한국대기환경학회지 제 28 권 제 5 호
J. KOSAE Vol. 28, No. 5 (2012) pp. 571～580
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.5.571

Land Use Regression 모델을 이용한 수도권 초등학교 대기오염 노출 분석

Land Use Regression Model for Assessing Exposure and Impacts of Air Pollutants in School Children

이지영[1),2)] · 임종한[1),3),*] · 김환철[1),3)] · 황승식[1)] · 정달영[1),2)] · 박명숙[1)]
김정애[1)] · 이재준[4)] · 박노욱[5)] · 강성찬[1)]
[1)]인하대학교 의과대학 사회의학교실, [2)]인하대학교 의과대학 의과학연구소,
[3)]인하대학교병원 직업환경의학과, [4)]인하대학교 통계학과, [5)]인하대학교 지리정보공학과
(2012년 6월 19일 접수, 2012년 7월 11일 수정, 2012년 9월 24일 채택)

Ji-Young Lee[1),2)], Jong-Han Leem[1),3),*], Hwan-Cheol Kim[1),3)], Seung-Sik Hwang[1)],
Dal-Young Jung[1),2)], Myung-Sook Park[1)], Jung-Ae Kim[1)], Je-Joon Lee[4)],
No-Wook Park[5)] and Sung-Chan Kang[1)]
[1)]*Department of Social and Preventive Medicine, Inha University Medical College*
[2)]*Inha Research Institute for Medical Sciences, Inha University School of Medicine*
[3)]*Department of Occupational and Environmental Medicine, Inha University Medical College*
[4)]*Department of Statistics, Inha University,*
[5)]*Department of Geoinformatic Engineering, Inha University*
(Received 19 June 2012, revised 11 July 2012, accepted 24 September 2012)

Abstract

Epidemiologic studies of air pollution need accurate exposure assessments at unmonitored locations. A land use regression (LUR) model has been used successfully for predicting traffic-related pollutants, although its application has been limited to Europe, North America, and a few Asian region. Therefore, we modeled traffic-related pollutants by LUR then examined whether LUR models could be constructed using a regulatory monitoring network in Metropolitan area in Korea. We used the annual-mean nitrogen dioxide (NO_2) in 2010 in the study area. Geographic variables that are considered to predict traffic-related pollutants were classified into four groups: road type, traffic intensity, land use, and elevation. Using geographical variables, we then constructed a model to predict the monitored levels of NO_2. The mean concentration of NO_2 was 30.71 ppb (standard deviation of 5.95) respectively. The final regression model for the NO_2 concentration included five independent variables. The LUR models resulted in R^2 of 0.59. The mean concentration of NO_2 of elementary schools was 34.04 ppb (standard deviation of 5.22) respectively. The present study showed that even if we used regulatory monitoring air quality data, we could estimate NO_2 moderately well. These analyses confirm the validity of land use regression modeling to assign exposures in epi-

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-890-3539, E-mail : ekeeper@inha.ac.kr

demiological studies, and these models may be useful tools for assessing health effects of long-term exposure to traffic related pollution.

Key words : Land use regression, Traffic related air pollution, NO_2, Exposure, GIS, School

1. 서 론

교통 관련 대기오염물질인 이산화질소(NO_2)는 대도시에서 주요하게 발생하는 대기오염물질이며 알레르기 질환 등 건강에 위험을 주는 요인으로 작용하고 있다. 20세기 후반부터 전세계적으로 천식 유병률과 발생률이 급격하게 증가해오고 있으며, 특히 대기오염에 민감한 어린이들에게 증가 경향이 나타나고 있다. 우리나라 경우, 국민건강보험공단에서 발표한 자료에 의하면 천식 질환으로 진료를 받은 사람은 2002년 203만명에서 2007년 239만명으로 17.7% 증가하였다. 특히 총 천식 진료 환자 중 0～19세가 49.7%를 차지하여 어린이 및 청소년에 대한 건강 위험이 높은 것으로 나타났다.

대기오염으로 인한 환경성 질환을 줄이기 위해서는 영유아, 어린이, 노인 등 취약집단에 대한 사전 예방과 관리가 필요하며, 이를 위해 대기오염 노출에 대한 정확한 분석이 이루어져야 한다. 국내에서 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS) 등을 이용한 노출 분석과, 도로 교통으로 인해 유발되는 건강문제에 대한 연구는 많지 않다. 해외에서는 출생 전후 질병의 민감성 증가와 교통으로 인한 대기오염의 관련성을 GIS를 이용한 소지역 추정기법, Land Use Regression (LUR) 등 다양한 방법들을 이용하여 연구하고 있다(Johnson *et al*., 2010; Henderson *et al*., 2007; Gilbert *et al*., 2005; Brauer *et al*., 2002).

LUR은 GIS를 통해 얻은 토지이용, 교통량, 지형 등의 변수와 표본 측정하여 얻은 실측자료를 이용하여 회귀계수를 구하고, 연구대상 개별 대기오염 노출수준을 추정하는 모델기법이다. LUR에서 활용되는 주요한 네 가지 변수는 도로형태, 교통량, 고도, 토지이용 등이며 대기오염의 변화를 예측하고 이를 시각적으로 표현하는 방법으로써, 미국과 유럽에서는 대기오염으로 인한 건강영향을 다루는 역학연구에서 많이 이용되고 있다(Smargiassi *et al*., 2012; Mukerjee *et al*., 2009; Brauer *et al*., 2008).

그러나 국내에서는 취약계층의 건강 영향을 분석하기 위한 GIS 등을 이용한 대기오염에 대한 다양한 연구가 부족하며, 특히 LUR을 이용한 모델링 분석에 대한 연구는 초기 단계에 있다. 본 연구에서는 수도권의 초등학생들의 건강영향을 예측하기 위하여 국내에서는 처음으로 교통, 도로 및 토지 관련 자료들을 이용한 LUR 모델링을 구축하여 대기오염의 영향을 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 환경 노출을 평가하기 위해 수도권 지역의 대기오염 모니터링 자료와 지리정보 자료를 이용하여 Land use regression 모델링을 구축하고, 수도권의 초등학교별 대기오염 노출값을 추정하였다. 지리정보 분석은 ArcGIS (Arc Map 9.3, ESRI inc, CA, USA)의 analysis tool, geostatistical analysis, spatial statistical analysis를 이용하였다. LUR 모델링은 통계분석은 Stata (Version 10.0, StataCorp, Texas, USA)를 이용하여 선형회귀분석을 하였다.

2.1 대기오염 자료 분석

이산화질소(NO_2)에 대한 대기오염 자료는 환경부에서 제공하는 대기오염 측정망 자료(2010년)의 연평균 농도를 이용하였다. 대기오염 측정망에서 측정된 농도의 지리적 분석을 위해 TM (Transverse Mercator) 좌표를 이용하여 측정소의 위치를 지도화하였다. 연구대상인 수도권의 대기오염 측정 지역은 서울지역은 25개소, 경기도 지역 63개소, 인천지역 14개소로 총 102개소였다. 대기오염 모니터링 지역의 2010년 NO_2의 평균값은 30.7 ppb로 나타났다.

2.2 지리정보 및 교통관련 자료 분석

LUR 모델링을 위한 지리정보 자료는 다음과 같다. 기본도 (Base map)는 국가교통DB센터의 1 : 25,000

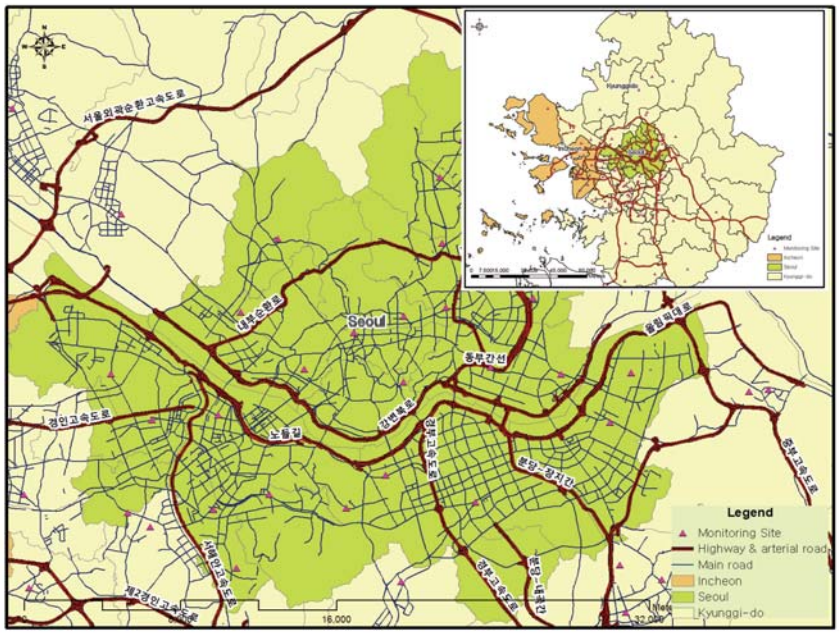

Fig. 1. Map of the Metropolitan area showing monitoring site locations and road network.

Table 1. Description of spatial variable categories.

Category	Description	Variable sub-categories	Buffer radii (m)	Input file source & type	Methods
Road length	Total length (in km)	Main roads	100, 200, 300, 500, 750	Korea transport database	Use 'intersect' function of analysis tools*
Distance to road	Distance to nearest road	- Main roads - Highways		Korea transport database	Use 'near' function of analysis tools*
Land use	Total area (in hectares) of 5 land use types	- Residential - Commercial - Industrial - Green area - Open space	300, 500, 750, 1000	Ministry of Environment	Use 'intersect' function of analysis tools*
Elevation	Elevation			Korea transport database	Use 'spatial join' function of analysis tools*

*ArcGIS (Arc Map 9.3, ESRI inc, CA, USA)

축적의 행정경계지도를 이용하였고, ArcGIS (Arc Map 9.3, ESRI inc, CA, USA)의 분석 도구를 이용하여 TM 좌표로 좌표체계를 전환하여 중첩하였다. 환경노출 모델링을 위해 해당 지역인 수도권 지역을 추출하여 대기오염 측정망지역의 농도 자료와 중첩하였다.

교통관련 자료는 국가교통DB센터의 전국도로망 지도(1 : 25,000 축적)를 이용하였다. 교통관련 대기오염 자료를 분석하기 위해 수도권 지역, 대기오염 측정망 지역 및 도로 지도를 중첩하였다(그림 1). 고속도로 및 간선도로와의 거리, 주요도로와의 거리 및 도로길이 등을 추출하기 위해 GIS 분석도구를 이용하여 고속도로 및 간선도로, 2차선, 4차선, 6차선, 8차선 이상 도로를 추출하였다(표 1). 측정망 지역의 반경 100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m 이내의 도로, 주요

도로(4차로 이상), 고속도로의 총길이를 산출하였다. 우선, GIS의 Analysis tools의 “Proximity” 중 “Buffer” 기능을 이용하여 측정지점에서 100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m 별로 buffer를 설정하였다. 그 다음 Overlay 의 하위기능인 “Intersect” 기능을 사용하여 각 buffer와 중첩되는 도로의 총길이를 산출하였다. 주요도로와의 인접도는 측정망 지점에서 도로와의 인접도를 산출하기 위해 ArcGIS의 Analysis tools 중 “Proximity”의 “Near” 기능을 사용하였다.

2. 3 Land Use 관련 자료 분석

전국 고도(1 : 25,000 축적) 분포는 국가교통DB센터의 자료를 이용하였다. 각 지점의 고도를 산출하기 위하여 spatial analysis를 이용하였다. 토지이용자료는 환경부의 토지피복분류도(1 : 25,000 축적)를 이용하였다. 토지분류는 중분류 23항목을 이용하여 코딩화하였다. 토지분류도는 크게 시가화/건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역 등으로 나뉜다. 시가화/건조지역은 주거지역, 공업지역, 상업지역, 위락시설지역, 교통지역, 공공시설지역으로 나뉜다. 토지이용자료는 크게 두가지로 나누어 분석하였다. 먼저, 토지분류도를 대기오염 모니터링 지역과 중첩하여 연구 대상 변수의 토지 이용 특성 자료를 구축하였다. 측정망 지점 반경 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m 이내의 주거지역, 공업지역, 상업지역, 교통지역, 농업지역, 초지지역, 나지 등의 총면적을 산출하였다. 우선, Analysis tools, “Proximity” 중 “Buffer” 기능을 이용하여 측정지점에서 300 m, 500 m, 750 m, 1000 m 별로 buffer를 설정하였다. 그 다음 Overlay 의 하위기능인 “Intersect” 기능을 사용하여 각 buffer와 토지피복도를 중첩하여 각 버퍼내 각 토지피복분류에 따른 총면적을 산출하였다.

2. 4 Land Use Regression 모델링

지리 정보, 교통관련 자료, 토지 이용 자료 등을 이용하여 NO_2 노출 예측을 위한 모델링을 구축하였다. LUR 모델링은 다음의 분석과정을 통해 분석되었다.

먼저, 대기오염 측정망의 대기오염 농도값과 관련성이 높은 변수들의 순위를 정하고 상관분석을 시행하여 관련이 없는 변수들을 제거하였다. 남은 변수들을 이용하여 stepwise 선형분석을 시행하였다. 관련성의 방향이 반대이거나, 중요도가 낮은 변수들을 재정리하고, stepwise 선형분석을 다시 시행하였다. 마지막 방법을 재실행하여 R^2 값에 많은 영향을 주지 않는 변수들을 제외하였다.

분석 결과의 유효성 및 타당성을 확보하기 위해 LUR 모형 적합 후 모형 적합성을 진단하기 위해 전체 데이터에서 얻은 모형의 잔차제곱 평균값 및 Olvera *et al*. (2012)과 Hederson *et al*. (2007) 등이 사용한 Leave-One-Out Cross Validation (LOOCV) 방법을 사용하였다. Leave-One-Out 방법은 n개의 실측치에서 1개를 제외한 후 n−1개를 사용하여 적합한 모형에서 얻은 예측값과 제외된 1개의 실측값의 차이인 잔차를 구하는 방법이다.

LUR 모형에 대한 공간상관성 분석을 위해 ArcGIS를 이용하여 Moran’s I 분석을 수행하였다. Moran’s I 공간자기상관 계수(Moran’s I statistic of spatial autocorrelation)는 공간자기상관을 파악하기 위한 유용한 측정척도로, 인접해 있는 공간단위들이 갖는 값을 비교하여 이 계수를 산출하게 된다.

2. 5 초등학교 지역의 NO_2 농도

국내 초등학교 어린이들의 건강에 미치는 영향을 분석하기 위해 LUR을 이용하여 초등학교의 이산화질소 농도를 산출하였다. 초등학교의 노출값 추정을 위해 경기도, 서울시, 인천시 각 지자체의 교육청 자료를 이용하여 주소를 추출하였다. 경기도, 서울시, 인천시 초등학교는 각각 1,180, 591, 243개로 총 개수는 2,014개였다.

초등학교 주소를 경위도 좌표로 전환한 후 TM 좌표를 생성하여 지리정보자료와 중첩하였다. GIS 분석을 통해 LUR 모델링에서 사용한 변수들을 추출하였다. 초등학교의 교통관련 자료와 고도는 국가교통DB센터의 전국도로망 지도(1 : 25,000 축적)를 이용하였고, 토지특성은 환경부의 자료를 이용하였다. 생성된 변수들을 기구축된 LUR 모델링의 회귀방정식의 기울기와 계수를 이용하여, 수도권 지역 각 초등학교의 이산화질소 농도를 산출하였다.

3. 결 과

3. 1 교통관련 대기오염 변수

LUR의 분석에 사용된 대기오염 농도는 환경부의

Table 2. NO_2 concentrations on regular air monitoring site.

NO_2	N	mean	sd	min	p25	p50	p75	max	iqr*
All	102	30.71	5.95	11.00	27.00	32.00	35.00	42.00	8.00
Seoul	25	33.52	3.66	27.00	31.00	34.00	36.00	42.00	5.00
Kyunggi	63	29.81	6.03	15.00	26.00	31.00	34.00	42.00	8.00
Incheon	14	29.71	7.54	11.00	29.00	32.50	35.00	37.00	6.00

*interquartile range

Table 3. Distribution of explanatory variables considered for LUR.

	N	Unit	mean	sd	min	p25	p50	p75	max	iqr*
Road length within 500 m	102	km	1.08	0.66	0.00	0.56	1.14	1.51	2.70	0.95
Distance to nearest main road	102	km	1.87	2.99	0.01	0.30	0.60	1.63	10.00	1.33
Distance to nearest highway	102	km	2.38	2.42	0.04	0.79	1.54	2.89	10.00	2.09
Elevation	102	m	48.27	54.63	1.80	15.00	32.45	58.00	423.10	43.00
Green area within 500 m	102	ha	2.67	39.88	0.00	0.17	12.12	36.76	209.11	36.58

*intequartile range

대기환경연보의 대기오염측정소의 대기오염 자료를 이용하였다. 대기오염 측정망에 의한 수도권 지역 2010년 NO_2의 평균농도는 30.71 ppb였다. 서울지역은 33.52 ppb로 국내 환경기준치인 30 ppb보다 높았다. 경기지역은 29.81 ppb이고, 인천지역(29.71 ppb로 환경기준치에 접근해 있었다(표 2). 인천지역의 경우, 섬 지역을 제외할 경우 평균 농도가 31.15 ppb로 경기지역보다 높았다.

교통관련 대기오염의 주요 원인이 될 수 있는 도로자료는 대기오염 모니터링 지역과 고속도로, 간선도로, 주요도로와의 거리, 모니터링 지역 버퍼내 주요도로의 길이를 이용하였다. 고속도로 및 간선도로, 그리고 2차선, 4차선, 6차선, 8차선 이상 도로 등을 추출하여, 지리정보시스템의 분석도구를 이용하여 거주지 주변의 주요 도로의 길이와 거주지로부터 주요도로까지의 거리 등을 산출하였다. 대기오염 측정망의 농도 자료와 함께 주요도로와 거리, 고속도로와의 거리 도로의 총길이, 토지이용, 지형, 인구밀도, 고도 등을 종합적으로 고려한 LUR (land use regression) 모형을 검토하였다.

LUR 모델링을 위하여 대기오염 농도값과 관련성이 높은 변수들의 순위를 정하고 상관분석을 시행하여 관련이 없는 주거지역과 공업지역의 면적 변수들을 제거하였다. 남은 변수들을 이용하여 stepwise 선형분석을 시행한 결과 상업지역과 나지지역의 면적의 변수들이 제거되었다. 관련성의 방향이 반대이거나, 중요도가 낮은 변수들을 재정리하고, stepwise 선형분석을 다시 시행하여 R^2 값에 많은 영향을 주지 않는 변수들을 제외하였다.

모델 구축 과정을 통해 최종적으로 선택된 유의한 변수는 다음과 같다. 교통 관련 변수는 연구대상으로부터 500 m내 도로길이, 주요도로와의 거리, 고속 및 간선도로와의 거리로, 토지 관련 변수는 연구대상으로부터 500 m내 초지의 면적과 고도로 결정하였다(표 3).

연구대상으로부터 500 m내 도로길이의 평균값은 1.08 km였고, 주요도로와 떨어진 거리는 1.87 km였고, 고속도로 및 간선도로와의 평균 거리는 2.98 km였다. 경기도 지역의 경우 고속도로 및 간선도로와의 거리가 떨어져있기 때문에 전체적으로 값이 높게 산출되었다.

토지피복도는 총 23개의 범주로 세분류되어 있는데 이 중 연구대상으로부터 500 m 버퍼에 있는 초지지역의 면적을 이용하였다. 토지피복도, 고도 등은 ArcGIS의 spatial analysis 도구를 이용하여 연구대상과 중첩하여 분석하였다. 이 중 LUR 모델링에 유의한 변수는 초지지역과 고도였고, 초지지역의 평균 면적은 2.67 ha, 고도의 경우 48.27 m였다.

3. 2 LUR 모델링 결과

대기오염 모니터링으로부터 버퍼 500 m 안의 도로의 길이, 고속도로 및 간선도로와의 거리, 주요도로와

Table 4. Results of land use regression models for NO_2.

NO_2	Coef.	Std. Err.	t	P-value	VIF	R^2
Constant	32.406	1.061	30.55	<0.001	1.80	
Road length within 500 m	0.150	0.067	2.25	0.027	1.28	
Distance to nearest main road	−0.103	0.023	−4.39	<0.001	2.93	0.59
Distance to nearest highway	−0.049	0.025	−1.98	0.024	2.27	
Elevation	0.023	0.009	2.65	0.009	1.43	
Green area within 500 m	−0.042	0.010	−4.04	<0.001	1.11	

*Adjusted R^2=0.56

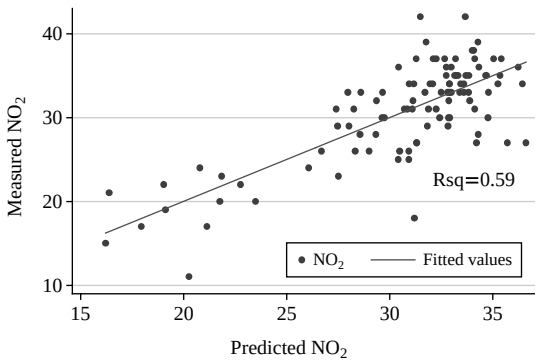

Fig. 2. Measured vs. predicted NO_2.

의 거리, 고도, 인구밀도, 초지와 나지 그리고 교통지역의 면적을 이용하여 LUR 모델링을 구축하였다. 대기오염 및 토지이용 관련 변수들은 NO_2에 대해 59% (adjusted 56%)의 설명력을 갖는 것으로 분석되었다 (표 4, 그림 2). 특히 도로길이와 고속도로 및 간선도로와의 거리, 주요도로와의 거리, 고도 및 초지 면적은 상관성이 높은 것으로 나타났다. 고속도로 및 도로와의 거리는 음의 방향으로 상관성이 높은 것으로 나타났는데, 이는 거리가 가까울수록 대기오염의 노출이 높다는 것을 의미한다. 초지 지역의 면적은 음의 방향으로 나타났는데, 이는 초지 지역이 많을수록 대기오염의 노출이 줄어든다는 것을 의미한다. VIF (Variation Inflation Factor)의 수식의 값은 모두 10 이하이므로 다중공선성은 문제가 되지 않는 것으로 나타났다.

분석 결과의 유효성 및 타당성을 확보하기 위해 모형 적합성을 진단하기 위해 전체 데이터에서 얻은 모형의 잔차제곱 평균값 및 LOOCV 방법을 사용하였다. 잔차의 정규성 검토 결과 정규성 가정을 위반하지 않았고, 관측치와 잔차의 산점도에서도 특정한 경향을 보이지 않아 현재의 모형이 기본 가정을 만족하고 있다고 할 수 있다. 전체 오차의 평균은 −0.61 이었으며 평균제곱근 오차(RMSE: Root Mean Square Error)는 3.93으로 나타났으며, LOOCV 방법을 통해 구한 잔차 제곱의 평균(mean square error)은 4.66이다.

Table 5. Moran's I of residuals.

Variables	Moran's I	E (I)	sd (I)	z	p-value
Residual	−0.016	−0.01	0.013	−0.507	0.306

다음으로는, LUR 모델의 잔차에 대한 공간 상관성(spatial autocorrelation)을 확인하기 위해 잔차의 Moran's I를 분석하였으나, Moran's I 값이 적고, 통계적으로 유의하지 않아 최종적으로 잔차의 공간 상관성이 존재하지 않는 것으로 판단하고, LUR 모델링 결과값을 그대로 적용하였다(표 5).

3. 3 수도권 지역 초등학교 노출 평가

수도권 지역에 존재하는 총 2,014개의 초등학교 주소를 TM 좌표로 전환하여 지도화하였다. GIS를 이용하여 거주지에서 500 m 버퍼내 도로길이, 주요도로와의 거리, 고속도로와의 거리, 고도, 초지 면적을 산출하였다(표 6). 초등학교로부터 500 m 반경에 속해있는 총 도로 길이는 평균 3.67 km였다. 초등학교와 고속도로와의 거리는 평균 3.04 km이고, 주요도로와의 거리는 평균 3.67 km였다. 고도는 평균 53.1 m였다. 초등학교로부터 반경 500 m내 초지 면적은 2.8 ha이었다.

LUR 모델링을 이용한 수도권 초등학교의 노출 추정치는 다음과 같다(표 7). NO_2의 평균 노출량은 34.04 ppb로 추정되었다. 서울지역의 초등학교는 총

Table 6. Distribution of variables of elementary schools.

	N	mean	sd	min	p25	p50	p75	max	iqr*
Road length within 500 m	2,014	3.67	2.12	0.00	2.04	3.59	5.04	15.23	3.01
Distance to nearest main road	2,014	3.06	3.67	0.00	0.44	1.10	4.94	10.00	4.50
Distance to nearest highway	2,014	3.04	3.14	0.01	0.81	1.76	3.87	10.00	3.06
Elevation	2,014	53.10	50.37	1.90	18.90	38.50	72.50	583.90	53.60
Green area within 500 m	2,014	2.80	42.86	0.00	0.10	11.95	37.32	410.75	37.21

*intequartile range

Table 7. Air pollution concentrations of Elementary School by Land Use Regression.

NO_2	N	mean	sd	min	p25	p50	p75	max	iqr*
Total	2,014	34.04	5.22	12.37	30.53	34.86	37.59	55.22	7.06
Seoul	591	35.97	3.10	25.92	33.84	35.82	37.88	45.44	4.04
Kyunggi	1,180	33.23	5.70	12.37	28.54	33.77	37.55	55.22	9.01
Incheon	243	33.28	5.69	15.21	29.41	34.62	37.10	50.33	7.69

*intequartile range

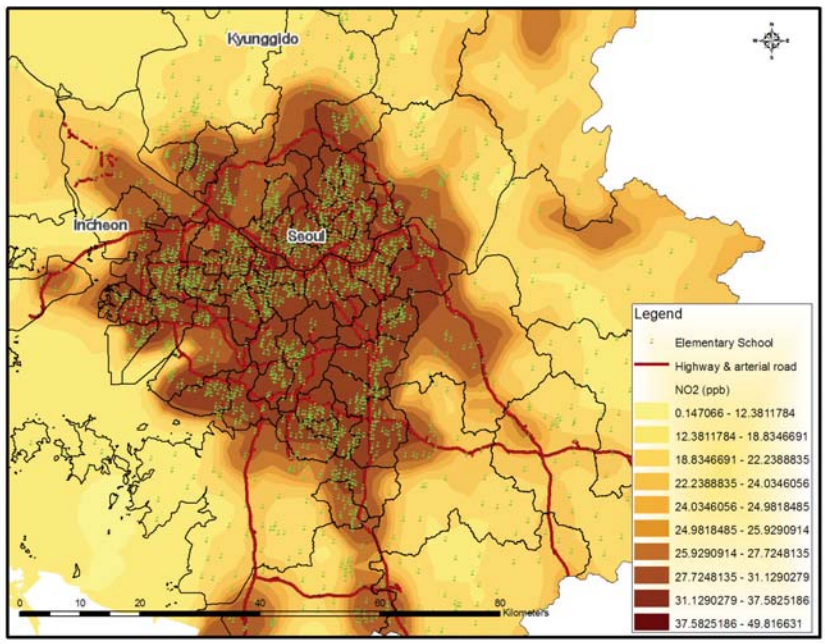

Fig. 3. Final predicted NO_2 surface within the Metropolitan area.

591개이며, NO_2 평균 노출량은 35.97 ppb로 경기지역과 인천 지역보다 높게 산출되었다. 경기지역은 1,180개의 초등학교를 분석하였고 평균 노출량은 33.23 ppb였고, 최대값은 55.22 ppb로 높은 노출량을 보였다. 인천지역은 총 243개의 학교를 분석하였고 평균 노출량은 33.28 ppb로 서울지역 다음으로 높았다. 특히 서울지역은 총 591개 초등학교 중 약 97%인 573개가 모두 국내 환경기준치인 30 ppb를 넘는 것으로 나타났다. 경기지역은 총 1,180학교 중 약 67%로 796개 학교가 환경기준치를 초과하였고, 인천지역은

244 학교 중 71%인 174개 학교가 이에 해당하였다. 전체적으로 수도권의 71%의 초등학교가 환경기준치를 초과하는 것으로 분석되었다. LUR 모델링의 모델 예측식을 통해 산출된 수도권 지역의 농도 분포도를 지표 표면에 구현한 결과는 그림 3과 같다. NO_2의 농도가 높은 곳은 주로 고속도로 및 간선도로가 지나가는 것을 확인할 수 있으며, 특히 서울 지역의 경우 초등학교 역시 대기오염의 농도가 높은 곳에 위치하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론 및 고찰

대기오염 노출 정도를 예측하기 위해 도로의 길이, 도로와의 거리, 고속도로 및 간선도로와의 거리, 토지이용 특성의 변수들을 이용하여 토지이용회귀분석을 하였다. 대기오염 및 토지이용 관련 변수들은 NO_2에 대해 59%의 설명력을 갖는 나타났다. Brauer *et al.* (2008)의 출생 코호트 연구에서는 NO_2의 실측 자료를 이용하여 분석한 결과 R^2가 0.56으로 나타났고, Gilbert *et al.* (2005)의 연구에서는 0.54로 분석되었다. 미국 샌디에고주에서 분석된 Ross *et al.* (2006)의 연구에서는 NO_2 모델이 77%의 설명력을 갖는 것으로 분석되었다. 이러한 연구들은 대부분 2주간의 실측자료를 이용하여 연구한 결과들이다. 본 연구는 대기오염 측정망의 연평균 자료를 이용하였음에도 불구하고 Ross *et al.* (2006)의 연구보다는 낮지만, Brauer나 Gilbert 등의 연구들보다는 높은 설명력을 갖는 것으로 나타났다 (Brauer *et al.*, 2008; Gilbert *et al.*, 2005). 최근에는 대기오염 측정망의 자료를 이용한 LUR 연구들에서 진행되고 있다 (Ghosh *et al.*, 2012; Olvera *et al.*, 2012; Smargiassi *et al.*, 2012; Saori *et al.*, 2008). 본 연구의 설명력을 높이기 위해서는 교통량 자료에 대한 구축이 필요하다. 미국과 유럽에서는 교통량 자료를 이용하여 LUR 모델링을 구축한 경우가 많으며, Gilbert *et al.* (2005)의 연구에서는 R^2가 0.54로 낮았지만, Ross 등의 연구에서는 0.77로, Sahsuvaroglu 등의 연구에서는 0.76으로 높았다 (Ross *et al.*, 2006; Sahsuvaroglu *et al.*, 2006).

LUR 모델링을 위해 대기오염 모니터링으로부터 버퍼 500 m 안의 도로의 길이, 고속도로와의 거리, 도로와의 거리, 고도, 인구밀도, 초지 및 나지 면적을 이용하였다. 특히 도로길이와 고속도로와의 거리, 도로와의 거리, 고도 및 초지 면적은 상관성이 높은 것으로 나타났다. NO_2의 경우, 자동차 배기가스가 주원인으로 볼 수 있으므로 교통관련 변수들을 이용한 LUR 모델링과 적합성이 높았다고 볼 수 있다. Gilbert *et al.* (2005)의 연구에서도 고속도로와의 거리, 500 m 안의 도로의 길이 및 토지이용의 면적을 변수로 사용하였다. Ross *et al.* (2006)의 경우는 40 m 내의 도로길이와 해안과의 거리를 이용하였다. 본 연구에서는 경기도 지역이 포함되어 있기 때문에 버퍼를 너무 작게 설정할 경우 도로의 길이에 대한 값의 변동폭이 커지므로, 500 m 버퍼를 이용하였다. 해안과의 거리 역시 해안에 접해있는 인천지역과 타지역과의 차이가 커지므로 사용하지 않았다.

LUR 모델링을 통한 초등학교 NO_2는 34.04 ppb로 나타났다. 환경정책기본법 시행령에 따른 이산화질소(NO_2) 환경기준은 연간평균치는 30 ppb이고, 24시간평균치는 60 ppb이고, 1시간평균치는 10 ppb이다. 본 연구에서는 연간평균치를 사용하여 분석하였으므로 환경기준과 비교하였을 때 4.04 ppb가 높은 것을 볼 수 있다. Oh *et al.* (2010)의 연구에서 연구대상 지역 초등학교의 대기오염 농도를 측정하였는데 도로에 인접한 경우, 평균 농도가 34.8 ppb로 본 연구와 비슷하였다. 미국의 미시간주에서의 연구 (Mukerjee *et al.*, 2009)에 의하면, 디트로이트와 디어번에 위치한 학교의 NO_2 평균 농도가 15.63 ppb로 나타나, 수도권 지역의 농도가 높다는 것을 알 수 있다. 특히, 서울지역의 97% 이상, 인천지역의 71% 이상, 경기도의 57% 이상이 대기 환경기준치가 넘는 것으로 나타났다. 이 초등학교들의 특성은 주요도로, 고속도로 및 간선도로와의 거리가 가까우며, 500미터 내 도로길이가 많고 초지면적이 적은 것으로 나타났다. 어린이들이 하루 중 많은 시간을 생활하는 학교에서 교통관련 대기오염의 영향을 많이 받고 있다고 볼 수 있다.

GIS를 이용한 교통관련 노출과 천식 질환에 대한 연구가 미국과 유럽을 중심으로 활발하게 이루어지고 있는데, 어린이 주거지역 또는 학교가 화물차 노선이나 고속도로에 가까울 경우 천식 증상을 높이며 (Gordian *et al.*, 2006; Zmirou *et al.*, 2004; Brauer *et al.*, 2002), 천식으로 인한 입원율을 높이고 (Lin *et al.*, 2002; Edwards *et al.*, 1994), 폐 기능을 감소시켰다

(Brunekreef *et al*., 1997)는 연구들이 있다. 네덜란드에서 4,000여명 어린이들을 대상으로 한 출생 코호트 연구에서 LUR을 이용하여 교통관련 대기오염에 대한 분석을 시행하였는데, 천명, 의사 진단 천식, 감기, 독감 등이 교통 관련 대기오염과 관련성이 있었다(Brauer *et al*., 2002).

대기오염 측정망의 long-term 자료를 이용하여 교통관련 대기오염 노출을 예측한 LUR 분석은 국내에서 처음 시도되었으며, NO_2에 대한 결정계수인 R^2의 값도 유의하게 분석되었다. 이러한 환경오염노출 모델링을 통해 정교한 개인별 노출치를 추정하여 건강영향과의 관련성을 확인할 경우, 사전에 건강 악영향을 최소화할 수있는 사전예방적인 보건사업을 실행할 수 있다. 향후 LUR에 대한 시공간적인 연구가 필요하며, 교통량 및 인공위성 자료 등의 구축을 통해 보다 정교한 모델링을 분석하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

Brauer, M., C. Lencar, L. Tamburic, M. Koehoorn, P. Demers, and C. Karr (2008) A cohort study of traffic-related air pollution impacts on birth outcomes, Environmental Health Perspectives, 116(5), 680-686.

Brauer, M., G. Hoek, P. Van Vliet, K. Meliefste, P.H. Fischer, A. Wijga, L.P. Koopman, H.J. Neijens, J. Gerritsen, M. Kerkhof, J. Heinrich, T. Bellander, and B. Brunekreef (2002) Air pollution from traffic and the development of respiratory infections and asthmatic and allergic symptoms in children, Am. J. Respir. Crit. Care Med., 166(8), 1092-1098.

Brunekreef, B., N. Janssen, J. Hartog, H. Harssema, M. Knape, and P. van Vliet (1997) Air pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways, Epidemiology, 8(3), 298-303.

Edwards, J., S. Walters, and R.K. Griffiths (1994) Hospital admissions for asthma in preschool children: relationship to major roads in Birmingham, United Kingdom, Archives of Environmental Health, 49(4), 223-227.

Ghosh, J.K., M. Wilhelm, J. Su, D. Goldberg, M. Cockburn, M. Jerrett, and B. Ritz (2012) Assessing the influence of traffic-related air pollution on risk of term low birth weight on the basis of land-use-based regression models and measures of air toxics, Am. J. Epidemiol., 75(12), 1262-1274.

Gilbert, N.L., M.S. Goldberg, B. Beckerman, J.R. Brook, and M. Jerrett (2005) Assessing spatial variability of ambient nitrogen dioxide in Montreal, Canada, with a land-use regression model, J. Air Waste Manag. Assoc., 55, 1059-1063.

Gordian, M.E., S. Haneuse, and J. Wakefield (2006) An investigation of the association between traffic exposure and the diagnosis of asthma in children, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 16, 49-55.

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, Environ. Sci. Technol., 41, 2422-2428.

Johnson, M., V. Isakov, J.S. Touma, S. Mukerjee, and H. Ozkaynak (2010) Evaluation of land-use regression models used to predict air quality concentrations in an urban area, Atmos. Environ., 44, 3660-3668.

Kashima, S., T. Yorifuji, T. Tsuda, and H. Doi (2009) Application of land use regression to regulatory air quality data in Japan, Sci. Total Environ., 407(8), 3055-3062.

Lin, M., Y. Chen, R.T. Burnett, P.J. Villeneuve, and D. Krewski (2002) The influence of ambient coarse particulate matter on asthma hospitalization in children: case-crossover and time-series analyses, Environ. Health Perspect., 110(6), 575-581.

Mukerjee, S., L.A. Smith, M.M. Johnson, L.M. Neas, and C.A. Stallings (2000) Spatial analysis and land use regression of VOCs and NO_2 from school-based urban air monitoring in Detroit/Dearborn, USA, Sci. Total Environ., 407(16), 4642-4651.

Oh, S.K., H.U. Seong, D.H. Lim, J.H. Kim, B.K. Son, H.C. Kim, J.Y. Lee, and J.H. Leem (2010) Relationship between air pollutants and prevalence of allergic disease/pulmonary function in students in Incheon, Pediatr. Allergy Respir. Dis. (Korea), 20(4), 264-276.

Olvera, H.A., M. Garcia, W.W. Li, H. Yang, M.A. Amaya, O. Myers, S.W. Burchiel, M. Berwick, and N.E. Pingitore Jr. (2012) Principal component analysis optimization of a PM2.5 land use regression model with small monitoring network, Sci. Total Environ., 425, 27-34.

Ross, Z., P.B. English, R. Scalf, R. Gunier, S. Smorodinsky, S. Wall, and M. Jerrett (2006) Nitrogen dioxide predic-

tion in Southern California using land use regression modeling: potential for environmental health analyses, J. Expos. Sci. Environ. Epidemiol., 16, 106-114.

Sahsuvaroglu, T., A. Arain, P. Kanaroglou, N. Finkelstein, and B. Newbold (2006) A land use regression model for predicting ambient concentrations of nitrogen dioxide in Hamilton, Ontario, Canada, Air & Waste Manage. Association, 56(8), 1059-1069.

Smargiassi, A., A. Brand, M. Fournier, F. Tessier, S. Goudreau, J. Rousseau, and M. Benjamin (2012) A spatiotemporal land-use regression model of winter fine particulate levels in residential neighbourhoods, J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol., 10, 1038-1048.

Zmirou, D., S. Gauvin, I. Pin, F. Sahraoui, J. Just, Y.L. Moullec, F. Bremont, S. Cassadou, P. Reungoat, M. Albertini, N. Lauvergne, M. Chiron, and A. Labbe (2004) Investigators V: Traffic related air pollution and incidence of childhood asthma: results of the Vesta case-control study, J. Epidemiol. Community Health, 58(1), 18-23.