

공간분석 기법을 이용한 대기오염 개인노출추정 방안 소개 및 적용의 사례

Prediction Approaches of Personal Exposure from Ambient Air Pollution Using Spatial Analysis: A Pilot Study Using Ulsan Cohort Data

손지영^{1,2)} · 김윤신¹⁾ · 조용성³⁾ · 이종태^{4)*}

¹⁾한양대학교 일반대학원 보건학과, ²⁾예일대학교 삼림환경대학원
³⁾캘리포니아주립대학교 보건대학원 역학과, ⁴⁾고려대학교 보건과학대학 환경보건학과
(2009년 5월 1일 접수, 2009년 6월 22일 수정, 2009년 7월 8일 채택)

Ji-Young Son^{1,2)}, Yoon-Shin Kim¹⁾, Yong-Sung Cho³⁾ and Jong-Tae Lee^{4)*}

¹⁾Department of Public Health, Hanyang University, Seoul, Korea

²⁾School of Forestry and Environmental Studies, Yale University, CT, USA

³⁾Department of Epidemiology, School of Public Health, UCLA, CA, USA

⁴⁾Department of Environmental Health, College of Health Science, Korea University, Seoul, Korea

(Received 1 May 2009, revised 22 June 2009, accepted 8 July 2009)

Abstract

The objectives of this study were to introduce spatial interpolation methods which have been applied in recent papers, to apply three methods (nearest monitor, inverse distance weighting, kriging) to domestic data (Ulsan cohort) as an example of estimating the personal exposure levels. We predicted the personal exposure estimates of 2,102 participants in Ulsan cohort using spatial interpolation methods based on information of their residential address. We found that there was a similar tendency among the estimates of each method. The correlation coefficients between predictions from pairs of interpolation methods (except for the correlation coefficient between nearest monitor and kriging of CO and SO₂) were generally high ($r=0.84$ to 0.96). Even if there are some limitations such as location and density of monitoring station, spatial interpolation methods can reflect spatial aspects of air pollutant and spatial heterogeneity in individual level so that they provide more accurate estimates than monitor data alone. But they may still result in misclassification of exposure. To minimize misclassification for better estimates, we need to consider individual characteristics such as daily activity pattern.

Key words : Personal exposure, Prediction, Spatial interpolation, Air pollution

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-940-2867, E-mail : jtlee@korea.ac.kr

1. 서 론

역학연구는 인구집단을 대상으로 수행되는 연구형태이기 때문에 정확한 노출평가를 위해서는 연구대상자 개개인들에 대한 개인노출평가를 수행하는 것이 가장 바람직한 노출평가 방법이라 할 수 있다. 그러나 이러한 개인노출평가 방법은 많은 시간과 비용, 인력이 소요되기 때문에 이러한 방법을 통해 인구집단 전체에 대한 개인노출평가를 수행한다는 것은 현실적으로 불가능한 일이다.

지금까지의 대부분의 대기오염 역학연구들에서는 대기오염측정망에서 상시 측정되고 있는 대기오염물질 농도 자료를 이용하여 대기오염노출을 추정해 왔다. 이러한 접근방법은 한 측정망에서 측정된 공간적으로 평균화된 대기오염 농도가 다양한 위치에 거주하는 개인들의 노출치를 대표한다는 가정하에, 측정망이 위치하는 행정구역 단위를 기준으로 하여 하나 혹은 둘의 측정망에서 측정된 대기오염농도를 개인의 노출로 할당하였다. 그러나 이러한 노출평가 방법은 노출에 있어서 개인의 공간적 이질성(heterogeneity)을 반영하지 못하여 노출평가의 비틀림(bias) 혹은 분류오류(misclassification) 등과 같은 불확실성을 야기시키고 이로 인해 대기오염으로 인한 건강영향을 평가함에 있어서 그 결과가 과소평가될 수 있는 가능성이 있다(Kim *et al.*, 2009; Bell, 2006).

최근에는 전세계적으로 대기오염물질에 의한 인체영향 평가 시 이러한 노출평가의 불확실성을 감소시키고 보다 정확한 노출평가를 위한 새로운 노출추정 방안들에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 특히 다양한 생체노출지표의 활용이나 지리정보시스템(Geographic Information System) 등과 같은 mapping method, personal exposure modeling 등 보다 세밀한 노출추정 방안들이 개발되고 급속도로 발전하고 있다(Zou *et al.*, 2009; Henderson *et al.*, 2007; Liao *et al.*, 2006).

그러나 국내에는 아직까지 보다 타당성 있는 개인노출평가 및 추정 기법에 대한 연구가 체계적으로 수행되고 있지 못한 실정이다. 이에 본 연구에서는 대기오염 노출평가에서 현재 활발히 수행되고 있는 몇 가지 공간분석 기법들을 소개하고 이를 국내자료에 적용해 보고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 2003년부터 2007년까지 울산시 주민 코호트 참여자의 거주지 정보를 토대로 공간분석 기법(nearest monitor, inverse distance weighting, kriging)을 이용하여 대기오염의 개인노출수준을 추정하였다.

2.1 연구대상기간 및 지역

지난 2003년부터 현재까지 환경부에서는 울산 공단지역 주민을 대상으로 지역주민 환경오염 노출수준 및 생체지표 모니터링 사업을 수행중에 있으며 이 사업에서는 대기오염에 의한 건강피해가 특히 우려되는 공단지역 주민을 대상으로 유해환경오염 물질의 노출상태와 건강영향을 지속적으로 감시, 평가하고 대기오염의 장기노출로 인한 건강영향을 파악하기 위한 코호트 연구를 수행하고 있다(이종태 등, 2008). 이 사업에서는 연구사업에 참여하기를 동의한 참여자들을 대상으로 건강검진 및 설문조사 등을 수행하였고 본 연구에서는 지난 2003년부터 2007년까지 이 코호트에서 얻어진 4년간의 자료를 바탕으로 울산 코호트 참여자 총 2,102명의 거주지 정보를 이용하여 건강검진 당일의 개인노출추정치를 구하였다. 그림 1은 연구지역 및 대기오염 측정망의 위치를 나타낸 그림이다(그림 1). 울산광역시에는 총 13개의 대기오염 상시측정망이 있으며 5가지 기준오염물질(PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO)에 대해 각 측정소별로 시간별 농도값을 측정하고 있다.

2.2 대기오염 측정망 자료

본 연구에서는 울산광역시에 설치된 총 13개 대기오염 자동측정망에서 상시 측정된 미세먼지(PM_{10}), 아황산가스(SO_2), 이산화질소(NO_2), 오존(O_3), 일산화탄소(CO)의 5개 물질에 대해, 해당 연구기간 동안의 시간별 원자료를 국립환경과학원으로부터 얻어, 각 오염물질별로 일별 대푯값을 구하였다. 미세먼지(PM_{10}), 아황산가스(SO_2), 그리고 이산화질소(NO_2)의 경우 먼저 시간별로 측정지점 전체 평균값을 구하고 이들 24개의 시간별 평균값을 이용하여 일일평균값을 구하였다. 이는 각 측정지점에서 연속적으로 측정값이 빠지게 될 경우를 보정하기 위함이다. 또한, 오존(O_3)과 일산화탄소(CO)의 경우는 각 측정지

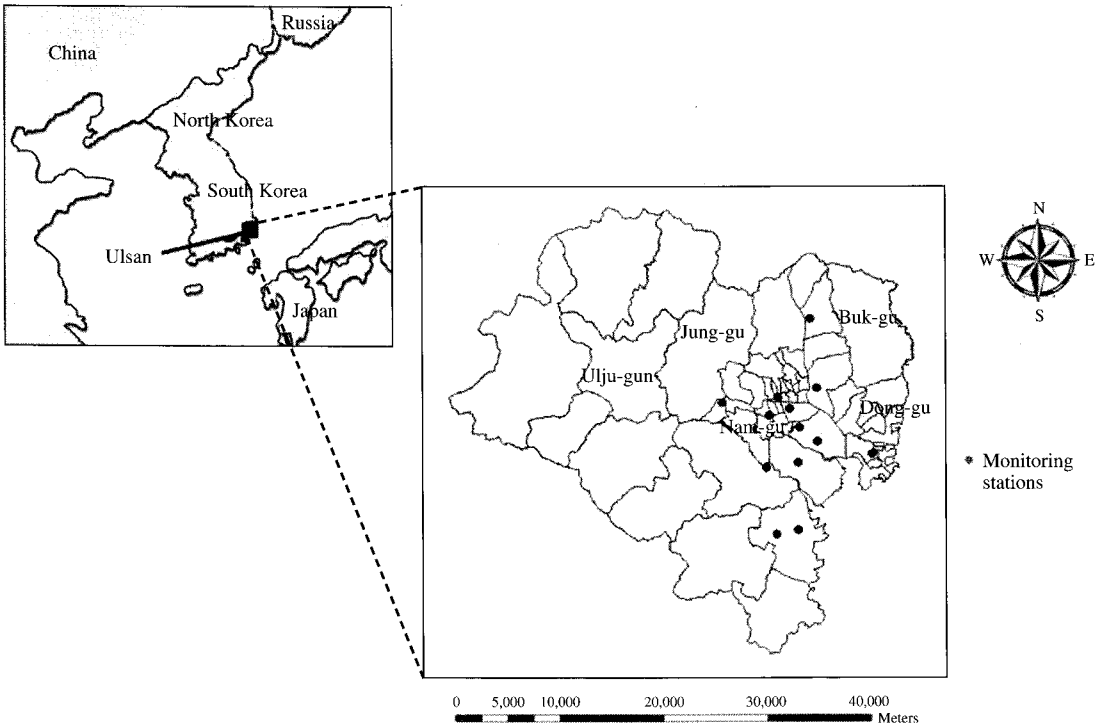


Fig. 1. Study area and location of monitoring stations.

점에서의 일일 8시간 이동평균값(17개/일)의 최대값을 이용하여 일일평균값을 구하였다. 이렇게 얻어진 각 오염물질별 일평균값을 이용하여 개인노출수준을 추정하였다.

2.3 공간내삽법

본 연구는 대기오염의 개인노출추정 기법을 소개하고 적용사례를 보여주기 위한 목적을 가지고 있다. 따라서 노출추정 방법으로는 가장 널리 이용되고 있는 3가지 공간내삽법을 적용하였다. 적용된 3가지 방법은 다음과 같다.

(1) Nearest monitor: 근거리 측정소법은 개인의 거주지 위치에서 가장 가까운 거리에 있는 측정망 하나의 값을 개인의 노출추정치로 할당하는 방법이다.

(2) Inverse distance weighting (IDW): 거리의 역수 가중치 설정법은 내삽하고자 하는 위치에서부터 각 측정지점까지의 거리의 역수를 가중치로 이용하는 방법으로, 예측하고자 하는 지점과 가까운 거리에 있는

측정소일수록 더 많은 가중치를 주는 방법이다. 결국 추정값은 예측하고자 하는 지점과 가까운 거리에 위치한 측정소의 자료값에 크게 영향을 받고 멀리 떨어져 있는 측정소의 자료값에는 상대적으로 영향을 덜 받게 된다. IDW의 경우, 비교적 간단한 계산에 의해 측정되지 않은 지점의 추정치가 결정되나 이 방법의 적용에 있어서 몇 개의 측정소 관측값을 사용해야 할지 또는 예측지점에서 얼마큼 떨어진 경우를 주변(search radius)으로 정의하는 것이 좋을지에 관한 명확한 기준이 제시되어 있지 않다. 본 연구에서는 IDW 기법을 이용한 추정치를 구함에 있어서 울산시 전체 측정소 자료를 모두 포함하도록 하였고 다음과 같은 가중치를 사용하였다(Kinney *et al.*, 1998; Kunzli *et al.*, 1997).

$$\lambda_i = 1/d_i$$

d_i 는 예측지점과 관측지점 쌍 간의 거리를 의미한다.

(3) Kriging: 크리깅 기법은 IDW 기법과 마찬가지로

Table 1. Summary statistics comparing the monitor values and the results of the three different interpolation methods for daily air pollutant concentrations in Ulsan, 2003~2007 (N=2102).

Air pollutant	Mean (SD)			
	Monitor values	Nearest monitor	IDW	Kriging
PM ₁₀ (µg/m ³)	48.704 (21.916)	44.153 (24.353)	45.999 (22.053)	48.337 (21.754)
O ₃ (ppb)	35.855 (10.483)	39.370 (12.139)	37.511 (10.447)	37.101 (10.397)
NO ₂ (ppb)	21.393 (8.032)	19.753 (11.113)	21.097 (9.273)	21.409 (8.294)
SO ₂ (ppb)	8.598 (4.129)	7.250 (5.917)	8.353 (5.258)	8.287 (4.410)
CO (ppm)	0.584 (0.236)	0.490 (0.326)	0.642 (0.301)	0.620 (0.256)

주변 측정값들을 이용하여 예측하고자 하는 지점의 값을 추정하는 방법이지만 가중치의 적용에 있어서 IDW 기법과 같이 단순히 거리에 관한 함수를 이용하기보다는 측정값들 간의 공간적 구조와 상호관련성 (spatial autocorrelation)에 근거하는 방법이다. 크리깅 기법의 첫 단계는 실제 측정값들을 거리의 상관성으로 나타내주는 경험적 베리오그램 (empirical variogram)을 적합시키는 것이다. 베리오그램 (variogram)이란 적당한 분리거리하에서 두 측정값 간의 비슷한 정도를 나타내는 것으로, 일정한 거리 h만큼 떨어진 두 측정값들 간의 차이를 제공한 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2M(h)} \sum_{i=1}^{M(h)} \{z(x_i) - z(x_i+h)\}^2$$

$\gamma(h)$ 는 분리거리하에서 추정된 semivariogram, $z(x_i)$ 와 $z(x_i+h)$ 는 일정한 거리 h만큼 떨어진 두 점 x_i 와 x_i+h 에서의 측정값, $M(h)$ 는 거리 h에 의해 나누어진 측정값들 쌍의 개수를 의미한다.

따라서 두 측정값들 간의 거리가 가까우면 그 값들이 비슷하므로 베리오그램은 일반적으로 작게 나타나고 거리가 멀어질수록 크게 나타난다. 경험적 베리오그램을 계산하여 거리와 베리오그램의 공간적 상관관계를 나타낸 후 다음 단계는 경험적 베리오그램이 나타내는 자료의 공간적 상관관계를 이상적으로 표현하는 이론적 베리오그램을 결정해야 한다. 이는 경험적 베리오그램을 이상적 형태의 함수에 적합시켜 수학적으로 취급하기 용이하도록 하기 위한 것으로 이론적 모형을 적합시키는 방법은 공간자료에 대한 경험적 차의 분산 삼점도를 가장 부드럽게 연결시켜 줄 수 있는 곡선을 찾아가면서 적합시킬 수 있다. 일반적으로 사용되는 이론적 모형으로는 구모

형 (spherical model), 가우스모형 (gaussian model), 지수모형 (exponential model)이 있으며 본 연구에서는 가장 널리 사용되는 형태인 구모형을 사용하였다. 크리깅의 형태에는 크게 단순크리깅 (simple kriging), 보통크리깅 (ordinary kriging), 보편크리깅 (universal kriging)이 있다. 단순크리깅은 모형의 평균을 알고 있다고 가정할 때 사용하며, 보통크리깅은 모형의 평균은 사전에 알 수 없고 추정 동안 결정되며 일정하다는 전제하에 예측하는 방법이다. 보편크리깅의 경우에는 평균의 경향성을 고려하는 방법으로 평균이 고정된 상수가 아니라는 가정하에서 공간을 예측한다. 본 연구에서는 보통 크리깅 기법을 사용하여 개인수준에서의 대기오염농도를 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 울산시 전체 13개 모니터링 사이트의 평균 값을 개인노출의 대표치로 사용한 경우 및 3가지 예측방법별로 구한 개인수준에서의 대기오염 추정치들의 기술통계량을 나타낸 표이다. 전체 모니터링 사이트의 평균값과 예측치 간에는 오염물질에 따라 다른 특성을 보이는 것으로 나타났다. PM₁₀의 경우 모니터링 평균값과 크리깅 기법에 의한 추정치 평균 간에는 차이가 없는 것으로 나타났다. 예측방법별로도 추정치들 간에 대기오염물질별로 다른 경향을 보였다. PM₁₀과 CO의 경우에는 3가지 예측방법별 평균 간에 통계적으로 유의하게 차이가 있는 것으로 나타났다. PM₁₀과 CO 모두 크리깅 기법에 의해 추정된 평균이 가장 높은 것으로 나타났다. 추정된 O₃의 평균은 각각 39.37 ppb (nearest monitor), 37.51 ppb (IDW), 37.10 ppb (kriging)로 nearest monitor 기법에 의해 추

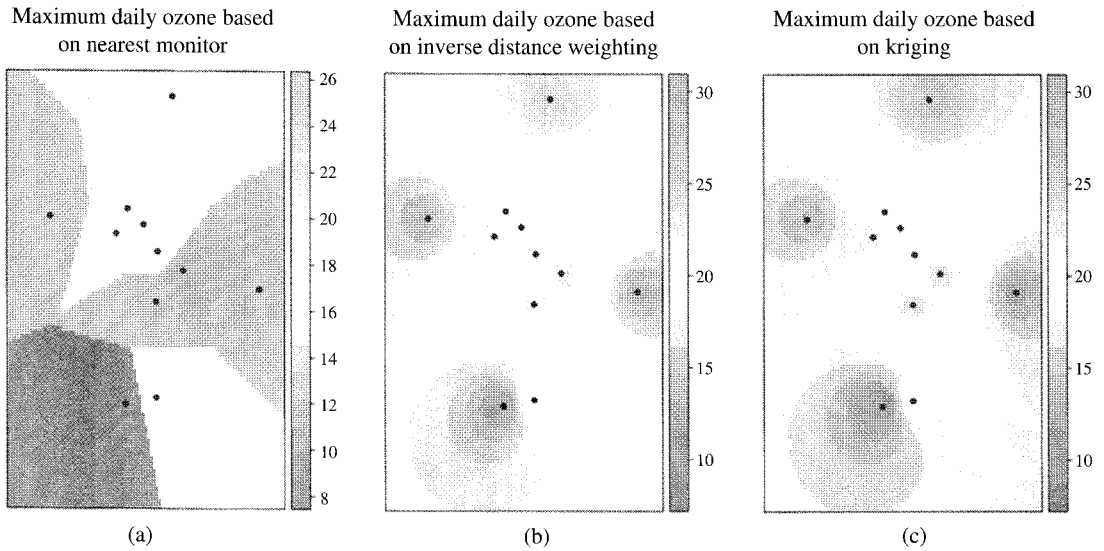


Fig. 2. Estimated daily ozone concentration by three prediction methods (a) nearest monitor (b) IDW (c) kriging (blue circle, monitor location).

정된 평균이 다른 두 평균에 비해 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다(Duncan test, $p < 0.05$). IDW 및 크리깅 기법에 의해 추정된 두 평균 간에는 차이가 없는 것으로 나타났다. NO_2 와 SO_2 의 경우에는 IDW 및 크리깅 기법에 의해 추정된 평균 간에는 서로 차이가 없는 것으로 나타났고, 두 평균은 nearest monitor 기법에 의해 추정된 평균보다 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다.

그림 2는 3가지 예측방법별로 추정된 O_3 의 예측 표면의 예를 보여주는 그림이다. IDW 기법에 의한 예측표면과 크리깅 기법에 의한 예측표면 간에는 큰 차이가 없으나 일부 구간에 있어서 nearest monitor 기법에 의한 예측표면과는 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 전체 모니터링 평균값과 3가지 예측방법별로 추정된 추정치들 간의 결과를 비교하기 위해 피어슨 상관계수를 구하였다. 그림 3은 전체 모니터링 평균값 및 예측방법 쌍 간의 PM_{10} 추정치의 산점도 및 피어슨 상관계수를 나타낸 그림이다. PM_{10} 의 전체 모니터링 사이트 평균값은 크리깅 기법에 의한 예측치와 가장 높은 상관계수를 보이는 것으로 나타났다($r=0.98$). 예측방법 간의 상관계수는 0.89에서 0.96까지로 나타나 대체로 높은 편인 것으로 나타났

다. NO_2 와 O_3 의 경우에도 비교적 높은 상관계수를 나타내었다(from 0.84 to 0.96). 가장 낮은 상관관계는 nearest monitor 기법에 의한 CO 추정치와 크리깅 기법에 의한 CO 추정치 비교 간에 관찰되었다($r=0.71$). SO_2 의 경우에는 nearest monitor 기법에 의한 추정치와 크리깅 기법에 의한 추정치 쌍($r=0.73$)을 제외하고 상관계수가 0.85를 넘는 것으로 나타났다.

본 연구는 최근 대기오염 역학연구에서 관심이 되고 있는 대기오염 노출평가의 개인노출추정 기법을 소개하고, 현재 널리 사용되고 있는 3가지 추정 기법(nearest monitor, inverse distance weighting, kriging)에 대해 국내자료에 시범적으로 적용해 보고자 하였다. 본 연구자료를 이용하여 공간내삽법을 적용한 결과, 3가지 추정방법별로 구한 대기오염 개인노출추정치 간에는 대체로 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

대기오염으로 인한 노출을 정확히 사정하는 것은 대기오염 역학연구에서 매우 중요한 부분이며, 기존의 많은 역학연구들에서는 주로 개인노출의 surrogate로 대기오염 측정망 자료를 사용해왔다(Ren *et al.*, 2006; Pope *et al.*, 2002; Dockery *et al.*, 1993). 대기오염 측정망 자료의 사용은, 기존에 있는 자료(existing data)를 사용한다는 장점과 넓은 범위의 공간과 시간

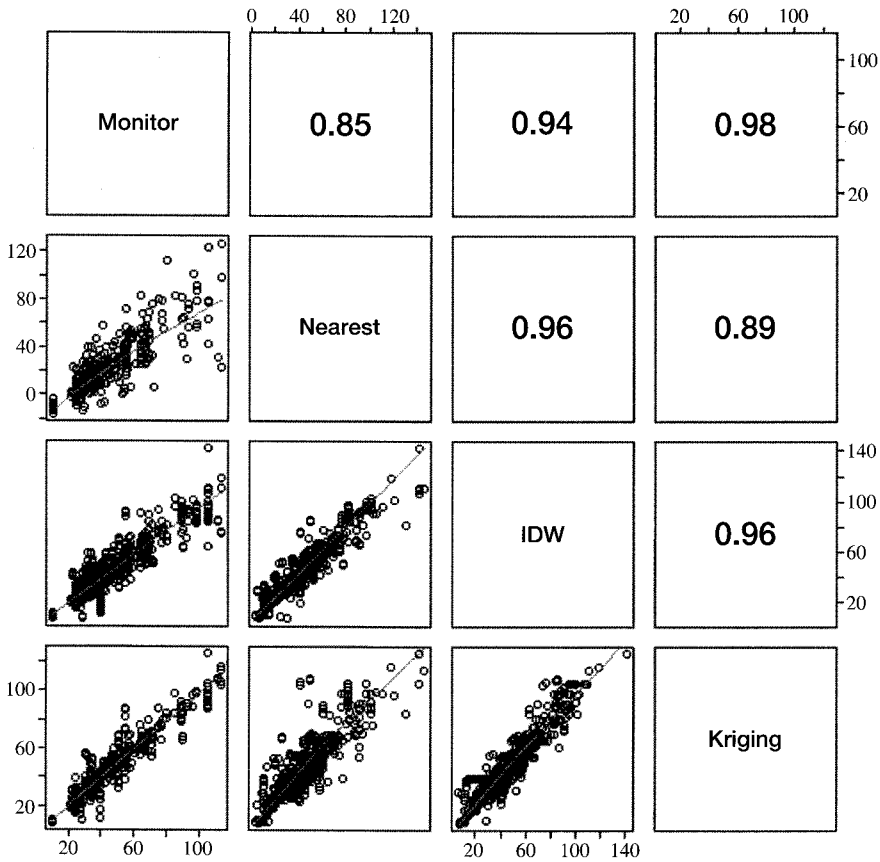


Fig. 3. Pairwise scatter plots and pearson correlation coefficients for estimated daily PM₁₀ concentration.

을 커버할 수 있다는 이점이 있지만(Bell, 2006), 이러한 자료를 사용하는 것의 문제점은 노출에 있어서의 분류오류(misclassification)를 야기시켜 대기오염과 건강영향 간의 연관성의 강도를 약화시킬 수 있는 가능성이 있다는 점이다. 따라서 최근에는 예측된 개인노출을 이용하여 대기오염으로 인한 건강영향을 평가하는 연구들이 늘어나고 있으며(Jerrett *et al.*, 2005; Kunzli *et al.*, 2005; Wong *et al.*, 2004) 예측된 개인노출을 사용한 경우 건강효과 추정에 있어서도 추정효과가 2~3배 증가한다고 보고하였다(Pouliou *et al.*, 2008; Jerrett *et al.*, 2005). 또 다른 연구들에서는 한 도시 내에서도 대기오염 수준의 변이를 고려하는 것이 중요함을 보고하였다(Miller *et al.*, 2007; Lebret *et al.*, 2000).

그러나 이러한 공간분석 기법을 사용함에 있어서

몇 가지 주의해야 할 점이 있다. 첫째는 우리가 이용 가능한 측정망의 위치(location)와 조밀도(density)의 문제이다. 일반적으로 대기오염 측정망은 고농도가 우려되는 지역에 위치해 있고 따라서 도시에 밀집해 있는 경우가 많다. 농촌(rural) 지역은 상대적으로 적은 수의 측정망이 위치해 있게 되어 측정망의 분포는 고농도 지역 쪽으로 편향이 있게 된다. 따라서 이러한 측정망 자료에 기반한 농촌(rural) 지역의 추정치는 overestimation 될 수 있는 가능성이 있다. 또한 측정망이 조밀하지 못할 경우 측정망으로부터 매우 멀리 떨어진 거리에 있는 지역의 추정치는 불확실성을 갖게 된다. 따라서 정확한 추정치를 구하기 위해서는 측정망이 좀 더 고르게 분포될 필요가 있다. 또한 배출원 등 대기오염물질별 특성에 따라 공간적 이질성이 다양하기 때문에 대기오염물질별로 공간적

의존성이 다를 수 있다. 따라서 각 오염물질별로 적절한 방법의 적용이 필요하다. 마지막으로 모형의 타당성 문제를 들 수 있다. IDW 기법의 경우 추정치를 구하는 데 있어서 search radius를 선정하는 문제가 중요하지만 이에 대해 이상적인 값을 구하는 기준이 없기 때문에 다소 객관성이 결여되는 측면이 있다. 그러나 Wong *et al.* (2004)의 연구결과에 따르면 어떤 search radius를 선정하는가가 연구결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고했다. 크리깅 기법의 경우에는 적용되는 베리오그램의 형태에 따라 결과에 영향을 미칠 수 있다.

이러한 제한점에도 불구하고 공간분석 기법은 대기오염물질의 공간적 특성을 반영하고 측정되지 않은 지점의 추정치 제공을 통해 개인수준에서의 공간적 변이를 반영함으로써 측정망 자료만을 사용하는 것보다 더 좋은 추정치를 제공할 수 있다. 그러나 본 연구결과만으로는 어떤 추정방법을 사용하는 것이 더 나은지에 관해서는 판단하기 어려우며 오염물질별 특성 등에 따라 각기 다른 방법이 적용되어야 할 것으로 생각된다. 따라서 이에 대한 후속 연구가 이루어져야 할 필요가 있다. 또한 공간분석 기법을 이용한 개인노출추정 역시 ambient 수준에서의 농도를 이용하여 개인노출 수준을 추정하는 것이기 때문에 여전히 앞서 지적한 노출에서의 분류오류 문제는 남아 있다. 또 개인노출에 있어서 매우 중요한 개인의 daily activity pattern을 반영하여야만 분류오류를 최소화할 수 있을 것이다. 따라서 보다 정확한 노출평가를 위해서는 개인노출수준 모니터링과 같은 다른 방안들이 보완되어야 할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 최근 대기오염 노출평가에서 현재 활발히 수행되고 있는 공간분석 기법들을 소개하고, 현재 널리 사용되고 있는 3가지 추정 기법(nearest monitor, inverse distance weighting, kriging)에 대해 국내 자료에 시범적으로 적용해 보고자 하였다. 2003년부터 2007년까지 울산시 주민 코호트 참여자 2,102명의 거주지 정보를 이용하여 공간내삽법을 적용한 결과, 3가지 추정방법별로 구한 대기오염 개인노출추정치 간에는 대체로 비슷한 경향을 보이는 것으로 나

타났다. CO와 SO₂에 대해 nearest monitor 기법에 의한 추정치와 크리깅 기법에 의한 추정치 쌍을 제외하고, 예측방법 쌍 간의 상관계수가 대체적으로 높은 편으로 나타났다($r=0.84$ to 0.96).

또한 공간분석 기법은 측정망의 위치 및 조밀도 문제, 모형의 타당성 문제 등의 제한점이 있음에도 불구하고 대기오염물질의 공간적 특성 및 개인수준에서의 공간적 변이를 반영함으로써 측정망 자료만을 사용하는 것보다 더 좋은 추정치를 제공할 수 있다. 그러나 여전히 노출에서의 분류오류 문제는 남아 있으며, 분류오류를 최소화하고 보다 정확한 노출평가를 위해서는 개인의 daily activity pattern 등을 반영하는 등 개인노출수준 모니터링과 같은 방안들이 보완되어야 할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(KRF-2008-621-D00022), 또한 환경부 국립환경과학원 “환경보건조사연구사업”으로 지원받은 과제의 자료를 사용하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이종태, 조용성, 손지영, 이정원, 이승준, 정영희, 김대선, 유승도, 안승철 (2008) 지역주민 환경오염 노출수준 및 생체지표 모니터링 방법에 대한 연구, 한국환경보건학회지, 34(3), 188-198.
- Bell, M.L. (2006) The use of ambient air quality modeling to estimate individual and population exposure for human health research: A case study of ozone in the Northern Georgia Region of the United States, *Environment International*, 32, 586-593.
- Dockery, D.W., C.A. Pope, X. Xu, J.D. Spengler, J.H. Ware, M.E. Fay, B.G. Jr Ferris, and F.E. Speizer (1993) An association between air pollution and mortality in six US cities, *New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759.
- Henderson, S.B., B. Beckerman, M. Jerrett, and M. Brauer (2007) Application of land use regression to estimate long-term concentrations of traffic-related

- nitrogen oxides and fine particulate matter, *Environmental Science & Technology*, 41(7), 2422-2428.
- Jerrett, M., R.T. Burnett, R. Ma, C.A. Pope, D. Krewski, K.B. Newbold, G. Thurston, Y. Shi, N. Finkelstein, E.E. Calle, and M.J. Thun (2005) Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles, *Epidemiology*, 16(6), 727-736.
- Kim, S.Y., L. Sheppard, and H. Kim (2009) Health effects of long-term air pollution, Influence of exposure prediction methods, *Epidemiology*, 20(3), 442-450.
- Kinney, P.L., M. Aggarwal, S.V. Nikiforov, and A. Nadas (1998) Methods development for epidemiologic investigations of the health effects of prolonged ozone exposure. Part III: an approach to retrospective estimation of lifetime ozone exposure using a questionnaire and ambient monitoring data (U.S. sites), *Health Effects Inst. Res. Rep.*, 81, 79-107.
- Kunzli, N., F. Lurman, M. Segal, L. Ngo, J. Balmes, and I. Tager (1997) Association between lifetime ambient ozone exposure and pulmonary function in college freshman-results of a pilot study, *Environmental Research*, 72, 8-23.
- Kunzli, N., M. Jerrett, W.J. Mack, B. Beckerman, L. LaBree, F. Gilliland, D. Thomas, J. Peters, and H.N. Hodis (2005) Ambient air pollution and atherosclerosis in Los Angeles, *Environmental Health Perspectives*, 113, 201-206.
- Lebret, E., D. Briggs, H. Reeuwijk, P. Fishcher, K. Smallbone, H. Harssema, B. Kriz, P. Gorynski, and P. Elliott (2000) Small variations in ambient NO₂ concentrations in four European area, *Atmos. Environ.*, 34, 177-185.
- Liao, D., D.J. Pequet, Y. Duan, E.A. Whitsel, J. Dou, R.L. Smith, H.M. Lin, J.C. Chen, and G. Heiss (2006) GIS approaches for the estimation of residential-level ambient PM concentrations, *Environmental Health Perspectives*, 114(9), 1374-1380.
- Miller, K.A., D.S. Siscovick, L. Sheppard, K. Shepherd, J.H. Sullivan, G.L. Anderson, and J.D. Kaufman (2007) Long term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women, *New England Journal of Medicine*, 356, 447-458.
- Pope, C.A. III, R.T. Burnett, M.J. Thun, E.E. Calle, D. Krewski, K. Ito, and G.D. Thurston (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *Journal of the American Medical Association*, 287, 1132-1141.
- Pouliou, T., P.S. Kanaroglou, S.J. Elliott, and L.D. Pengelly (2008) Assessing the health impacts of air pollution: a re-analysis of the Hamilton children's cohort data using a spatial analytic approach, *International Journal of Environmental Health Research*, 18(1), 17-35.
- Ren, C., G.M. Williams, and S. Tong (2006) Does particulate matter modify the association between temperature and cardiorespiratory disease?, *Environmental Health Perspectives*, 114, 1690-1696.
- Wong, D.W., L. Yuan, and S.A. Perlin (2004) Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of air quality data, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 14, 404-415.
- Zou, B., J.G. Wilson, F.B. Zhan, and Y. Zeng (2009) Air pollution exposure assessment methods utilized in epidemiological studies, *Journal of Environmental Monitoring*, 11(3), 475-490.