

## 서울지역 라돈농도의 분포예측을 위한 공간분석법 연구 Studies on the Spatial Analysis for Distribution Estimation of Radon Concentration at the Seoul Area

백승아 · 이태정 · 김신도<sup>1)</sup> · 김동술\*

경희대학교 환경·응용화학대학 대기오염연구실 및 환경연구센터,

<sup>1)</sup>서울시립대학교 환경공학과

(2008년 4월 28일 접수, 2008년 9월 30일 채택)

Seung-A Baek, Tae-Jung Lee, Shin-Do Kim<sup>1)</sup> and Dong-Sool Kim\*

College of Environment & Applied Chemistry and Center for Environmental Studies,  
Kyung Hee University

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received 28 April 2008, accepted 30 September 2008)

### Abstract

Radon is an invisible, odorless, and radioactive gas. It is formed by the disintegration of radium, which is a decay product of uranium. Some amounts of radon gas and its products are present ubiquitously in the soil, water, and air. Particularly high radon levels occur in regions of high uranium content. Although radon is permeable into indoor environment not only through geological features (bed rock and permeability) but also through the construction materials and underground water, the radiation from the geological features is generally main exposure factor. So there can be a problem in a certain space such as the underground and/or relatively poor ventilation condition.

In this study, a GIS technique was used in order to investigate spatial distribution of radon measured from subway stations of 1 thru 8 in Seoul, Korea in 1991, 1998, 2001, and 2006. Spatial analysis was applied to reproduce the radon distribution. We utilized spatial analysis techniques such as inverse distance weighted averaging (IDW) and kriging techniques which are widely used to relate between different spatial points. To validate the results from the analyses, the jackknife technique for an uncertainty test was performed. When the number of measuring sites was less than 100 and also when the number of omitted sites increased, the kriging technique was better than IDW. On the other hand, when the number of sites was over 100, IDW technique was better than kriging technique. Thus the selection of analytical tool was affected sensitively by the analysis based on the number of measuring sites.

**Key words** : Radon, GIS, Spatial analysis, IDW, Kriging

### 1. 서 론

모원소 (parent element)인 우라늄 ( $^{238}\text{U}$ )의 붕괴산  
물인 라돈 ( $^{222}\text{Rn}$ )은 자연계에 널리 존재하는 비활성

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

가스로 토양, 암석, 지하수 등에 고농도로 농축되어 있다(Appleton, 2005). 토양과 암석에서 발생하는 라돈기체는 건물의 토대, 지하실, 파이프 등을 통해 실내에 유입된다. 따라서 환기량이 부족한 실내 공기 중에 축적될 수 있다(Cramer and Burkart, 1989). 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에 따르면 라돈은 실내에 존재하는 대표적인 자연방사능 천연가스로 분류하고 있다(WHO, 2006). 라돈기체에 장기간 노출될 때 폐암발생의 위험이 증가하며 인체에 심각한 영향을 미칠 수 있다(Burkart *et al.*, 2002; Crawford, 1992). 미국환경보호청(U.S. EPA)에 의하면 미국의 연간 13만 건의 폐암 사망자 중(약 7,000~30,000명이 주거지 내의 라돈에 폭로되어 사망) 흡연에 이어 두 번째로 높은 것으로 알려져 있다(EPA, 1992). 최근 우리나라는 2004년 사망률 중 암이 26.7%로 1위를 차지하였고, 그 중 폐암의 사망률이 20.3%로 1위를 차지하였다(차동원, 2002). 그러나 국내의 경우 폐암의 발병원인을 흡연인구의 증가로 보고 있고, 라돈의 영향에 대한 언급은 전혀 없다.

서울시의 주요 교통수단인 지하철은 대량수송 및 정시성 등의 많은 장점으로 1978년 운행을 시작한 이래, 일일 수송인원 518만 명으로 규모적인 측면에서 비약적 성장을 거듭하고 있다. 또한, 서울시 3기 지하철이 완공·운행되면 우리나라 도시철도의 규모는 일본이나 유럽, 미주지역과 그 규모면에서 비슷한 수준까지 성장할 것으로 전망된다. 이와 더불어 서울시 지하철은 양적증대와 함께 이용자의 증가 및 실외 대기오염물질 유입으로 인한 공기오염의 여부도 지속적으로 주목받고 있다. 신규지하역사는 기존역사의 하부에 더욱 깊이 건설되면서 인체에 직접적이며 심각한 위협을 줄 수 있는 라돈오염원으로 작용할 수 있다. 지하역사의 라돈농도는 기반암의 종류 및 토양 특성에 따라 지역별로 차이가 있으며, 지리적 위치에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 라돈농도의 공간적인 거동을 파악하기 위해서는 지역적인 분포를 면밀히 검토할 필요가 있다. 국내 지하역사의 라돈농도에 대한 연구가 한정적으로 수행된 바 있으나(Kim and Kim, 1993; 김동술 등, 1993), 지역적인 특성을 고려한 공간분포분석과 같은 분야에 대한 연구는 부족한 실정이다.

지형인자에 중점을 둔 공간분석법(spatial analysis)

은 동일시간에 지역적으로 상이한 수용체에서 측정된 자료를 한 평면상에서 시각적으로 평가할 수 있다(윤훈주, 1997). 최근 공간분석법은 지리정보시스템(GIS: geographic information system)과 결합하여 분석하고 있다. 지리정보시스템은 인간생활에 필요한 지리정보의 효율적 생성과 저장분석을 위한 컴퓨터 기반의 체계를 의미한다. GIS는 공간적으로 분포하는 자료를 관리분석하는 데 유용한 도구이며, 환경의 각종 매체를 종합적으로 분석할 때 커다란 도움을 주고 있다. 특히 GIS는 라돈농도의 공간분포와 그 영향을 분석하여 환경오염 대처계획을 수립하는 데 큰 도움을 줄 것으로 사료된다.

공간분석법 중 최근까지 많은 연구자들이 가장 선호하는 내삽방법으로는 거리반비례평균법(IDW: inverse distance weighted averaging)과 kriging법이 있다. Kriging법은 1970년대 Matheron에 의해 개발되어 주로 지리학과 자원공학분야에서 응용해왔으며(Matheron, 1971), 환경분야에서도 산성비의 공간적 분포 등에 사용한 바 있다(Akula, 1988). IDW법 역시 미국 내 오존농도 분포에 관한 연구 등 각종 환경분야에 응용하고 있다(Falke and Husar, 1996).

본 연구에서는 총 4회에 걸쳐 지하철 역사에서 과거 축적한 라돈농도자료를 이용하여, 시·공간적인 라돈농도의 현황에 대한 관점에서 분석하고자 접근하였다. 아울러 GIS를 응용한 오염물질의 공간분포의 추이 및 분포패턴을 확보하기 위한 방법론에 중점을 두었다. 이를 위해 현재 가장 널리 사용하고 있는 내삽방법인 IDW법과 kriging법을 이용하고 불확실도를 분석하여 최적의 공간분석법을 결정하고자 하였다. 즉, 공간분석법 간의 추정능력의 유효성을 비교하여 최적의 분석법을 선택하고자 하였다. 이를 통해, 차후 서울시의 라돈오염도 패턴을 분류하므로 서울시의 라돈환경 개선을 위한 기초자료 및 공간분석기법을 제공하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 측정지점 및 기간

서울지역의 라돈 공간분포분석을 위한 라돈자료는 서울시 지하철 역사의 대합실과 승강장에서 1991, 1998, 2001, 2006년에 걸쳐 측정된 자료를 각각 기간

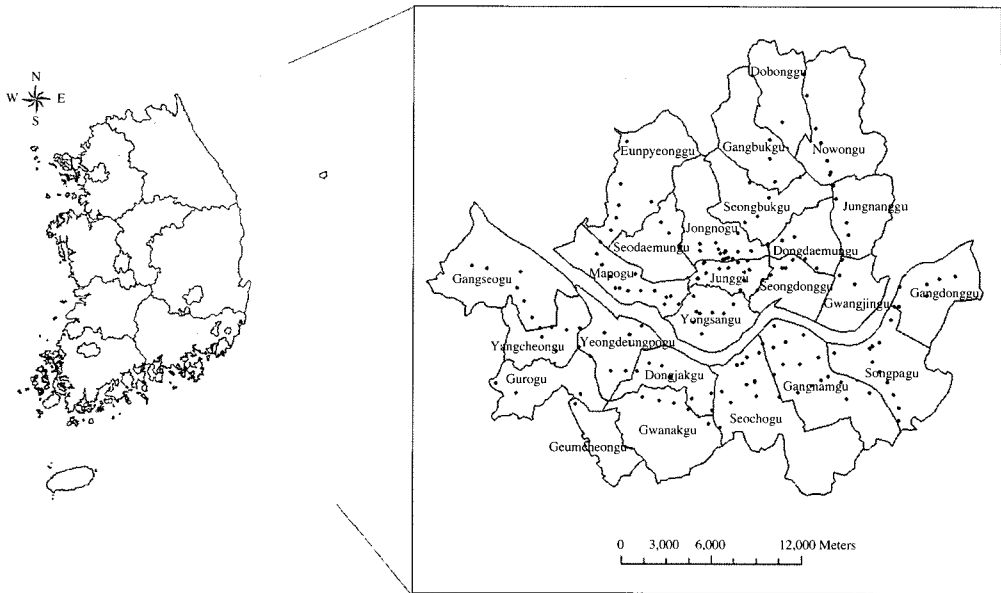


Fig. 1. Location of the study area and the sampling site.

I, II, III, IV라고 정의한 후 사용하였다. 사용자료 중 기간 I(1991년 6월부터 7월: 김동술 등, 1993), 기간 II(1998년 10월부터 11월: 지하철공사, 1998), 기간 III(2001년 4월부터 7월: 황인조 등, 2001) 자료는 미국 Femto-Tech사의 연속식 라돈모니터(Model R210F)로 측정하였으며, 측정지점의 수는 각각 83, 169, 178개였다. 기간 IV(2006년 9월부터 11월)의 총 48개 역사에 대해서는 Durrige Co.의 연속식 라돈 모니터(RAD7, USA)를 사용하여 측정하였다. 측정자료 중 기간 I의 경우 1에서 4호선까지만 운행되었기 때문에 5~8호선의 자료는 없었다. 1994년 이후에 지하철 노선이 5~8호선까지 연장 운행되어 그 이후의 자료들(기간 II~IV)은 1~8호선까지의 역사를 측정할 수 있었다. 단, 기간 II의 경우 6호선의 측정이 이뤄지지 않았다. 또한 각 기간의 측정자료는 계절적인 요인에 의한 농도변화는 고려하지 않았다.

라돈의 측정지점은 그림 1과 같이 서울시에 위치한 지하역사로서 X축 TM (Transverse Mercator) 180,000~217,000, Y축 TM 437,000~467,000 지역을 대상으로 연구를 수행하였다.

## 2.2 측정 방법

라돈농도는 동일지역이라 할지라도 지하역사의 주

변환경에 따라 크게 변할 수 있으므로 많은 주의가 필요하다. 기간 I, II, III의 지하철 역사의 실내공기 중 라돈농도 측정은 미국 Femto-Tech사의 연속식 라돈모니터(Model R210F)를 사용하였다. 이 모니터는 미국 환경보호청(U.S. EPA)에서 승인한 이동식 라돈검출기이며, 실시간 연속측정이 가능하다. 또한 일정시간 동안 방사선량을 조사하는 측정식으로도 이용할 수 있어 라돈농도의 조사 및 예비조사(screening survey)에 이상적인 방법이다. 이 모니터는 수동 확산(passive diffusion) 방식으로 Rn-222만을 측정할 수 있다. 라돈의 붕괴산물은 정전기적으로 ionization chamber 속의 electrometer에 도달하기 전에 제거된다. 측정을 위해 측정지점으로 이동 후 최초 5분간 안정화시킨 후, 10분간 3회 측정하여 평균치를 계산하여 농도로 환산하였다. 측정자료의 정도관리를 위하여 일정기간 Femto-Tech사에 보내 영점조정을 실시하였다.

반면, 기간 IV의 라돈농도 측정에 사용한 Durrige 사(RAD 7, USA)의 라돈농도측정기는 반도체 이용 알파 감지기로써 알파선을 직접 전기적 부호로 전환시킨다. 라돈측정기의 내부 샘플실은 0.7L의 반구체로 내부는 전도체로 코팅되어 있는데, 공기는 펌프에 의해 실리카겔 및 필터를 거쳐 반구체 내부로

**Table 1. Sampling period and method.**

Period	Line	Sampling period	Sample number	Sampling method
Period I (1991)	1	June ~ July	9	
	2		32	
	3		22	
	4		20	
Period II (1998)	1	October ~ November	9	Femto-Tech Inc. (Model R210F, USA)
	2		36	
	3		29	
	4		21	
	5		50	
	6		-	
	7		17	
	8		7	
Period III (2001)	1	April ~ May	9	
	2		28	
	3		26	
	4		17	
	5	June ~ July	34	
	6		22	
	7		31	
	8		11	
Period IV (2006)	1	November	2	Durridge Inc. (Model RAD 7, USA)
	2		2	
	3		5	
	4		2	
	5	September ~ October	16	
	6		9	
	7		11	
	8		1	

l L/min 유량으로 유입된다. 이 과정에서 에어로졸 및 습기가 제거된다. 이 반구의 중앙에 이온주입 반도체 (실리콘) 알파선 탐지기가 설치되어 있다. 2,500 V 이상의 고전압 전류가 내부 전도체에 흘러 탐지기로 밀어내고 라돈이 측정되는 원리이다 (김영식, 2005). 본 장비 역시 일정기간 마다 정도관리를 실시하였다. 표 1에 각 측정기간의 조사기간과 측정점의 자료 수, 측정방법을 설명하였다.

**2.3 공간분석의 이론적 고찰**

공간분석이란 공간자료로부터 추가적인 의미를 추출하기 위하여 원자료로부터 다른 형태의 자료로 조작하는 분석기법이다 (Fotheringham *et al.*, 2000). 주요 관심사는 공간자료의 주요 패턴을 조사하고, 대상 지역 내에서 이 패턴과 다른 속성 간의 가능한 관계

들을 찾아내는 것이다. 궁극적인 목표는 이해와 예측을 목적으로 이와 같은 관계들을 모델링하는 것이다 (Bailey, 1994). 공간분석법에는 연구의 목적과 대상에 따라 다양한 기법과 모델이 이용될 수 있다.

공간분석은 소프트웨어인 ArcGIS 9.0 (ESRI, 2006)으로 구축한 라돈 분포도를 수치지도에 중첩시켜 공간분석을 시도하였다. 본 연구에서는 일반적으로 공간분석에 이용하고 있는 2가지 공간내삽법인 IDW 법과 kriging 분석법을 비교·검토하였다.

각 연도별 라돈측정지점의 좌표자료와 각 지점에서 측정된 라돈농도자료를 바탕으로 IDW법을 이용하였다. IDW법에서는 미측정 지점에서의 라돈농도 (unknown concentration)가 식 (1)과 같이 기측정한 지점의 라돈농도 (known concentration)  $Z_i$ 에 대한 가중평균에 의하여 계산하며 산출식은 다음과 같다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n W_i Z_i \tag{1}$$

여기서,  $W_i$ =거리가중치,  $Z_i$ =측정된 라돈농도,  $Z^*$ =예측 라돈농도이다. 거리가중치  $W_i$ 는 농도추정지점으로부터 주변의 관측지점까지의 거리에 의해 결정할 수 있다.

$$W_i = \frac{d_i^k}{\sum_{i=1}^n d_i^k} \tag{2}$$

여기서,  $k$ =중심가중치,  $d_i$ =주변의 측정지점  $i$ 까지의 거리이다.

본 연구에서는 예측하고자 하는 지점의 라돈농도는 그 지점에서 가까운 측정지점의 농도값을 가중평균하였는데, 예측값은 미측정 지점에서 가까이 위치한 측정장소의 농도값에 더 큰 영향을 받고 멀리 떨어져 있는 측정지점의 농도값에는 상대적으로 덜 영향을 받는다.

Kriging 분석법은 주위에 알려진 값들의 상호관계에 따른 가중치를 이용한 선형조합 분석법으로 미지의 지점에서 새로운 값을 예측하는 방법이다. 이때, 예측한 값들이 가지는 정확성을 정량적으로 평가하기 위해, 오차분산을 계산하거나 조건부 시뮬레이션을 사용하여 여러 개의 확률분포를 갖는 자료를 생성할 수 있다 (최종근, 2004). Matheron (1971)이 개발한 이 분석법의 기본수식은 다음과 같다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (3)$$

여기서,  $\lambda_i$ =가중치,  $Z_i$ =측정한 라돈농도,  $Z^*$ =예측한 라돈농도이다. 가중치  $\lambda_i$ 는 주변의 농도값에 의해 정규분포 또는 대수함수분포 등의 규칙성을 갖게 된다. 이러한 규칙성은 평균, 거리, 분산과 같은 매개변수에 의해 결정된다. Kriging 분석법에 있어서는 연속공간에서 발생하는 현상에 대한 규칙성을 갖는 매개변수의 확보가 중요하다(Ripley, 1981). 이 규칙성을 확률함수(random function)  $Z(X)$ 로 나타내며, 이중 지역변수(regional variable)는 확률변수(random variable)의 하나로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z(X_i) = X_i$$

$$X_i = (X_i \cdot Y_i) \quad (2\text{차원일 경우}) \quad (4)$$

임의의 지점에 대한 농도함수가 거리  $h$ 에 의해 일정한 규칙을 갖는다면 확률함수는 고정함수라고 할 수 있다. 즉,

$$f(Z(X_1), \dots, Z(X_k)) = f(Z(X_{i+h}), \dots, Z(X_{k+h})) \quad (5)$$

이러한 확률함수에 자료해석의 현실성을 부여하기 위해 변이도(variogram)라는 매개변수로 도입할 수 있다. 이때, 변이도는 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도이다. 변이도는 모두 일정거리만큼 떨어진 공간자료들의 유사성을 나타내지만 공간자료의 가중치에 대한 편중성을 완화시키기 위해서, 준변이도(semi-variogram)를 사용하며, 다음과 같이 표시한다(Matheron, 1971).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [(z(x_i) - z(x_i+h))^2] \quad (6)$$

여기서,  $h$ =지점 간의 거리,  $z(x_i)$ = $i$ 번째 측정된 라돈농도,  $n$ = $h$ 만큼 떨어진 자료의 개수로서  $h$ 만큼 떨어진 두 자료 간의 차이를 제공하는 것의 기대치를 나타낸다. 변이도 분석을 위해 Geostatistic Analysis를 이용하여 구형모델(spherical model)을 최적모델로 선정하였다. 본 연구에서 사용한 함수는 다음과 같다.

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

$$\gamma(h) = C \quad (hl > a) \quad (7)$$

여기서,  $h$ =분리거리,  $a$ =상관거리,  $C$ =sill을 나타낸다.

## 2.4 공간분석 평가를 위한 불확실도 분석법

본 연구에서는 공간분석법에 내재한 분석방법에 대한 검증에 대해 불확도 분석(uncertainty analysis)을 수행하였다. 본 연구에서 2가지 공간분석방법의 미측정지점에 대한 예측능력을 평가하기 위하여 jackknife 개념(Miller, 1974)과 오차거리(error distance) 개념을 이용하여 불확실도를 분석하였다. 먼저 jackknife 개념을 도입하여 각 측정지점에서 실측치를 한 번에 하나씩 순차적으로 제거한 후, 나머지 측정지점의 실측치를 이용하여 제거한 나머지 측정지점에서의 라돈농도를 추정하였다. 이때 실측치와 추정치 간 차이의 절대값을 오차거리로 정의하였다. 각 측정지점에서 산출한 값의 차를 누적시켜 오차합(error-sum)을 계산하였다.

$$E = \sum_{i=1}^k (|O_i - e_i|) \quad (8)$$

여기서,  $E$ =오차합,  $O_i$ =측정된 라돈농도,  $e_i$ = $i$ 개수만큼 측정지점의 수를 제거했을 때 나머지 측정지점에서 예측한 라돈농도,  $k$ =내삽이 가능한 지점의 수이다. 그러나 전체 자료를 모두 구한다는 것은 무리가 따르므로 대표적 자료로 전체를 나타낼 수 있는 자료추출법의 도입이 필요하다. 자료추출법에는 규칙추출법(systematic sampling)과 무작위 추출법(random sampling)이 있는데, 본 연구에서는 무작위 추출법을 사용하였다. 난수발생(random number generation)을 위해 Turbo-C의 난수발생 확률함수를 이용하였다. 따라서 본 연구에서는 확률함수를 이용하여, 측정지점을 무작위로 선정하고 제거시키면서, 각각 5회에 걸쳐 측정값과 예측값의 오차를 구하고 이 값을 누적하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 라돈농도의 경향

본 연구에서는 기간 I(1991년 6월부터 7월), 기간 II(1998년 10월부터 11월), 기간 III(2001년 4월부터 7월), 기간 IV(2006년 9월부터 11월)에 각각 측정된 478개의 라돈농도 자료를 사용하였다(황인조 등,

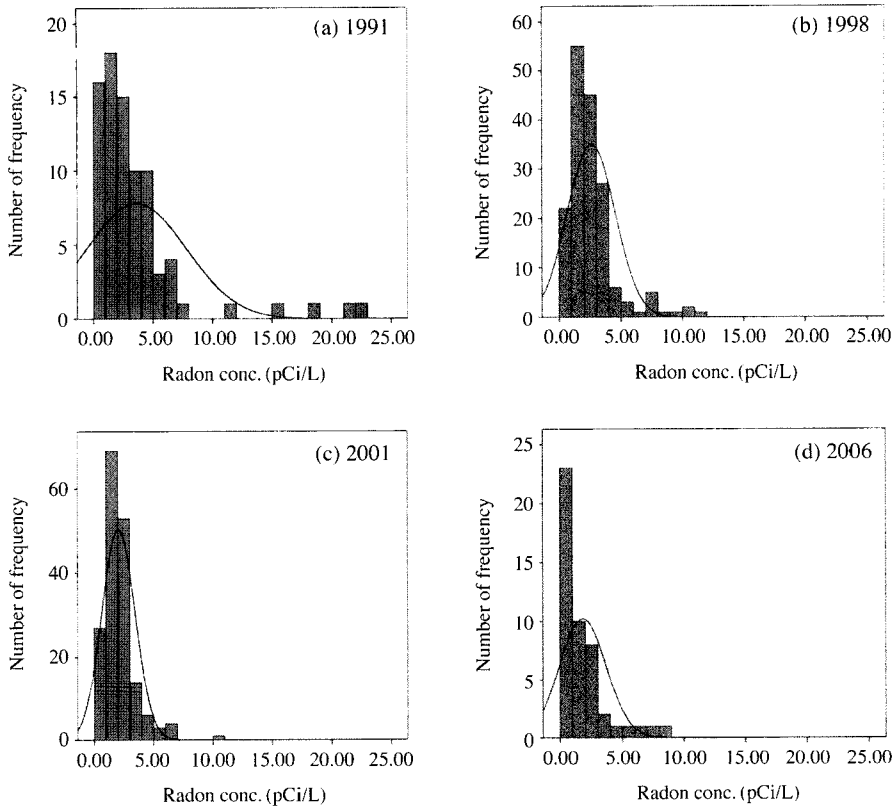


Fig. 2. Frequency distribution of radon concentration in the subway stations at the Seoul area. (a) 1991, (b) 1998, (c) 2001, and (d) 2006.

2001; 서울시 지하철공사, 1998; 김동술 등, 1993). 그림 2는 1991년, 1998년, 2001년, 2006년에 측정된 각각 연도별 측정된 승강장의 라돈농도를 대상으로 1 pCi/L 간격으로 조사한 빈도분포이다. 1991년, 1998년, 2001년의 경우 가장 높은 빈도분포를 보인 농도 범위는 1~2 pCi/L에 해당한다. 기간 I의 경우 승강장 18개, 대합실 29개, 기간 II의 경우 승강장 55개, 대합실 50개, 기간 III의 경우 승강장 69개, 대합실 62개 역사로 조사되었다. 기간 IV의 경우 가장 높은 빈도분포를 보인 농도범위는 0~1 pCi/L로 승강장 23개, 대합실 25개 역사로 조사되었다. 각 측정된 라돈농도의 85% 이상이 라돈농도의 실내환경 권고치인 4 pCi/L 이하로 조사되었다.

본 연구자료인 라돈농도의 분포특성은 정규분포가 아닌 저농도 쪽으로 치우치는(skewed) 형태를 보이고 있어 본 자료의 분포를 정규화시켜 연도별 평균

농도를 산출하였다. 즉, 로그변환한 기하평균, 기하표준편차를 산출하여 표 2에 제시하였다. 1기 지하철인 1호선에서 4호선과 2기 지하철인 5호선에서 8호선의 대합실과 승강장의 실내 라돈농도를 비교한 바, 호선별 농도의 경향은 기간 I은 3호선의 농도가 높게 나타났고, 기간 II, IV의 경우 2기인 7호선의 라돈농도가 높게 나타났음을 알 수 있다. 반면, 기간 III의 라돈농도는 기간 II, IV와 달리 승강장과 대합실 모두 1기 지하철인 3호선과 1호선의 라돈농도가 높게 나타났다. 이는 기간 III의 경우 1호선에서 4호선까지의 측정은 봄철에 측정하였고, 2기인 5에서 8호선의 경우 대부분 여름철에 측정하였다. 이는 기간 II와 IV의 경우 가을철에 측정된 반면 기간 III은 봄철과 여름철에 걸쳐 측정된 결과이기 때문이다. 김동술 등(1993)은 계절별 라돈농도 측정 결과 겨울철에 높은 농도를 보였고 여름철에 낮은 농도를 보였다. 봄

**Table 2. Results of average radon concentrations and standard deviations.**

(unit: pCi/L)

Line	1991				n***	1998				n
	Platform		Concourse			Platform		Concourse		
	G.M.*	G.S.D.**	G.M.	G.S.D.		G.M.	G.S.D.	G.M.	G.S.D.	
1	2.48	1.50	2.02	1.70	9	1.09	2.20	1.58	1.53	9
2	1.11	2.76	0.92	2.45	32	1.65	1.62	1.16	2.20	36
3	5.26	2.40	4.43	2.63	22	2.32	1.51	2.10	1.56	29
4	2.27	2.07	2.25	2.02	20	2.22	1.71	1.63	1.87	21
5	-	-	-	-	-	2.17	2.32	2.30	1.86	50
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	3.16	2.27	3.38	1.77	17
8	-	-	-	-	-	1.95	1.28	1.65	1.50	7
Average	2.19	2.92	1.87	2.86	83	2.07	2.00	1.89	2.56	169

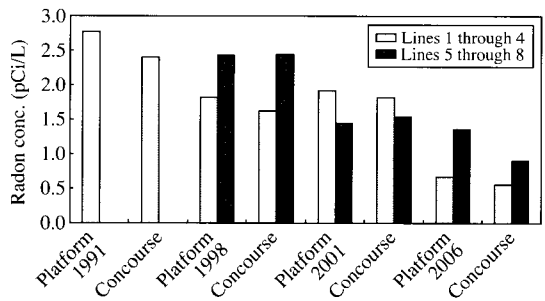
  

Line	2001				n	2006				n
	Platform		Concourse			Platform		Concourse		
	G.M.	G.S.D.	G.M.	G.S.D.		G.M.	G.S.D.	G.M.	G.S.D.	
1	1.97	1.41	2.12	1.89	9	0.78	1.23	0.58	1.83	2
2	1.93	1.94	1.36	2.97	28	0.63	1.13	0.45	1.62	2
3	2.11	1.99	1.88	2.15	26	0.81	2.13	0.66	2.04	5
4	1.64	1.87	1.93	2.27	17	0.45	1.42	0.53	1.00	2
5	1.74	1.92	2.06	2.12	34	1.33	1.98	0.95	2.08	16
6	1.16	2.48	1.44	1.92	22	1.09	2.46	1.00	2.25	9
7	1.19	2.69	1.53	2.88	31	2.15	2.54	1.35	3.16	11
8	1.70	1.44	1.15	4.06	11	0.85	1.00	0.32	1.00	1
Average	1.62	2.16	1.66	2.54	178	1.22	2.37	0.91	2.43	48

\*G.M.: geometric mean, \*\*G.S.D.: geometric standard deviation, \*\*\*n: number of sample

과 가을의 농도는 겨울보다는 낮고 여름철보다는 높은 농도를 나타내 비슷한 경향을 보였다. Singh *et al.* (2005)은 실내 라돈농도가 여름철에 낮게 나타난 이유로 여름철의 환기장치의 가동이 겨울철을 비롯한 다른 계절보다 집중적으로 이루어졌기 때문이라고 설명하고 있다. 이탈리아지역의 라돈농도의 계절적 분포를 조사한 Sesana *et al.* (2003)은 계절에 따른 토양 내 방출율의 차이로 여름철보다 겨울철에 3배 이상 높은 계절적 패턴이 발생한다고 고찰하고 있다.

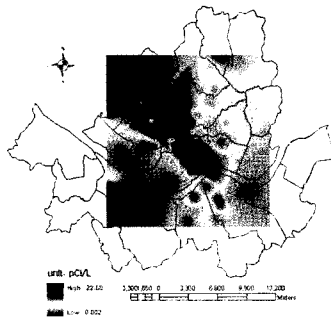
그림 3은 1~4호선까지의 1기 지하철과 5~8호선까지의 2기 지하철로 나누어 실내라돈농도를 비교한 그림이다. 1기 지하철의 경우, 동일한 지점에서 연도 별로 측정된 결과가 2기 지하철이 건설되고 개통된 이후에 농도가 뚜렷하게 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 먼저 운행이 개시된 1기 지하철이 지상에 비교적 가깝게 위치한 반면 2기 지하철은 더욱 깊숙이 지하에 위치하기 때문이다. 보편적으로 동일 지점의 경우 지하에 깊이 위치할수록 지표에 가까이



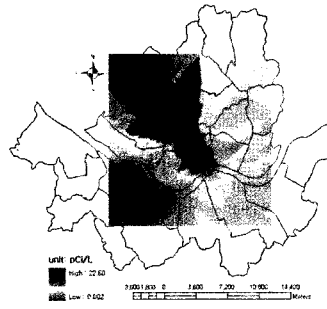
**Fig. 3. Comparison of radon concentrations between the Lines 1 through 4 and the Lines 5 through 8.**

위치한 역사보다 역사내 실내 라돈농도가 높게 나타나는 경향이 있다. 이와 같은 라돈농도의 수직적 변화는 지하로 내려갈수록 토양압력이 커지고 실내로의 라돈 유입량이 증가하기 때문이다. 또한, 라돈을 함유한 지하수의 수위가 1기 지하철 수위에서 2기 지하철 수위로 이동하기 때문이기도 하다. 이러한 현

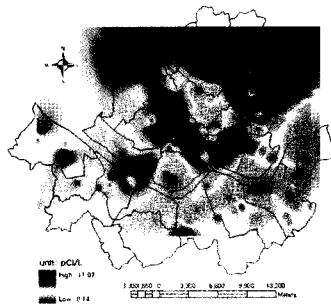
(a) 1991 inverse distance weight



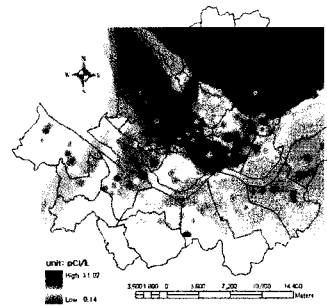
(b) 1991 kriging



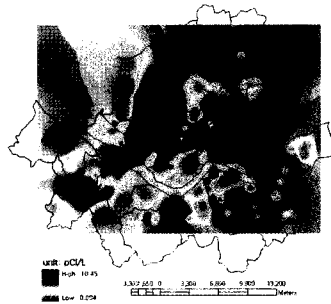
(c) 1998 inverse distance weight



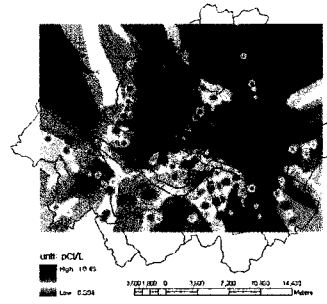
(d) 1998 kriging



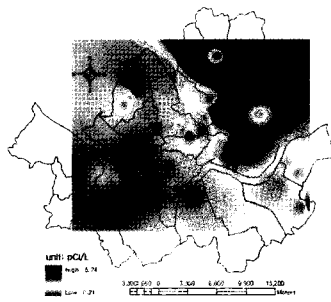
(e) 2001 inverse distance weight



(f) 2001 kriging



(g) 2006 inverse distance weight



(h) 2006 kriging

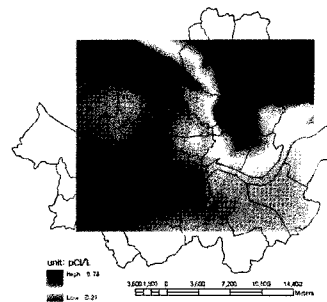


Fig. 4. Maps for spatial interpolation of radon concentration in subway platforms at Seoul.



상은 1기 지하철과 2기 지하철이 겹치는 모든 환승역에서 뚜렷하게 관측되고 있다. 한편, 2기 지하철의 경우 라돈농도는 1998년도를 고점으로 크게 저감하고 있다. 이는 당시 지하철 라돈오염이 사회적 문제로 대두된 이후 지하수의 실내 재활용 제한 및 누수 관리 방안 등을 강구하였기 때문이다.

### 3. 2 라돈의 공간분포 경향

공간분석법은 연구대상지역에 산재한 다량의 정보들이 지닌 특징을 가시적으로 설명할 수 있도록 분류하고 표현하는 분석법이다. 공간분석의 가장 큰 단점은 미래에 대한 추정능력이 불가능하며 현재까지 진행 중인 과정만을 해석할 수 있다는 점이다. 본 논문에서는 연구기간 동안 측정된 라돈의 역사별 농도를 입력자료로 사용하여, 각 연도별 및 지점별로 농도를 추정하였다. 앞에서 언급한 2가지 공간분석법인 거리반비례법과 kriging 분석법의 공간분석 결과, 전반적으로 미측정 지역에 대한 추정결과가 비슷하게 나타났다. 그러나 특정 시점에 대해 서로 다른 해석이 가능하였으며, 실제 다른 예측값을 보였다.

그림 4는 서울지역 라돈농도의 각 연도별 공간적 변동을 IDW법과 kriging법으로 분석한 결과를 제시하였다. 이때 cell의 크기는 100 m × 100 m로 나타났다. 서울지역 라돈농도의 공간적 변동에 대한 결과를 살펴보면, IDW법과 kriging 분석법 모두 1991년 서울지역의 라돈농도가 종로구 지역에 집중하고 있음을 보여주고 있다. 라돈농도 변화의 방향성을 가지는 데 은평구에서 중구까지 북서방향에서 남동방향으로 농도가 집중되고 있다. 이 지역은 은평구, 종로구, 중구를 포함한 지역으로 라돈농도가 높은 기반암석이 화강암 지하 역사인 3호선이 지나가고 있는 지역이다 (한국자원연구소, 1999). 1998년 이후의 공간분포 분석은 5~8호선이 추가 운행 되면서 1991년과는 다른 공간분포를 나타내고 있다. 그 중 1998년과 2006년에는 1~8호선이 운행되면서, 라돈농도의 공간분포 변화가 확연히 다르게 나타나고 있다. 특히, 1998년의 경우 도봉구, 노원구, 종로구에서 집중하는 경향을 보여주고 있다. 2006년의 경우 도봉구, 성북구와 동대문구의 경계면 쪽으로 집중하고 있음을 보여주고 있다. 즉, 라돈농도는 방향성을 가지며, 노원구에서 종로구까지 북동방향에서 남서방향으로 농도가 집중하고 있음을 알 수 있다. 특히 7호선이 지나

는 도봉구와 노원구에서 높은 농도분포를 나타내고 있는데, 이 지역은 화강암과 층적층으로 이루어진 기반암석으로 구성되어 있다 (한국자원연구소, 1999). 또한, 남북방향의 주향이동단층인 추가령 단층에 의하여 중앙이 절단단층이 지나가는 지역이다. Ioanidex *et al.* (2003)에 의하면, 단층 중심부로 갈수록 라돈농도가 높게 나타나며, 추정단층지대의 라돈농도는 단층지대에서 나타난 농도값과 유사하게 높게 나타난다. 한편, 2001년의 경우 거의 전 지역의 라돈농도가 산발적으로 분포되어 있다.

### 3. 3 공간분석법의 불확실도 분석

공간분석법 사이의 추정능력을 평가하기 위하여 root mean square error (RMSE)를 사용하여 추정값과 실측값의 결과가 유사한 지를 살펴보았다 (Salih *et al.*, 2002). 표 3은 RMSE의 값과 회귀분석을 수행한 결정계수 ( $r^2$ )을 정리하였다. 그림 5에는 라돈농도의 추정값과 실측값을 95% 신뢰구간에서 회귀직선을 제시하였다. 회귀분석결과 IDW의 분석결과가 kriging 분석법보다 상대적으로 유의하게 나타났다. 결정계수의 절대값의 경우, IDW법은 0.90~0.99의 매우 높은 상관성을 보였고, kriging법의 경우도 0.67~0.99 사이에서 비교적 높은 상관관계를 보였다. 당연히  $r^2$ 이 클수록 RMSE 값은 낮게 나타났다. 결론적으로 IDW법과 kriging법의 회귀분석결과 두 방법 모두 높은 유의성을 보였지만, IDW법의 추정능력이 kriging법 보다는 우수하다고 판단된다.

**Table 3. Comparison of calculated correlation coefficient and root mean square error (RMSE) between predicted and measured radon concentrations in subway platforms and concourses at Seoul.**

IDW	Platform		Concourse	
	$r^2$	RMSE	$r^2$	RMSE
1991	0.9459	0.941	0.9055	0.569
1998	0.9919	0.176	0.9921	0.185
2001	0.9966	0.082	0.9929	0.185
2006	0.9950	0.009	0.9809	0.008
Kriging	Platform		Concourse	
	$r^2$	RMSE	$r^2$	RMSE
1991	0.6761	2.632	0.7108	2.617
1998	0.8433	0.829	0.9905	0.209
2001	0.7680	1.236	0.9973	0.109
2006	0.7722	0.802	0.8156	0.868

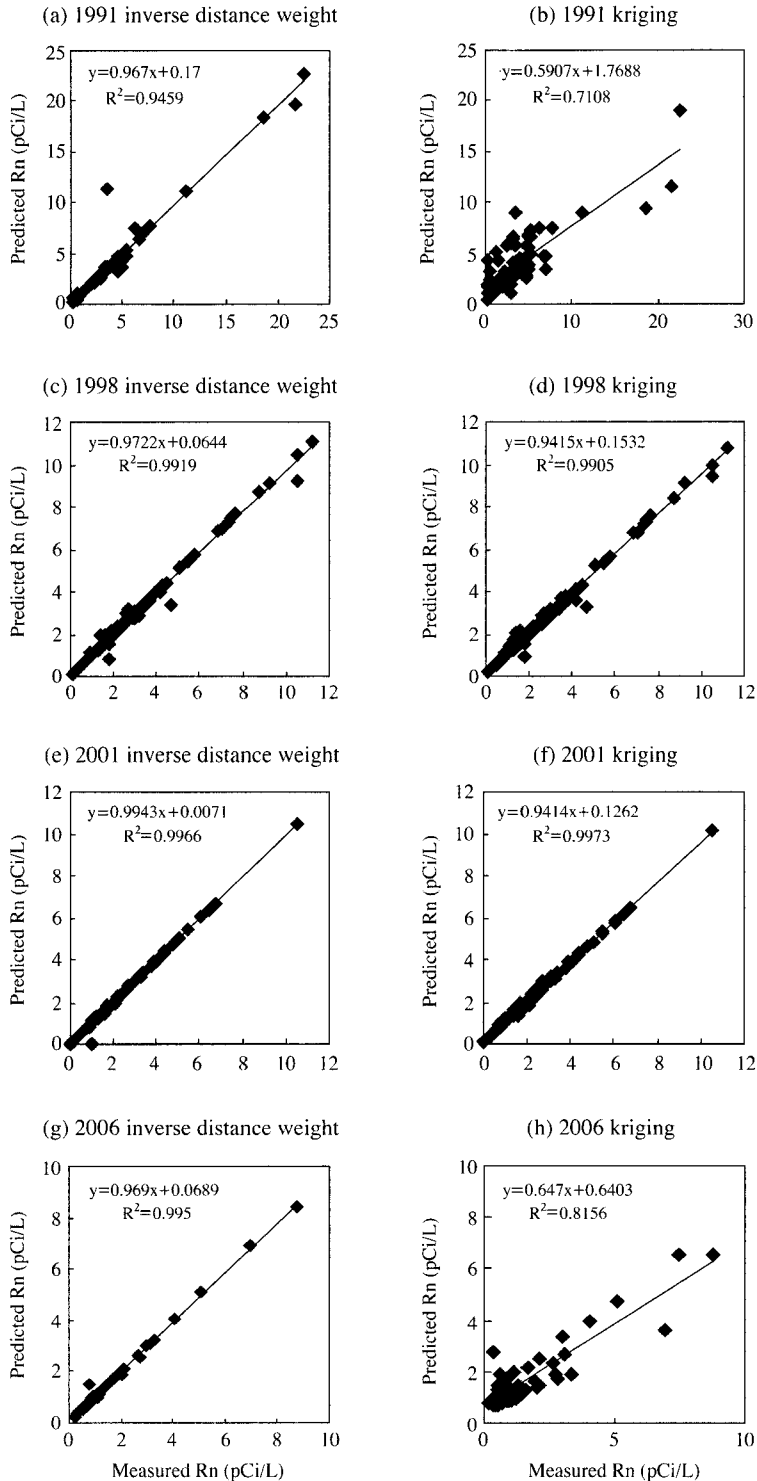


Fig. 5. Regression plots between predicted and measured radon concentrations in subway platforms at Seoul.

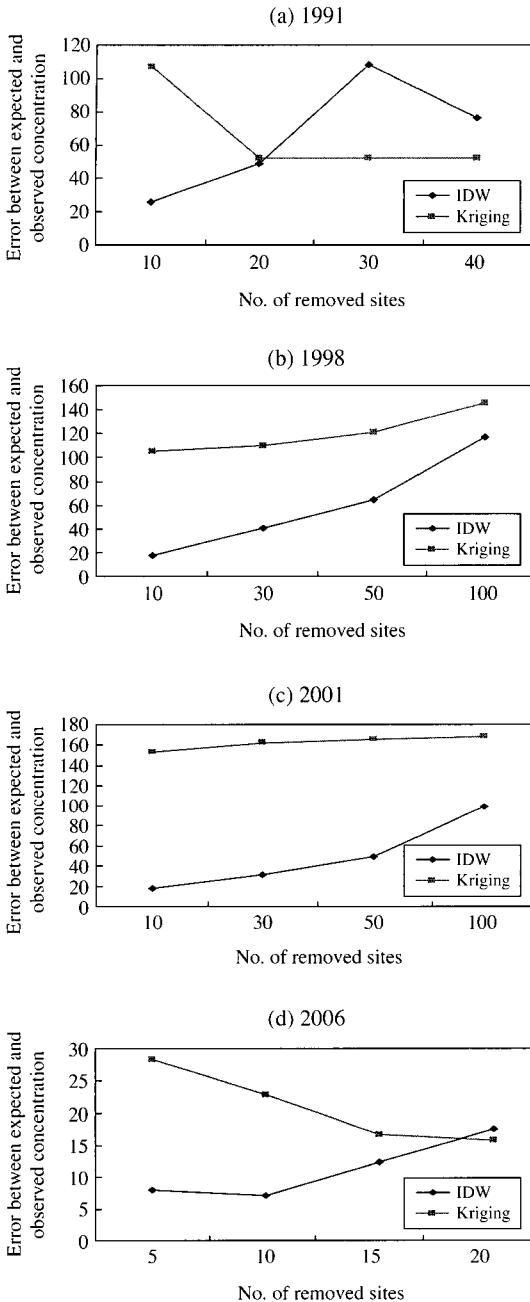


Fig. 6. Comparison of uncertainty analysis results between IDW and Kriging spatial interpolation techniques according to number of removed sites.

앞의 분석결과에서 살펴보았듯이, 공간분포의 결과는 내삽방법에 따라 차이가 있을 수 있다. 본 연구에

서는 2가지 공간분석방법의 미측정지점에 대한 추정력을 검증하기 위하여 jackknife 개념과 오차거리합 개념을 이용하였으며 불확도 분석결과는 다음과 같다. 먼저 각 측정지점소의 승강장에서 측정한 라돈값과 순차적으로 측정지점을 제거하여 나머지 측정지점으로 제거한 지점의 라돈농도를 추정한 값의 차를 누적시켰다. 1991년의 경우 10, 20, 30, 40개의 순, 측정 지점수가 많은 해인 1998년과 2001년에는 10, 30, 50, 100개의 순, 마지막으로 2006년에는 시료의 수가 적어 5, 10, 15, 20개의 순으로 지점을 제외시킨 후 각 지점에서의 오차를 비교분석하였다.

승강장의 경우 1991년은 측정지점의 개수가 83개로서 10개 지점을 제외시킨 후 미측정지역을 예측할 경우 IDW법이 예측율이 좋았다. 반면 20개 지점 이상을 제외시킨 후 미측정지역을 예측시 kriging법이 우수하였다. 1998년의 경우 측정지점이 169개로서 측정지점을 100개까지 제거함에도 불구하고 IDW법이 kriging법보다 우수하였다. 2001년의 경우도 측정지점이 178개로서 100개의 측정지점들을 제거하였음에도 불구하고 IDW법 미측정지역의 예측율이 좋았다. 반면 2006년의 경우, 측정지점이 48개로서 5개 지점을 제외시킨 후 미측정지역을 예측할 경우 IDW법의 오차가 적고 우수하게 나타났다. 20개 지점을 제외시킨 후 미측정지역을 예측할 경우 kriging법의 오차가 적게 나타나 kriging법이 우수하였다. 이는 측정지점의 개수에 따라 분석방법을 달리 결정할 수 있는 결과로 사료된다.

#### 4. 결 론

공간분석은 공간자료로부터 주요패턴을 조사하고, 대상지역 내에서 이 패턴과 다른 속성 간의 가능한 관계들을 찾아내는 것이다. 공간분석을 수행할 때 GIS를 활용할 경우 복잡한 공간데이터를 빠른 시간 내에 정확하게 분석할 수 있기 때문에 공간분석 과정에서 GIS를 활용하면 연구의 정확성과 신속성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 지역적으로 상이한 수용체에서 측정한 라돈자료를 한 평면상에서 시각적으로 평가하기 위하여 GIS와의 연계를 통해 서울지역 라돈농도의 공간적 분포특성에 대한 분석을 시도하였다. 이를

위해 1991년, 1998년, 2001년, 2006년의 서울시 지하 역사에서 측정된 라돈농도의 현황 및 공간적 패턴을 중심으로 분석을 시도하였다. 라돈지도 개발을 위한 농도분포도를 재현하기 위해 널리 응용하고 있는 2 가지 공간분석법인 IDW법과 kriging법에 대한 공간 추정능력을 비교하였다. 특히 공간분석 간의 상대적 우수성을 검증하기 위하여 잭나이프(jackknife) 분석을 이용한 불확도 검증을 수행하였다.

지하역사 라돈농도자료에 대하여 2가지 공간분석법을 수행하고 실측값과 예측값 사이의 회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 결정계수 ( $r^2$ )의 절대값이 IDW법은 0.90~0.99의 매우 높은 상관관계를 보였고, kriging법의 경우 0.67~0.99의 상관관계를 보였으나, 전반적으로 IDW법의 추정력이 우수하였다. 또한 jackknife 개념과 오차거리개념을 도입한 불확도 분석을 통하여 공간분석법 간의 상대적 유효성을 검증한 결과 측정지점의 개수가 100개 미만인 1991년과 2006년의 경우 제거된 측정지점이 클수록 kriging법이 우수하였지만 측정지점의 개수가 100개 이상인 1998년과 2001년의 경우 거리반비례평균법이 우수하게 나타났다. 이는 측정지점의 개수에 따라 공간분석방법을 달리 결정할 수 있다는 결과라고 사료된다. 본 연구결과는 추후 구축될 라돈확률지도의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2007년 서울시 산학연협력사업지원과제(과제번호 10593)-미래 도시의 웰빙을 위한 실내 공기질 관리기술개발-의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

김동술, 김윤신, 김신도, 신웅배, 김성천, 유정석 (1993) 서울시 지하철역내의 라돈 농도분포 및 저감대책, 한국대기보전학회지, 9(4), 271-277.  
 김영식 (2005) 건물 층별에 따른 라돈농도에 관한 연구, 한국환경보건학회지, 31(1), 94-98.  
 서울시 지하철공사(1998) 서울시 지하철 환경개선 방안 연구.

윤훈주(1997) GIS를 이용한 강하본진 중 금속원소의 공간 분포 분석, 한국대기보전학회지, 13(6), 463-474.  
 차동원(2002) 압력차에 의한 지하실의 실내 라돈농도 변화와 토양가스분석 Test-Cell Study (II), 환경관리학회지, 8(1), 59-65.  
 최종근(2004) 공간정보 모델링-크리깅과 최적화 기법, 구미서관.  
 한국자원연구소(1999) 서울-남천점 지질도폭 설명서, 과학기술부, KR-99(S)-1.  
 황인조, 한근혁, 최형욱, 김동술, 김신도(2001) 서울시 지하철역사내 라돈의 농도분포, 환경연구논문집, 경희대학교, 10, 1-10.  
 Akula, A. (1998) On the use of kriging in the spatial analysis of acid precipitation data, Atmospheric Environment, 22(9), 1963-1975.  
 Appleton, J.D. (2005) Radon in air and water. In Essentials of Medical Geology, Impacts of the Natural Environment on Public Health (Selinus, O., B. Alloway, J. Centro, R. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh, and P. Smedley Eds), Elsevier Academic Press, pp. 227-262.  
 Bailey, T.C. (1994) A Review of Statistical Spatial Analysis in Geographical Information System, London: Taylor and Francis.  
 Burkart, W., M. Sohrabi, and A. Bayer (2002) High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects. Elsevier Science B.V.  
 Crameri, R. and W. Burkart (1989) Radon problem, Radiat. Phys. Chem., 34(2), 251-259.  
 Crawford, D.J. (1992) Cancer risk from radon, J. AWMA, 77-81.  
 EPA (1992) A Citizen's Guide to Radon: EPA, ANR-464, 4022-K-92-001.  
 ESRI (2006) ArcGIS 8 Using ArcGis Geostatistical Analyst.  
 Falke, S.R. and R.B. Husar (1996) Uncertainty in the Spatial Interpolation of Ozone Monitoring Data, U.S.A., CAPITA.  
 Fotheringham, A.S., C. Brunson, and M. Charlton (2000) Quantitative Geography: Perspective on Spatial Data Analysis, London: Sage Publications.  
 Ioannidex, K., C. Papachristodoulou, K. Stamoulis, D. Karamanis, S. Pavlides, A. Chatzipetros, and E. Karakala (2003) Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones, Applied Radiation and Isotopes, 59, 205-213.  
 Kim, D.S. and Y.S. Kim (1993) Distribution of airborne radon concentrations in Seoul metropolitan subway station, Health Physics, 65(1), 12-16.

- 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, 1-71.
- Ripley, B.D. (1981) *Spatial Statistics*, John Wiley & Sons.
- Salih, I., H.B.L. Pettersson, A. Sivertun, and E. Lund (2002) Spatial correlation between radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) in ground water and bedrock uranium ( $^{238}\text{U}$ ), GIS geostatistical analyses, *J. of Spatial Hydrology*, 2(2), 1-10.
- Sesana, L., E. Carproli, and G.M. Marcazzan (2003) Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere, *Journal of Environmental Radioactivity*, 65, 147-160.
- Singh, S., R. Maehra, and K. Singh (2005) Seasonal variation of indoor radon in dwellings of Malwa region, Punjab, *Atmospheric Environment*, 39, 7761-7767.
- World Health Organization (2006) <http://www.who.int/en/>.