

## 2A2) 시간 및 공간에 대해 평균화된 대도시 대기오염 특성해석에 관하여

### On Dynamics of Air Pollution Concentrations Averaged Temporally and Spatially Over a Metropolitan Area

김 석 철

(주)리우스

#### 1. 서 론

도시지역에서 관찰되는 대기오염현상은 거의 예외 없이 대단히 복잡한 양상을 띤다. 그 결과 모델링을 통하여 도시지역의 대기오염현상을 정확히 묘사하는 것은 매우 어렵다. 주가변동, 기상변화 등의 다양한 시간(/공간) 스케일을 지니는 복잡한 현상도 충분히 긴 시간(/공간)에 대해 평균을 취할 경우 일반적으로 비교적 단순한 경향을 보인다. 1990년부터 2001년까지 서울지역에 대한 관측자료를 분석해본 결과, 대기오염현상 역시 예외는 아닌 것으로 나타났다. 본 연구에서는 시간 및 공간에 대한 평균화과정이 대기오염현상에 미치는 영향을 분석함으로써, 일정기간 및 공간범위 이상에 대해 평균을 취할 경우 도시대기오염현상은 상당히 단순해져서 소수의 관측인자만으로 그 거동을 일정 오차범위 내에서 묘사할 수 있다는 점을 보이고자 한다.

#### 2. 평균화된 오염농도 모델식

시공간에 대해 평균화된 오염모델식은 아래의 일반적인 농도방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} [\partial/\partial t + U(x, z, t)\partial/\partial x + W(x, z, t)\partial/\partial z]C(x, z, t) \\ = Q(x, z, t) + R(x, z, t) - S(x, z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서  $U$ 는 풍하방향 수평속도성분이고,  $W$ 는 연직방향 속도성분이다. 좌표계는 직교좌표계로, 풍하방향이  $x$  연직방향인  $z$ 에 해당한다.  $Q$ 와  $R$ 는 단위체적당 오염물질 생성비율로, 각각 오염원에 의한 배출 및 화학반응으로 인한 생성과정을 나타낸다.  $S$ 는 단위체적당 오염물질 소멸비율로 건성 혹은 습성 침착 등에 의한 오염물질 제거과정을 표현하는 오염소멸항이다. 여기서 분자운동에 의한 물질확산은 일반적인 대기조건 하에서 난류확산에 비해 항상 무시될 수 있으므로 생략하였다. 식(1)을 모델대상영역에 대해 적분하여 연속방정식을 적용하면 공간에 대한 평균화된 농도, 곧 영역평균농도에 대한 미분방정식을 얻을 수 있다. 이 방정식을 풀어 시간에 대해 다시 적분하면 시간에 대해 평균화된 영역평균 농도에 대한 근사식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{C} \cong \frac{\alpha}{V + \beta + \gamma P} + \delta \quad (2)$$

식(2)가 근사적으로 성립하는 까닭은 식의 유도과정에서 복잡한 형태의 저차항을 무시하였기 때문인데, 평균화 시간이 길 때 이러한 근사가 타당함을 입증할 수 있다. 식(2)를 유도하는 일련의 과정은 통상적인 박스모델(Jorquera, H. 2002a,b, Seinfeld and Pandis, 1998)의 유도과정과 유사하며, 여기서는 자세한 설명을 생략한다. 식(2)에서  $\bar{C}$ 는 24시간단위로 평균을 취한 영역평균오염농도이며,  $V$ 와  $P$ 는 각각 일평균풍속과 일평균강수량이다.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  그리고  $\delta$ 는 각각 오염배출량과 대기혼합고 및 습성침착계수 등의 함수로 주어지는 모델인자와 배경농도로서  $V$ 와  $P$ 에 비해 상대적으로 일정한 값을 지닌다. 본 연구에서는  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  그리고  $\delta$ 가 매월 일정한 값을 유지하는 것으로 간주했다. 식(2)로부터 시간 및 공간에 대해 평균화된 오염농도( $\bar{C}$ )의 단기변동이 풍속과 강수량만의 함수로 매우 단순하게 표현된다.

### 3. 서울지역에 대한 모델적용

실제 농도자료가 단순한 형태의 평균농도 모델식(2)에 의해 어느 정도 수준으로 설명되는지 분석하기 위해 1990년부터 2000년까지 서울지역의 대기질측정망자료 및 기상관측자료를 검토했다. 서울시에 설치된 27개 환경부 대기질측정소 자료로부터 추출한 일평균 오염농도를 종속변수로 설정하고, 동일 기간에 대한 기상청 일평균풍속 및 강수량자료를 독립변수로 설정한 후, 식(2)의 형태로 회기방정식을 구해 보았다. 이때  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ 는 매달 일정한 값을 유지하는 회기계수로 연도간에 변화는 없는 것으로 설정했다. 즉 1990년 1월의  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ 는 1990년 2월의  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ 와 다른 값을 지니지만, 1991년 1월의  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ 와는 동일한 것으로 간주했다. 표 1은 각 오염물질에 대한 회기방정식의 편차 곧 식(2)의 모델링오차를 나타낸 것이다. 여기서 모델링오차는 식(2)에 의한 모델농도와 관측농도간의 L2 놈(norm)을 그 달의 평균 오염농도로 나눈 백분율이다. NO<sub>2</sub>의 경우 상대오차가 평균 16%이며, 오차가 가장 큰 PM<sub>10</sub>의 경우에도 32%로 나타난다. NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 그리고 CO의 일평균 오염농도는 상대오차 20% 범위 내에서 모델식(2)를 만족하는 것으로 나온다.

Table 1. Model errors against measurement data (1990 to 2001)

	relative error* (%)		absolute error (ppb or $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	average	maximum	average	maximum
NO <sub>2</sub>	16	25	5.09	9.53
CO	16	24	2.35	9.11
SO <sub>2</sub>	20	33	4.06	20.2
TSP	27	46	22.4	71.9
PM <sub>10</sub>	32	51	21.9	51.1

\* defined as L<sub>2</sub> norm of daily deviations (i.e. errors) divided by monthly average concentration

### 4. 결 론

이론적으로 유도한 평균오염 농도모델을 바탕으로 1990년 1월 1일 0시부터 2000년 12월 31일 24시까지 서울지역에서의 1시간 단위의 기상 및 대기질 측정자료를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적정크기 이상의 공간 및 시간에 대해 평균을 취할 경우, 국지적 및 단기적으로 복잡한 양상을 띄는 서울의 대기오염 농도변화가 매우 단순한 규칙을 따른다. 그 결과 평균오염농도에 대한 이론적인 모델식을 대단히 단순한 형태로 구성할 수 있었다.

2. 일평균 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>농도에 대한 모델링 불확실성은 평균 16%로 나타났다. CO에 대해서는 20%, TSP에 대해서는 27%였다. 오존을 제외하고 가장 불확실성이 큰 PM<sub>10</sub>의 경우에도 평균 32%로 나타났다. 모델식의 형태가 단순함에도 불구하고 모델링신뢰도는 꽤 높았다.

### 참 고 문 헌

- Jorquera, H. (2002a), Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach— I. Carbon monoxide, nitrogen oxides and sulfur dioxide, Atmospheric Environment, Vol.36, 315~330.
- Jorquera, H. (2002b), Air quality at Santiago, Chile: a box modeling approach— II. PM<sub>2.5</sub>, coarse and PM<sub>10</sub> particulate matter fractions, Atmospheric Environment, Vol.36, 331~344.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N.(1998) Atmospheric Chemistry and Physics, 2nd Edition, Wiley, NewYork (Chapter 23).