

ISCLT에 의한 서울지역의 SO₂ 오염도 조사

Modeling of SO₂ Distributions in the Seoul Area by Using ISCLT

김 영 성 · 손 재 익

한국에너지기술연구소 에너지환경연구부
305-343 대전시 대덕연구단지 사서함 5호
(원고접수: 1992. 4. 20)

Young-Sung Ghim and Jae-Ek Son

Energy and Environment Research Division
Korea Institute of Energy Research
P.O. Box 5 Taedok Science Town, Taejon 305-343, Korea
(Received 20 April 1992)

Abstract

Sulfur dioxide distributions in the Seoul area in 1988 were reproduced by using ISCLT which was the most versatile model among the preferred models recommended by USEPA. Modeling was performed season by season in order to take into account distinct four seasons in Korea. Predicted concentrations were close to the observed ones in most regions, but were different from the observed ones in such regions where the effect of sources outside the Seoul area was important. For better results of the modeling, the modeling domain should be chosen after a careful examination of principal wind directions.

1. 서 론

Gaussian모델에 의한 서울지역 대기질 분석의 가능성을 조사하기 위하여 ISCLT (Industrial Source Complex Long-Term) 모델을 이용하여 1988년 서울지역의 SO₂ 농도를 계산하고자 한다. ISC를 선택한 이유는 미국 EPA에서 우선적으로 추천하고 있는 9개의 모델(preferred model) 중 가장 범용성이 있을 뿐 아니라 미국에서 가장 많이 사용되는 모델이기 때문이다(김영성 등, 1991). 서울지역에서 오염도가 심한 물질로는 부유분진과 아황산가스가 있으나 부유분진은 도로비산 등 통상적이 아닌(non-traditional) 오염원의 비중이 크고 대기중 강하속도(settling velocity)의 참작이 어렵다는 점에서 아황산가스를 대상으로 하였다.

그러나 시간단위나 일단위의 단기간에 비하여 장

기간의 모델링이 다소 유리하다 하여도 서울의 대기질 분석을 위하여 Gaussian모델을 이용하는 것은 매우 위험부담이 큰 작업임에는 틀림이 없다. 우선 대상지역의 크기만 하여도 서울은 대략 동서로 36km, 남북으로 30km이며 대기환경보전법에서 정한 3종이상의 사업장만 하여도 약 300개가 전역에 분포되어 있고 고층빌딩 포함 지형조건이 매우 복잡하다. EPA의 모델링 지침서에는 Gaussian모델이 유용한 거리를 대략 50km로 보고 있는데(USEPA, 1986) 이는 한 오염원 혹은 오염원군으로부터 이들의 영향을 알아보기 할 때의 거리기준이다.

따라서 이상적인 경우라면 서울의 대기질 분석에도 미국 Los Angeles 등과 같이 점오염원의 영향분석을 위하여는 ISC 등과 같은 Gaussian모델을, 지역단위의 대기질 모델링을 위하여는 수치모델을 사

용하여야 한다 (김영성 등, 1991). 그러나 수치모델을 사용하기 위하여서는 우선 적절한 모델이 갖추어져야 하며 측정치든 계산치든 모델의 정밀도에 상응하는 상세한 기상자료와 오염원자료가 준비되어야만 한다. 국내의 대기질 분석에도 수치모델이 사용된 예가 보고되고 있기는 하나 많은 부분이 시험적 수준에 머무르고 있는 형편이다 (강인구 등, 1988; 박일수와 김정우, 1991).

이같은 수치모델의 어려움때문에 국내에서는 그동안 Gaussian모델을 이용한 도시 및 공단 등 오염우심지역에 대한 대기질 분석이 꾸준히 시도되어 왔다. CDM, TCM, ISC 등이 주로 사용되었으며 ISCLT에 의한 모델링도 Engineering-Science사 (1983) 이래 김양균 등(1985), 전의찬과 김정욱 (1990) 등에서 발견되고 있다.

표 1은 장기(long-term) Gaussian모델을 이용하여 서울지역의 SO₂ 농도를 계산한 후 이를 측정치와 비교하였던 주요결과를 정리한 것이다. 전의찬과 김정욱(1990)은 측정치와 비교단계를 거치지 않고 곧바로 모델 계산치를 분석에 이용하였으며, ISCLT 계산치를 비교한 다른 두 경우도 모두 아직 대기오염 측정망이 충분히 정비되지 못하였던 1981년을 대상으로 하였고 평탄한 지형을 가정하였으며 SO₂의 반감기들도 적절히 고려되지 못하였다. 뿐만 아니라 ISC모델 자체도 UNAMAP Version 6가 배포된 1986년 이후인 1987년 12월에 개정판이 나왔으며 (USEPA, 1987) 본 연구에서는 새로운 ISCLT를 이용하고 그동안 미비하였던 분석방법들을 보완하여 서울지역을 대상으로 ISCLT의 적용가능여부를 다시 한번 점검하고자 한다.

Table 1. Correlation between observed (Y) and predicted (X) SO₂ concentrations by the long-term Gaussian model in the Seoul area (concentration unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Source	Model	Regression	r	Modeling method
Engineering Science(1983)	ISCLT	$Y=0.96X - 56.69$	0.99	Annual average in 1981; meteorological data from Kimpo airport.
				Number of observations = 5 (Kirum, Hannam, Kwanghwamun, Hapdong, Kuui); among valid observations, data at Namsan was excluded because sampling point was too high, and data at Shilim and Pulgwang were excluded because differences from predicted values were too large.
Kim et al. (1985)	CDMQC	$Y=0.77X - 12.1$	0.85	Average concentration between July to September in 1981;
	TCM-2	$Y=0.68X - 18.1$	0.93	meteorological data from the Central Meteorological Office;
	ISCLT	$Y=0.52X - 12.2$	0.96	SO ₂ half life was not considered.
				Number of observations = 5 (Kwanghwamun, Yongdungpo, Pulgwang, Hannam, Kirum); observation at Namsan was excluded because sampling point was too high, and that at Shilim was excluded because sampling point was located within the Seoul National University apart from the residential area.
Na(1990)	CDM-2	$Y=0.44X + 77.5$	0.66	Average concentration between October to December in 1988;
	SCM-3.2*	$Y=0.93X + 113.6$	0.81	topographical effect was considered in SCM; SO ₂ half life was set to be 2 hours.
				Number of observations = 16; among 20 monitoring sites, Hannam and Kirum did not provide valid data, and observations at Ssangmun and Oryu were too large compared with predicted values.

* Seoul Climatological Model Version 3.2, modified from CDM-2 so that topographical effect could be considered.

2. 모델링 방법

2.1 입력자료 준비

국립환경연구원으로부터 1988년 서울지역의 분기별 기상 및 오염원 자료를 입수하여 이를 중심으로 ISCLT 입력자료를 마련하였다. 기온자료는 1988년 기상연보의 월별 측정치를 이용하였으며, 혼합고는 국립환경연구원의 그동안 측정자료를 토대로 분기별 입력자료를 구성하였다 (이덕길 등, 1987). 수직

방향의 온위기울기(potential temperature gradient)와 풍속지수는 ISCLT에서 사전 지정된 값을 사용하였다.

그림 1은 1988년의 분기별 풍향 및 풍속분포를 나타낸 것이다. 풍향은 22.5°씩 16방향으로 분류하였으며 풍속은 평균풍속을 각각 1.5, 2.5, 4.3, 6.8, 9.5, 12.5m/s로 하여 6등분한 결과이다. 1/4분기와 4/4분기에는 서풍이 두드러진 반면 3/4분기에는 북동풍이 많으며 2/4분기는 주풍이 서풍에서 북동풍

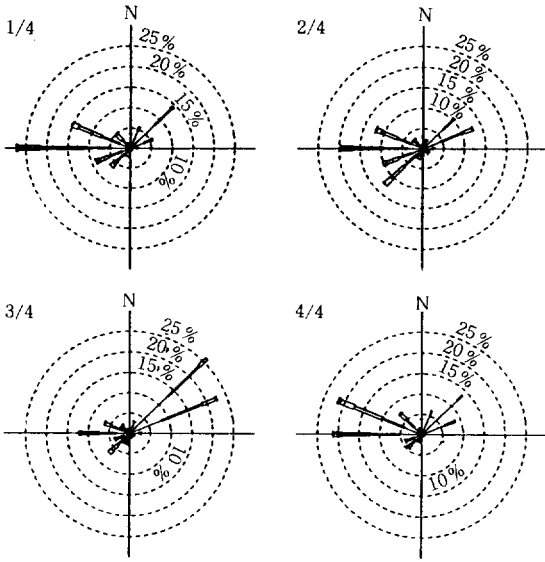


Fig. 1. Wind roses in the Seoul area in the quarters of 1988. Number of wind speed categories is 6. Mean wind speeds of each category are 1.5, 2.5, 4.3, 6.8, 9.5, 12.5m/s.

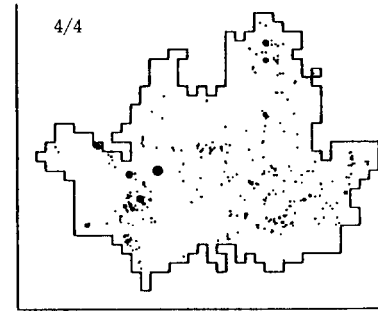
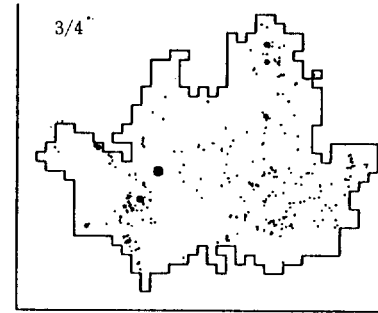
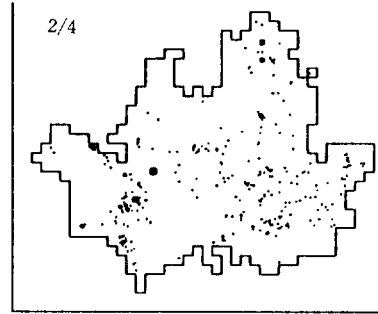
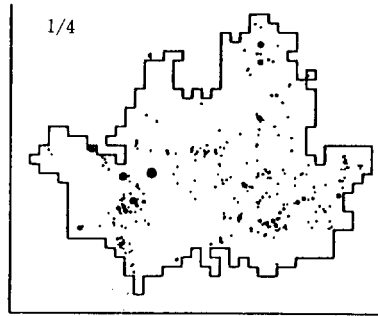


Fig. 2. SO₂ emissions from point sources in the quarters of 1988. The largest emission in the first quarter is 99.8g/s.

으로 전환되는 과정에서 다른 분기에 비하여 바람의 양상이 다양하다.

점오염원은 환경처의 대기오염 배출업소 조사자료 중 3종이상 배출업소를 대상으로 한 것이다. 분기별로 다르나 서울지역에는 약 300개의 3종이상 배출업소가 있는 것으로 파악되었다. 면오염원에는 4,5종 배출업소와 주거지의 연료사용, 차량오염들이 포함되는데, 서울을 TM좌표상에서 1km씩 분할하여 553개를 설정하였으며 평균배출고도를 10m로 가정하였다. 원래 ISCLT에서는 차량오염을 연속되는 부피오염원으로 취급하도록 추천하고 있으나 본 연구의 오염원자료에서는 면오염원에 포함되었다.

그림 2와 3은 서울지역 점오염원과 면오염원의 분기별 SO₂ 배출 분포를 보여준 것이다. 면오염원의 배출은 분기별로 변화가 뚜렷한 반면 점오염원의 배출은 분기별로 거의 차이가 없다. 면오염원의 경우 1/4분기의 배출이 가장 심하고 4/4, 2/4, 3/4 분기 순인데 분기별 평균기온과 반대의 변화를 보여 난방연료 사용이 SO₂ 배출의 주요 원인임을 나타내고 있다. 지역적으로는 서쪽내지는 남서쪽에 대형 점오염원들의 밀집이 두드러지며 북동쪽에도 다소 큰 오염원들이 존재하고 있는데 서울지역의 바람이 주로 서풍내지 북동풍임을 감안한다면 매우 불리한 오염원 분포양상이다. 면오염원의 배출 역시 서풍이 많은 이유는, 4,5종 중소업소가 면오염원

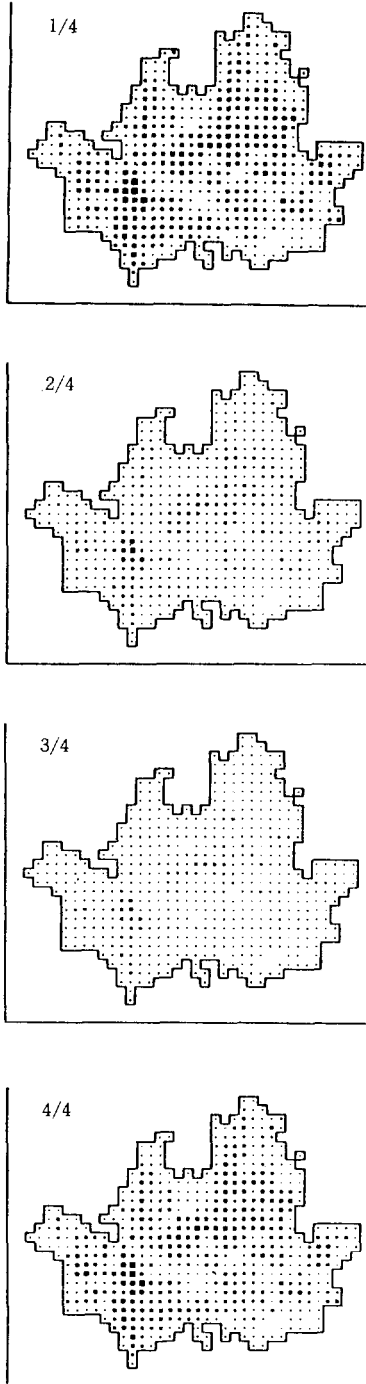


Fig. 3. SO₂ emissions from area sources in the quarters of 1988. The largest emission in the first quarter is 101.5g/s.

에 포함된 때문으로 생각되며 이를 배제한다면 면 오염원의 배출양상은 대체로 서울지역의 인구분포와 유사할 것으로 짐작된다.

2.2 모델 계산

McElroy-Pooler 확산계수를 사용하는 도시 모드 3의 조건에서 모델링을 행하였다. Regulatory 목적의 EPA 모델링 선택조항을 대부분 택하였으나 계절별로 심한 변화를 보이는 우리나라의 기후특성을 고려하기 위하여 SO₂ 반감기는 변수로 하였다. ISC에서는 terrain truncation 기법에 의하여 대상지역내 지형 변화를 제한적으로 수용하고 있는데 (USEPA, 1987), 면오염원을 포함한 오염원 자료와, 측정지와 비교를 위한 고정측정망 위치의 수용체(receptor) 자료에는 지형 요소를 포함시켰다. 그러나 격자형태의 수용체는 해수면을 가정하여 전반적인 오염 경향만을 파악하고자 하였다. 풍향 풍속 측정높이는 기상연보에 나타난 서울측후소의 10.6m를 입력하였다. 농도는 기온 20°C, 기압 1,013mb를 가정하여 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 단위의 SO₂ 계산치에 0.3754를 곱함으로써 ppb로 환산하였다.

3. 모델 계산치와 측정치의 비교

3.1 유효측정치

서울지역에는 20개의 측정망이 설치되어 있어 해당지역의 SO₂ 농도를 연속적으로 자동측정하고 있다. 측정망 측정치의 유효성은 여러 관점에서 검토될 수 있으나 (Nelson et al., 1980), 기본적으로 1) 필요한 기간동안 의미있는 평균치를 출만큼 충분한 기간동안 측정을 하였는가, 2) 측정소의 위치가 그 지점의 측정치를 효과적으로 대표할 수 있도록 설치되었는가 등이 조사되어야 한다. 2)의 내용은 환경처를 중심으로 이미 검토가 진행중에 있을 뿐 아니라 (한국대기보전학회, 1990) 작업이 간단치 않으므로 본 연구에서는 우선적으로 1)의 관점만을 살펴보았다.

본 연구에서는 송동용 등(1990)과 같이 Larsen (1973)의 기준에 의거하여 측정기간의 2/3가 유효할 때 평균치가 유효하다고 보았다. 먼저 하루중 16시간 이상의 자료가 수집되었을 때 일평균을 산출하였으며 월평균은 측정일수가 해당월 총일수의 2/3이상일 때, 분기평균은 측정일수가 해당분기 총일수의 2/3이상일 때, 연평균은 측정일수가 연간 총일수의 2/3이상일 때 유효하다고 보았다.

3.2 비교방법

분기별로 반감기를 변화시키며 SO₂ 농도를 계산하여 측정치와 비교하였다. 표 2는 SO₂의 반감기에 따른 분기별 유효측정치와 계산치의 상관관계를 나타낸 것이다. 서울지역 측정망의 수가 20개임에도 실제 비교측정점수는 분기별로 12-14개에 불과하였으며, 측정점의 유효일수 관계는 앞절에서 설명한 바와 같다. 측정치가 계산치에 비하여 너무 크거나

작을 경우 역시 비교 대상에서 제외하였는데 본 연구 모델링의 근본적인 제약에 의하여 일부 측정점의 측정치는 재현이 불가능할 수도 있다고 생각되어서이며, 이같은 일부 측정점을 제외한 나머지 부분들은 모델링에 의하여 충분히 예측이 가능하다고 전제하였기 때문이다.

Table 2. Regression between valid observations (Y) and predictions (X) with various SO₂ half life (concentration unit: ppb).

Quarter	T½(hr)	Regression	Remarks*
1/4	2	Y=1.122 X +27.67	Number of observations = 14. Hannam, Kirum, Mullae, Tungchon, Pangi - C2/3; Ssangmun - TSMP.
	4	Y=0.942 X +27.14	
	8	Y=0.851 X +27.50	
2/4	0.5	Y=1.279 X +30.38	Number of observations = 13. Hannam, Kirum, Myonmok, Shinsol, Chamshil2, Pangi - C2/3; Tungchon-TSMP
	1	Y=0.944 X +28.05	
	2	Y=0.771 X +26.51	
3/4	0.1	Y=1.521 X +11.98	Number of observations = 12. Hannam, Kirum, Songsu, Myonmok, Shinsol, Tungchon, - C2/3; Ssangmun - TSMP; Mullae - TLMP
	0.2	Y=1.032 X +10.88	
	0.5	Y=0.535 X +9.69	
4/4	1	Y=1.277 X +15.89	Number of observations = 12. Hannam, Kirum, Songsu, Myonmok, Kuro, Tungchon - C2/3; Ssangmun, Oryu - TSMP.
	2	Y=0.985 X +10.57	
	4	Y=0.837 X +8.47	

* C2/3=Do not meet 2/3 criteria, i.e., number of days on which valid observations were made was less than 2/3 of total number of days in that quarter; TSMP = Model prediction was too small; TLMP = Model prediction was too large. Because of above reasons, observations at those sites were excluded during comparison with predicted values.

측정점 측정치의 예측가능 여부는 측정치와 계산치의 개별오차를 평균오차와 비교하여 판단하였다. 측정점 i에서의 측정치와 계산치의 오차 ΔCi는

$$\Delta Ci = Cobs,i - Cpred,i \quad (1)$$

Cobs,i는 i점에서의 측정치를, Cpred,i는 i점에서의 계산치를 지칭한다. 평균오차(average bias) ΔC(avg)는(Bowers et al., 1982; McRae and Seinfeld, 1983)

$$\Delta C(avg) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta Ci \quad (2)$$

N은 비교대상 측정점의 총수이다. 오차의 분산도(average spread) σ는

$$\sigma = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta Ci - \Delta C(avg))^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

측정점이 많으면 ΔCi는 ΔC(avg)를 중심으로 정규분포를 이룰 수 있다고 가정하여 (ΔCi - ΔC

(avg))/σ의 절대값이 2에 근접하거나 2보다 클 때 측정치는 계산치에 비하여 너무 크거나 작다고 판정하였고 측정점 i는 비교대상에서 제외하였다.

3.3 비교결과

그림 4는 측정치와 계산치의 오차를 측정치를 기준으로 조사한 그림이다. 측정치가 키짐에 따라 오차는 음의 값으로부터 양의 값으로 증가하여 측정치가 작을 때는 계산치가 높은 예측을, 측정치가 클 때는 낮은 예측을 하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 전반적으로는 낮은 예측(underprediction)의 경향이 뚜렷한데 1) 본 연구의 오염원 자료가 서울지역내 오염원을 충분히 포함하지 못하였거나, 2) 서울이외 지역의 오염원이 상당한 영향을 미치고 있는 등의 이유를 생각할 수 있다.

주변을 사각형으로 둘러싼 기호는 측정치와 계산치의 오차가 커 비교대상에서 제외된 측정점을 표시한다. 대부분 양의 방향으로 오차가 큰 점들로, 표 2에 명시한 바와 같이 1/4분기는 쌍문동, 2/4분기는 등촌동, 3/4분기는 쌍문동과 문래동, 4/4분기

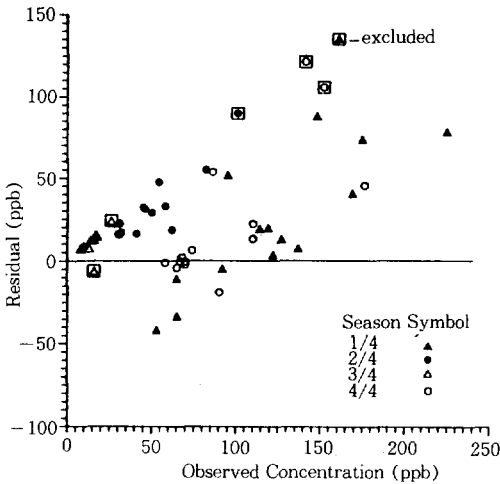


Fig. 4. Distribution of concentration residuals (observed-predicted) as a function of observed values. Boxed symbol represents that the residual is too large and that data will be excluded during comparison with the predicted value.

는 쌍문동과 오류동들이다. 대부분이 바람이 부는 방향인 서쪽이나 북동부에 위치하여 서울보다는 서울 이외지역의 오염원의 영향이 클 것으로 예상되는 지점들이다. 예외적으로 3/4분기 문래동만이 계산치가 측정치보다 크게 나타난 것은 그림 1에서 3/4 분기에 서풍 대신 북동풍이 강하였던 때문으로 생각된다.

표 2에서는 SO₂의 반감기에 따른 분기별 유효 측정치와 계산치의 상관관계를 볼 수 있다. 상관식에서 X의 계수가 1에 근접할수록 계산치(X)는 체계적 오차(systematic error)없이 측정치(Y)를 재현하게 되며 이때 상수항은 모델에서 고려한 오염원 이외의 원인에 의하여 발생하는 배경농도가 된다. 당연하지만 반감기가 커질수록 SO₂의 모델계산치는 커지므로 X의 계수는 작아지게 된다. 3/4분기의 logarithmic scale을 제외하고는 2, 4, 8 등 2의 배수로 반감기를 변화시킨 결과 1/4분기는 4시간이, 2/4분기는 1시간이, 3/4분기는 0.2시간 즉, 12분이, 4/4분기는 2시간이 SO₂ 반감기로써 적절하였으며 상관식의 X의 계수는 모두 거의 1에 가까웠다.

표 2에서 1/4분기의 최적 반감기 4시간은 regulatory 목적의 EPA 모델링 지침에서 지정한 반감기이며 (USEPA, 1987), 4/4분기의 2시간은 나진균(1990)이 SCM(Seoul Climatological Model)으로부터 추정하였던 시간과 동일한 수치이다. SO₂의 반감기를 결정하는 요인으로는 건조상태에서의 지표침착(dry deposition)과 강우에 의한 세정효과(wet de-

position), 그리고 SO₂로의 화학적 변환들을 들 수 있다 (Zannetti and Tombach, 1986). 우리나라와 같이 강수량이 많은 나라에서는 강우에 의한 세정효과가 가장 크리라는 사실은 쉽게 짐작할 수 있는데 1988년 분기별 강수량을 보면 (중앙기상대, 1988) 1/4분기가 39mm, 2/4분기가 177mm, 3/4분기가 503mm, 4/4분기가 41mm로 강수량이 많을수록 표 2의 반감기는 짧아지고 있다.

그럼에도 3/4분기의 반감기 12분은 통상적인 의미로는 이해하기 어려운 수치이다. 그림 5는 3/4분기의 농도 계산치와 측정치의 비교결과를 보여주고 있다. 배경농도를 의미하는 Y절편을 제외한 측정치의 변화가 배경농도보다 작아 전체적으로 오염원의 오염도에 대한 기여가 낮은 수준임을 나타내고 있다. 물론 배경농도는 그 자체가 계산치와 측정치의 비

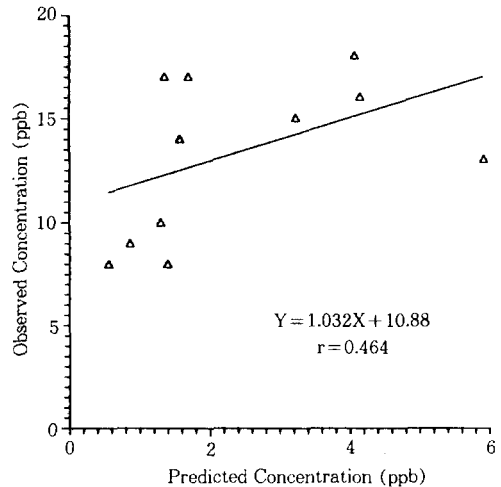


Fig. 5. Comparison of observed and predicted concentrations in the third quarter of 1988 when the half life of SO₂ is only 12 min., unrealistically short.

교결과이다. 그러나 계산치가 입력 오염원의 배출을 바탕으로 하였음을 감안하면 측정치로 나타난 3/4분기 대기현실이 입력 오염원의 배출보다는 배경농도로 대표되는 다른 요인에 의하여 변하고 있음은 분명하다. 따라서 3/4분기의 비현실적인 반감기 12분의 원인에 대하여서는 여러가지를 생각할 수 있으나, 오염원의 낮은 영향을 반감기만을 변수로 예측하고자 한데서 발생한 결과로 이해할 수 있다.

표 3은 표 2에서 결정한 반감기를 이용한 모델 계산치와 유효 측정치의 상관 관계를 조사한 결과이다. 유효 측정치의 평균오차 $\Delta C(\text{avg})$ 에서 표 2의 상수항인 배경농도 C_b 를 제하면 오차의 크기가 크게 줄고 있다. 이같은 사실은 물론 오차가 아주

Table 3. Correlation between valid observations (Y) and model predictions (X) of SO₂ concentrations in the Seoul area (unit: ppb).

Period	T _h (hr)	C _b	$\Delta C(\text{avg})$	$\Delta C(\text{avg})-C_b$	σ	r
1/4	4	27.14	21.30	-5.84	38.51	0.545
2/4	1	28.05	27.00	-1.05	11.92	0.608
3/4	0.2	10.88	10.95	0.07	3.09	0.464
4/4	2	10.57	9.39	-1.18	20.14	0.767
Annual*	-	18.09	13.14	-4.95	11.78	0.783

* Number of observations = 12. Data at Hannam, Kirum, Myonmok, Shinsol, Tungchon, Pangi were excluded because number of days on which valid observations were made was less than 244, i.e., 366x2/3; and data at Ssangmun, Oryu were excluded because model predictions were too small.

큰 1,2개의 측정점을 제외한 가운데 SO₂ 반감기만을 변수로 하여 얻은 결과이기는 하나, EPA 모델링 지침에 따라 배경농도를 정확히 감안하거나 (USEPA, 1986) 주풍향을 고려하여 모델링의 범위를 보다 효율적으로 설정할 경우 모델링의 결과가 훨씬 향상될 수 있음을 의미하는 것이다.

표 3은 또한 그림 6과 함께 분기별로 반감기를 변화시키며 모델링한 연평균 계산치를 측정치와 비교한 결과를 보여주고 있다. X의 계수가 0.904로 1에 근접할 뿐 아니라 상관계수 r도 분기별로 계산하였을 때보다 오히려 높은 0.783을 나타내고 있다. 이같은 결과들은 환경처에서 모델계산의 유효성 판정기준으로 제시한 기율기(X의 계수) 0.8-1.2, 상관계수 0.71 이상의 조건에 충분히 부합되는 결과이다 (환경청, 1986). 따라서 연평균농도를 계산할

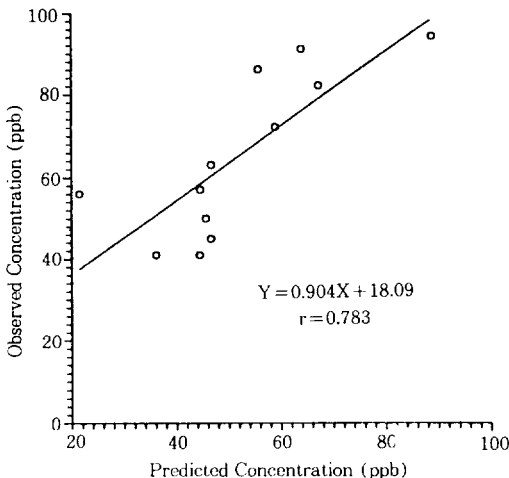


Fig. 6. Comparison of observed and predicted annual-averaged concentrations.

때에도 우리나라의 다양한 대기조건을 감안하여 최소한 분기별 구분이 필요하며, 기상 및 오염원 자료를 분기별로 마련하여야 함은 물론 반감기 등을 통하여 분기별 대기조건의 변화도 고려되어야 함을 표 3은 보여주고 있다.

4. 서울지역의 SO₂ 오염도 분석

4.1 대기오염 측정점의 점오염원과 면오염원의 영향

그림 7은 분기별로 각 측정점의 점오염원과 면오염원의 영향을 계산한 것이다. 순수한 계산치이므로 표 3에서 언급한 배경농도 등이 고려되지 않은 수치들이다. 측정일수가 부족하거나 계산치와 측정치의 차이가 커 측정치를 통하여 검증받지 못한 측정점의 계산결과는 비교대상에서 제외하였다.

오염도가 높은 1/4분기와 4/4분기에서 특히 면오염원의 영향이 크며 오염도가 낮은 2/4분기와 3/4분기에는 점오염원도 SO₂ 농도에 상당한 역할을 하는 것으로 나타나고 있다. 이같은 사실은 그림 2와 3에서 이미 살펴보았던 바와 같이 점오염원의 배출은 분기별로 큰 변화가 없는 반면 면오염원 배출은 분기별 변화가 뚜렷한 때문인데, 1/4분기와 4/4분기의 높은 오염도가 대부분 면오염원의 난방연료 사용때문임을 증명하는 것이다.

지역별로는 대규모 배출업소가 위치한 서남부의 문래, 구로, 오류동 등지에서 점오염원의 영향이 상대적으로 커 1/4 및 4/4분기에는 면오염원의 영향이 크고 3/4분기에는 점오염원의 영향을 많이 받는 등 분기별 변화를 보이는 반면, 상업지인 광화문이나 주거지인 불광동, 반포동, 녹지인 신림동 등지에서는 분기에 관계없이 면오염원의 영향이 압도적이다.

그러나 이같은 분석에서 한가지 유의하여야 할 점은 본 연구의 면오염원에는 4,5종의 소규모 배출업소와 함께 차량오염까지 포함되어 있다는 사실이다. 이들의 배출은 분기별로 그리 큰 변화를 보이지 않으리라 예상되는데 1988년 서울의 연료소비 형태별 SO₂ 배출을 보면 난방이 67.1%인 반면 산업부문이 12.8%, 수송부문이 11.0%, 발전이 9.1%로 집계되고 있다 (환경청, 1989). 본 연구의 점오염원과 면오염원의 구분에 의하면 면오염원이 확실한 난방과 수송의 78.1%에 산업부문의 일부가 포함되어 전체 배출중 면오염원의 비중은 대략 80여%가 된다. 즉, 난방이 실시되는 1/4분기와 4/4분기에는 면오염원 배출의 상당부분이 난방연료 사용에 따른 SO₂ 배출인 반면, 2/4 및 3/4분기 면오염원 배출은 대부분 수송 및 소규모 배출업소로부터 비롯된 것으로 생각할 수 있다.

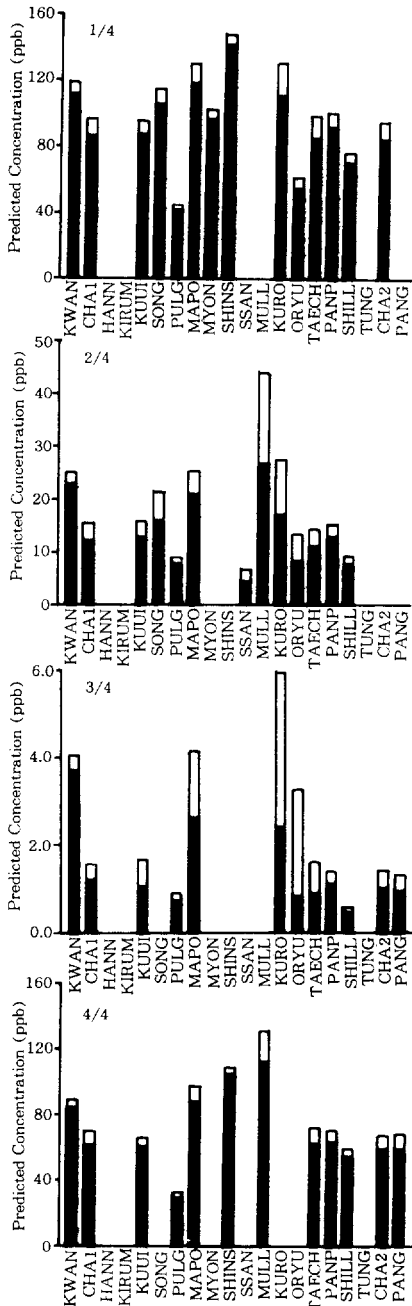


Fig. 7. Contributions of point (□) and area (■) sources to SO₂ concentration at monitoring sites. From left to right, names of monitoring sites are Kwanghwamun, Chamshil 1, Hannam, Kirum, Kuui, Songsu, Pulgwang, Mapo, Myonmok, Shinsol, Ssangmun, Mullae, Kuro, Oryu, Taechi, Panpo, Shillim, Tungchon, Chamshil 2, Panggi.

4.2 서울지역의 SO₂ 오염도 분포

그림 8은 가장 오염도가 높은 1/4분기와 오염도가 낮은 3/4분기 서울지역의 분기별 평균 SO₂ 오염도 분포를 조사한 그림들이다. 역시 계산치이므로 배경농도는 고려되지 않았으며 지형조건 역시 해수면을 가정한 결과이다. 어느 경우나 오염원이 밀집되어 있는 서남부의 오염도가 심함을 알 수 있다. 그 다음으로는 주로 바람의 방향을 따라 서울의 중심부인 광화문부터 신설동에 이르는 지역의 오염도가 높게 나타나고 있으며 1/4분기에는 반포를 비롯한 반포 서북서쪽으로도 고오염도 지역들이 형성되고 있다. 3/4분기에는 주풍이 북동풍인 가을에 서울 도심이 아닌 서남부 외곽쪽에 고오염도 지역이 치우쳐져 있다.

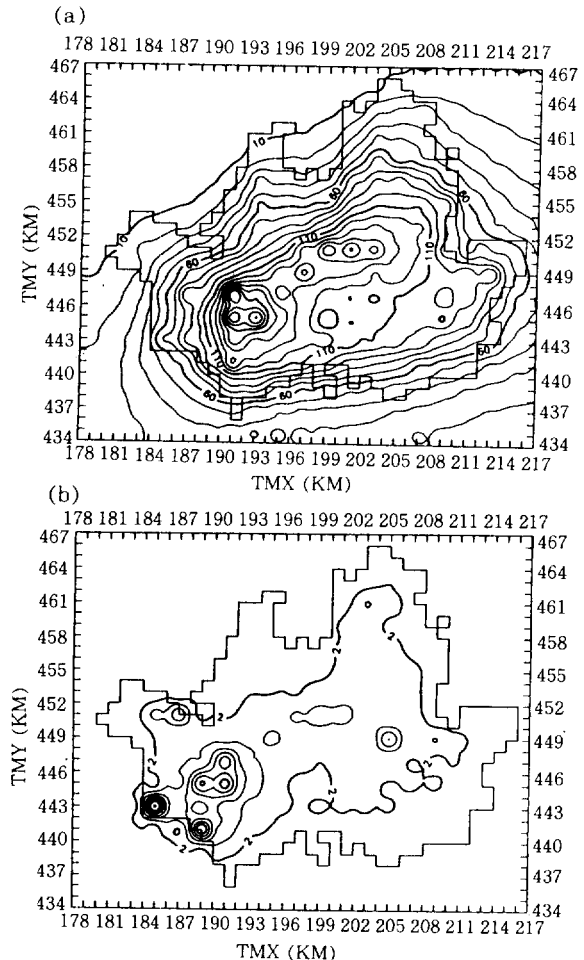


Fig. 8. (a) SO₂ distributions in ppb in the Seoul area in the first quarter of 1988.
(b) SO₂ distributions in ppb in the Seoul area in the third quarter of 1988.

5. 결 론

ISCLT를 이용하여 1988년 서울지역의 SO_2 오염도 분석을 시도하였다. 기존에 서울지역을 대상으로 하였던 Gaussian 모델의 적용시험에 비하여 본 연구의 시험에서는, 1) EPA 모델링 지침에 가능한 충실하였고, 2) 가장 범용성이 있을 뿐 아니라 도시지역에 적합한 McElroy-Pooler 확산계수를 사용할 수 있도록 개정된 ISCLT를 이용하였으며, 3) 측정치를 이용한 모델링 결과 검증을 보다 체계적으로 실시하고자 하였다.

가장 중요한 결론은 서울의 대기질을 모델링하기 위하여서는 설사 연평균 경향의 분석이 목적이더라도 최소한 분기별로 나누어 수행하여야 한다는 것이었다. 이는 분기별 기상 및 오염원 자료준비와 분기별 특성에 따른 모델링 변수의 조절들을 뜻하는데 본 연구에서 후자를 위하여 SO_2 의 반감기를 변화시켰다. 분기별 서울의 기상은 1/4 및 4/4분기의 안정된 대기조건과 낮은 혼합고, 2/4분기의 높은 일사량에 따른 비교적 불안정한 대기조건, 3/4분기의 많은 강수량들로 요약된다. SO_2 의 반감기는 분기별 강수량에 반비례하여 1/4분기 4시간, 4/4분기 2시간, 2/4분기 1시간 등이었다. 3/4분기의 반감기는 12분으로 나타났는데 강수량이 많은 이유도 있지만 이의 영향을 포함하여 오염원의 낮은 오염도를 Gaussian 모델로 예측하고자 한 때 다른 비현실적 결과로 생각되었다.

무연탄 기준 연간 연료사용이 1,000톤이상되는 약 300개의 배출업소를 대상으로한 점오염원 배출은 분기별로 별 차이가 없었으나 소규모 배출업소 배출과 가정용 연료사용, 차량오염을 포함하는 면오염원의 배출은 분기별로 심한 차이를 보였다. 난방 연료 사용에 따른 1/4분기와 4/4분기의 면오염원 배출증가가 크게 두드러졌으며 이에 따라 1/4 및 4/4분기의 SO_2 오염도는 확산에 불리한 기상조건과 결합되어 매우 높아지고 있었다. 지역별로는 서남부 오염원 밀집지역의 SO_2 배출이 두드러졌으며 이들은 북동풍이 주풍인 3/4분기를 제외하고는 서풍을 따라 도심쪽으로 확산되고 있었다.

ISCLT에 의한 분기별 서울지역 SO_2 모델링은 비교적 양호하여 측정치와 비교한 결과 연평균을 포함하여 기율기 0.9-1.0, 배경농도를 제외한 오차 평균은 절대값 6ppb 이하였다. 그러나 이같은 결과는 전체 20개 대기오염 측정망중 12-14개만을 대상으로 한 것이었다. 측정일수가 부족하여 분기별 평균오염도를 계산치 못한 지점은 어쩔 수 없는 일이지만 1/4분기의 쌍문동과 2/4분기의 등촌동, 3/4분기의

쌍문, 문래동, 4/4분기의 쌍문, 오류동 등은 모두 측정치와 계산치의 차이가 너무 커 제외하였던 점들이다. 문제가 되는 측정점들은 모두 서울 북동부 및 서부에 위치한 점들로 서울의 주풍인 서풍과 북동풍의 상류에 놓임에 따라 서울 외부의 오염원의 영향을 받는 것으로 추정되었다.

따라서 본 연구의 비교적 성공적인 결과에도 불구하고, 1) 서울 전역을 조사하기 위하여서는 최소한 서쪽과 북동쪽으로 모델링의 지역 범위를 넓혀야 하며, 2) 앞의 언급과 연관된 사항이나 서울지역내 오염원 이외의 원인에 의하여 발생하는 배경농도에 관하여서도 어느정도 정보를 가져야 한다는 등의 문제들이 남아 있다. 그리고 국내의 오염원자료들이 연단위로 집계되고 있기는 하나 분기별 구분은 1-3, 4-6월 식이 아닌 12-2, 3-5월 등으로 계절 구분과 일치시키는 방안도 고려되어야 한다.

〈 감 사 〉

본 연구는 청정 에너지정책 수립을 위한 동력자원부 출연연구사업의 일환으로 수행된 것입니다. 연구비를 지원하여 주신 관계당국에 감사하며, 연구진행에 필요한 자료를 제공하여 주신 국립환경연구원 나진균박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강인구, 김양균, 이석조, 나진균, 유승도, 김진규, 김정수, 박보현 (1988), "대기오염 예측모델 개발에 관한 연구 (III) — 수치모델을 중심으로," 국립환경연구원보, 10, 213-224.
- 김양균, 최덕일, 이민희, 조강래, 나진균, 정장해 (1985) "대기오염 확산모델 개발에 관한 연구," 한국대기보전학회지, 1, 53-70.
- 김영성, 경남호, 선도원, 조성호, 이태용 (1991), "에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발 (II)," 한국에너지기술연구소 연구보고서 KE-91049G.
- 나진균 (1990), "복잡한 지형에서의 대기오염확산 모델에 관한 연구," 박사학위논문, 인하대 응용물리학과.
- 박일수, 김정우 (1991), "서울지역 SO_2 농도분포에 미치는 지형의 영향," 한국대기보전학회지, 7, 105-113.
- 송동웅, 김현철, 김성주, 윤외숙 (1990), "서울시 지역별 대기오염도 분석평가 기초연구," 한국과학기술원 연구보고서 E1041-4047-6.

- 이덕길, 김양균, 나진균, 이석조, 유승도, 김진규, 김정수, 박보현, 김명식, 윤순창 (1987), "대기오염예측 모델개발에 관한 연구 (II)," 국립환경연구원 연구보고서 NIER No. 87-03-199.
- 전의찬, 김정욱 (1990), "대기오염 방지대책으로서 지역난방의 효과분석에 관한 연구," 한국대기보전학회지, 6, 51-56.
- 중앙기상대 (1988), 기상연보.
- 한국대기보전학회 (1990), "대기측정망과 환경기준," 대기보전 세미나, 국립환경연구원.
- 환경청 (1986), "전국환경보전 장기종합계획사업 종합보고서 (환경관리권별 계획)."
- 환경청 (1989), 한국환경연감.
- Bowers, J.F., Anderson, A.J., and Hargraves, W.R. (1982), "Tests of the Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model at the Armco, Middletown, Ohio Steel Mill," USEPA Publication No. EPA-450/4-82-006.
- Engineering-Science, Inc. (1983), "Draft Air Quality Sector Plan. Han River Basin Environmental Master Plan Project," Prepared for Office of Environment in Association with Hyundai Engineering Co. Ltd. and Hyosung Engineering and Construction Co. Ltd.
- Larsen, R.I. (1973), "An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reductions," J. Air Pollution Control Assoc., 23, 933-940.
- McRae, G.J. and Seinfeld, J.H. (1983), "Development of a second-generation mathematical model for urban air pollution — II. Evaluation of model performance," Atmospheric Environment, 17, 501-522.
- Nelson, A.C., Jr., Armentrout, D.W., and Johnson, T.R. (1980), "Validation of Air Monitoring Data," USEPA Publication No. EPA-600/4-80-030.
- U.S. Environmental Protection Agency (1986), "Guideline on Air Quality Models (Revised)," USEPA Publication No. EPA-450/2-78-027R.
- U.S. Environmental Protection Agency (1987), "Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model User's Guide — Second Edition (Revised)," Vol. I & II, USEPA Publication No. EPA-450/4-88-002a & 002b.
- Zannetti, P. and Tombach, I. (1986), "Critical Survey of Mathematical Models of Atmospheric Pollution Transport and Deposition," Report from AeroVironment, Inc., Monrovia, CA.