, 수용모델 중 4가지 공간분석법을 도입하여 분석법 간의 오염분포형태를 정성적으로 비교하였다. 특히 본 연구에서는 공간분석법 간의 상대적 우수성을 정량적으로 검증하기 위해 불확실성 분석을 수행하였다.

본 연구에 응용된 4가지 공간분석법은 거리반비례평균법, TIN 분석법, 다항회귀분석법 및 kriging 분석법이였다. 입력자료를 확보하기 위해 1995년 12월부터 1996년 11월까지 매달 총 11차에 걸쳐 강하분진을 포집하였으며, 분진 중 Pb, Zn, K, Cr, Al을 분석하고 침착농도를 결정하였다. 이 자료를 사용하여 4가지 공간분석을 수행한 결과, 분석법 간의 실질적인 차이를 발견할 수 있었으며, jackknife 개념 및 오차거리 개념을 도입한 불확실성 분석을 통하여 공간분석법 간의 상대적 우수성을 검증할 수 있었다. 전반적으로 미측정지점에 대한 강하분진 중 금속원소의 침착농도를 추정할 경우, 거리반비례평균법과 kriging 분석법이 우수한 추정능을 보였다. 특히 거리반비례평균법은 측정점의 수가 충분히 확보된 조건에서 가장 불확실도가 낮았으며, kriging 분석법은 거의 모든 조건에서, 또한 측정점의 수가 뚜렷하게 감소하더라도 불확실도가 낮아 우수한 추정능을 보여주었다. 또한 본 연구에서는 이러한 불확실도 분석을 통하여 측정점의 중요도에 대한 우선순위를 검토할 수 있었으며, 주요 오염원에 의한 영향권 영역을 정량적으로 확인할 수 있는 가능성을 제시하였다.

## 사 사

본 연구의 일부는 삼성전자(주)의 SAMP(Suwon Aerosol Monitoring Program)의 일환으로 수행되었으며, 이에 도움을 주신 임직원께 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 경희대학교(1997) 수원지역 분진오염원의 화학적 분석 및 발생원 조사, 삼성전자주식회사, 157-170.
- 대기환경연구회(1995) 대기오염개론, 동화기술.
- 이규성(1996) 점관측 기후 인자의 공간자료 변환과 응용, CADLAND WORKSHOP, 483-495, 캐드랜드.
- 최기주(1996) GIS를 이용한 자치구 교통관리시스템의 구축, 96 Mapinfo Seminar, Mapinfo.
- AutoCAD(1995) The AutoCAD Drafting Package, User Reference, Autodesk, Inc.
- Akula, V. (1988) On the use of kriging in the spatial analysis of acid precipitation data, Atmospheric Environment, 22(9), 1963-1975.
- ESRI(1992) *Introduction to PC ARC/INFO 3.4D plus*, ESRI.
- Falke, S.R. and R.B. Husar (1996) *Uncertainty in the Spatial Interpolation of Ozone Monitoring Data*, U.S.A., CAPITA.
- Geo-EAS(1988) Environmental Monitoring Systems Laboratory, EPA, Las Vegas, U.S.A.
- Hopke, P.K. (1991) *Receptor Modeling for Air Quality Management*, Elsevier, New York.
- Matheron, G. (1971) *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications*, Ecole des mines de Paris : Fontainebleau, France.
- Miller, R.G. (1974) The jackknife - A review, Biometrica, 61, 1-17.
- Ripley, B.D. (1981) *Spatial Statistics*, Wiley Interscience, New York.
- Simpson, R.W. and H. Xu. (1994) Atmospheric lead pollution in an urban area - Brisbane, Australia, Atmospheric Environment, 28(19), 3073-3082.
- Stockwell, J., J.W. Sorensen, and E.M. Carreras (1993) The U.S.EPA geographic information system for mapping environmental release of toxic chemical release inventory chemicals, Risk Analysis, 13(2), 155-158.
- Surfer(1994) Surface mapping system, Golden Software, Inc.
- Tomlinson, R.F. (1972) Geographical Data Handling, Ottawa, International Geographical Data Sensing and Processing.