

# 셀모형을 이용한 도시지역 대기질의 통계모델

김학열\*, Jean-Michel Guldman\*\*

\*부연구위원, 서울시정개발연구원, 지리정보연구센터,

Department of City and Regional Planning, The Ohio State University

\*\*Professor, Department of City and Regional Planning, The Ohio State University

## 1. 서론

미국의 Clean Air Act의 제정과 그 이후의 개정된 법령으로 인해 1970-1999 사이에 대기오염배출이 전체적으로 31%가 감소했다. 놀랍게도 이러한 감소는 인구의 33%, VMT의 140%, 및 GDP의 147%의 증가가운데 이루어 졌다. 그러나 1999년의 이런 전체적 통계는 미국 전역에 약 1억 5천만 톤의 대기오염물질의 방출되고 있다는 사실과, 6천 2백만 달하는 미국민이 주요 대기오염물질의 환경기준치 이상의 생활환경에서 살고 있다는 사실을 감추고 있다. 또한 1960년대이래 차량당 배기오염 배출이 60-80%의 감소가 이루어진 반면, 차량에 의한 전체적인 오염 배출은 이와 비례하여 감소되질 않았다.

따라서 급속한 도시성장, 교통체증 및 에너지사용의 증가추세에 있는 현 시점에서 대기질의 관리와 계획은 절실히 요구된다고 하겠다. 과거의 대기질에 관한 모델은 상당히 다양하게 개발되어온 반면, 그 모델의 적용범위가 특정 지역에 한정되었거나, 내용면에 있어서 대기오염에 미치는 한 두가지 설명인자(대기상태, 교통특성 등)에 관해서만 연구되어온 것이 대부분이다. 본 연구에서는 Well-Mixed cell 이론을 기초로 하여, 통계적 기법을 이용, 보다 종합적인 대기질 모델을 개발하였고, 특히 주변 인자(local urban factors)와 지역 인자(background factors)를 동시에 고려하면서 도시지역의 대기오염도와의 관계를 설명하였다. 인터넷에 의한 관련 데이터의 취득과 지리정보시스템(GIS)의 활용은 이 연구를 수행하는데 근간이 되었으며, 이를 통하여 대기오염, 기상조건, 토지이용, 도로 및 교통, 사회·경제변수를 포함한 방대한 양의 데이터베이스를 구축하였고, 선형회기모델을 추정하여 대기오염에 영향을 미치는 주변인자와 지역인자를 성공적으로 분리·확인하였다.

본 연구의 모델개발대상 오염물질로는 미국 환경보호청에서 규정한 주요 대기오염 물질 중 두 가지 오염 물질, 즉 오존(O<sub>3</sub>)과 일산화탄소(CO)로 선정하였는데, 두 오염물질은 그 오염원, 생성과정, 오염의 공간분포특성 등에서 선명한 대조가 이루어지기 때문이다. 공간적 범위는 미국 전역의 대기오염 측정망을 포함한 도시지역이며, 시간적 범위는 미국의 인구 센서스 년도에 맞도록 1990년으로 설정하였다. 분석변수로 사용될 대기오염, 기상조건, 토지이용, 도로 및 교통, 사회·경제 등의 자료는 GIS의 활용을 통해 변환·이용되었다.

## 2. 본 론

### 2.1 분석방법

Fickian system of diffusion equations을 적분하여 유도한 Well-Mixed Cells의 이론적 개념을 기초로 한 이 회귀분석 모델은 우선 각 지역공간을 여러 개의 Cell 구역으로 분할하였다(참조: 그림1). 각 구역의 오염농도는 구역으로 유입되는 오염물질과 구역 내에서 발생한 후 정화되지 않은 오염물질의 합이라고 가정하고, 그 합은 주변효과 및 지역효과로 표현되었다. 주변 효과 (local effect)는 측정소 주변의 오염물질 관련 요인(예, 토지이용 현황, 교통인자 등)에 의해 결정되며 지역 효과 (regional effect)는 구역 외곽에서 발생한 오염물질의 유입에 의해 결정된다고 정의하였다.

$$C_{pk} = \sum_{j=1}^L \left( \frac{q_{jk}}{q_k} \right) C_{pj} + \frac{1}{q_k} (E_{pk} + R_{pk} - S_{pk}) \quad (1)$$

$$C_{pk} = C_{pkR} + C_{pk} \quad (2)$$

단,  $C_{pk}$  = 셀 k의 오염물질 p의 측정치,  $C_{pkR}$  = 지역효과,  $C_{pkL}$  = 주변효과,

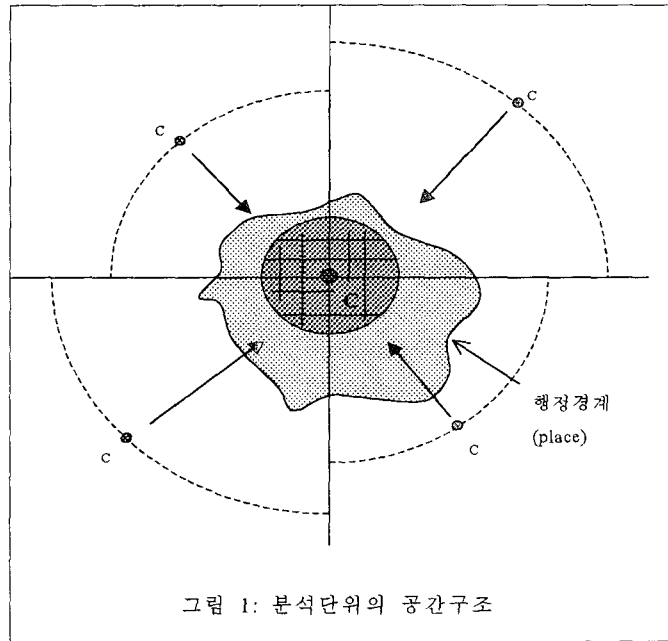
$E_{pk}$  = 오염배출률,  $R_{pk}$  = 화학반응에 의한 오염물질생성/감소,

$S_{pk}$  = 자정작용에 의한 오염감소율.

GIS를 활용하여 각 Cell에 오염측정 자료, 기상정보 자료, 토지이용 자료, 사회경제적 자료 및 교통 자료를 공간적으로 연결시켜 방대한 데이터베이스를 구축한 후, 오존과 일산화탄소의 모델을 정립하기 위해 아래와 같은 관계식을 가정하고 다중회귀식을 추정하였다.

$$C_o = \beta_c REFF + F_L(N, A, B, Z, M) + \varepsilon \quad (3)$$

단,  $F_L(N, A, B, Z, M) = G_L(M)H_L(N, A, B, Z)$ , REFF=지역효과, N=주거관련 인자, A=사회경제관련 인자, B=교통관련 인자, Z=토지이용관련 인자, M=기상관련 인자.



## 2.2. 분석결과

### 1) 오존 모델

오존 모델의 경우, '지역효과' 변수(REFF)를 제외한 모든 독립변수는 태양 복사량과 온도를 동시에 곱한 변수들이 모델에 투입되었다. 통계적으로 유의한 설명변수로는 REFF, 인구, 전기난방 가구비율, 석유/목재/석탄난방 가구비율, 건설업 종사자비율, 대중교통수단이용 비율 및 활엽·혼합림 비율의 변수들이며 각 회귀계수는 예상했던 관계를 나타냈다. 이 모델로 오존농도 변이의 약 57%를 설명할 수 있었다.

### 2) 일산화탄소 모델

오존 모델과 달리, 일산화탄소 모델의 경우 기상변수들이 통계적으로 무의미한 것으로 나타나서 최종 모델에서 제외되었다. REFF, 고용인구의 총 통근거리, 농지면적비율, 그리고 측정망으로부터 5km 내에 있는 교차점까지의 평균거리의 변수가 유의한 것으로 나타났다. 일산화탄소의 주요 오염원이 자동차이기 때문에 교통에 관련된 변수들이 통계적으로 상당히 유의한 것으로 나타났다. 이 모델로 일산화탄소 대기농도 변이의 약 43%를 설명할 수 있었다.

### 3. 결론

본 연구는 Well-Mixed Cells의 개념으로부터 유도된 공간 분석구조를 기초로 하여 미국 전역의 도시의 1990년 자료를 이용, 오존 및 일산화탄소의 대기오염도와 다양한 도시인자들간의 관계를 선형회기분석을 통하여 설명하려하였다. GIS의 활용으로 수행 가능하게 된 이 모델은 토지이용패턴, 교통특성, 사회경제적 인자 및 기상특성을 고려하면서, 대기오염의 '주변효과'와 '지역효과'를 통합하여 개발되었다. 전체적으로 이 모델의 설명력이 양호한 반면, 오차항의 크기로 인하여 대기오염도를 예측하는데는 충분하지 않았다. 그러나 각 변수의 계수가 유의하게 추정되었기 때문에, 변수들의 영향분석 및 관련정책 분석에 이용되어 질 수 있다.

오존 회기식 추정을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다. 오존 오염에 있어서는 '지역효과'가 가장 큰 것으로 나타나, 오존의 장거리 이동이 확인되었다. 또한, 회기식 추정전 예상했던 것과 같이, 온도와 태양복사량이 오존의 precursor와 반응함을 보여 주었다. 오존농도를 감소시키기 위해서는 대중 교통수단의 이용확대와 전기난방 주택을 증가시켜야하며, 도시내 녹지지역을 보전/확장하여야 한다고 분석되었다.

일산화탄소의 회기모델로 통하여, 일산화탄소가 오존에 비해 그 이동규모에 있어서 소규모적인 것으로 분석되었다. 일산화탄소의 배출과 기상조건(온도, 풍속)은 오존과 달리 서로 상호작용하지 않는 것으로 확인되었다. 교통특성과 관계된 모든 변수들이 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타나 일산화탄소 오염발생이 주로 차량에 의한 것임을 보여주었으며, 특히, 도로 교차점이 근접할수록 높은 일산화탄소 오염도를 나타내었다. 아울러, 농업지역 증가가 오염감소에 관계됨을 보여주었다. 이러한 결과는 일산화탄소의 감소를 위해서는 도로교차점의 교통정체 향상과 대중교통수단이용 증대에 시사하는 바가 크며, 일산화탄소 측정소의 설치는 교차로 주변에서 이루어지는 것이 바람직하다고 판단된다.

### 참 고 문 헌

Anderson R.F. and Greenberg M.R., 1981. The Associations Between Land Use and Particulate Air Quality in New Jersey, 1973-1977, Modeling and Simulation 12: 191-196.

Arndt R.L., Carmichael G.R., Streets D.G., and Bhatti N., 1997. Sulfur Dioxide Emissions and Sectorial Contributions to Sulfur Deposition in Asia, Atmospheric Environment 31, 10: 1553-1572.

Brankov E., Rao S.T., and Porter P.S., 1998. A Trajectory- Clustering-

Correlation Methodology for Examining the Long-Range Transport of Air Pollutants, *Atmospheric Environment* 32, 9: 1525-1534.

Briggs D.J., Collins S., Elliot P., Fischer P., Kingham S., Lebet E., Pryn K., Van Reeuwijk H., Smallbone K., and Van Der Veen D., 1997. Mapping Urban Air Pollution Using GIS: A Regression-Based Approach, *International Journal of Geographical Information Science* 11, 7: 699-718.

Broder I.E., 1986. Ambient Particulate Levels and Capital Expenditures: An Empirical Analysis, *Proceedings of the American Statistical Association (Business and Economic Statistics Section)*: 288-293.

Gujarati, D. N., 1988. *Basic Econometrics*, 2nd ed., McGraw-Hill Company.

Guldmann J.-M. And Shefer D., 1980. *Industrial Location and Air Quality Control: A Planning Approach*, John Wiley & Sons, New York.

Hewitt, C. N., 1991. Spatial Variations in Nitrogen Dioxide Concentrations in an Urban Area, *Atmospheric Environment*, 25B, 429-434.

Kim, H.Y., 1999. *GIS-Based Statistical Models of Urban and Regional Air Quality: The Cases of Ozone and Carbon Monoxide*. Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio.

McPherson E. G., Scott K.I., and Simpson J.R., 1998. Estimating Cost Effectiveness of Residential Yard Trees for Improving Air Quality in Sacramento, California, Using Existing Models, *Atmospheric Environment* 32, 1: 75-84.

Milionis A.E. and Davies T.D., 1994a. Regression and Stochastic Models for Air Pollution-I. Review, Comments and Suggestions, *Atmospheric Environment* 28, 17: 2801-2810.

Milionis A.E. and Davies T.D., 1994b. Regression and Stochastic Models for Air Pollution-II. Applications of Stochastic Models to Examine the Links Between Ground-Level Smoke Concentrations and Temperature Inversions, *Atmospheric Environment* 28, 17: 2811-2822.

Seinfeld, J. H., and Kyan, C. P., 1971. Determination of Optimal Air Pollution Control Strategies, *Socio-Economic Planning Sciences*, 5, 173-190.

Seinfeld J.H., 1988. Ozone Air Quality Models, *Journal of the Air Pollution Control Association* 38, 5: 616-645.

Shi J.P. and Harrison R.M., 1997. Regression Modeling of Hourly NO<sub>x</sub> and NO<sub>2</sub> Concentrations in Urban Air in London, *Atmospheric Environment* 31, 24: 4081-4094.

Suh H.H., Allen G.A., Koutrakis P., and Burton R.M., 1995. Spatial Variation in Acidic Sulfate and Ammonia Concentrations Within Metropolitan Philadelphia, *Journal of the Air and Waste Management Association* 45: 442-452.