

도심지역에서의 풍속에 따른 SO₂ 농도변화

The Variation of SO₂ Concentration According to Wind Speed in Urban Area

羅 振 均*
Jin-Gyun Na

ABSTRACT

Recently, many studies on air quality prediction models have been performed to develop new ones. The purpose of the study is to obtain a method to predict SO₂ concentration simply in urban area using hour-to-hour meteorological data such as the wind speed, the incoming solar radiation, and the cloud coverages. The relationships between wind speed and SO₂ concentrations are plotted in figures. Predicted concentration curves are obtained for equation $C=b/(1+au)$.

1. 서 론

현재 대기오염 농도를 예측하는 방법으로 대기오염 확산 모델을 이용하는 것이 일반적이다. 대개의 확산 모델은 배출구로부터 나온 오염물질의 이동 경로나 운동 상태를 수식화하여 계산하고 있다. 그러나 주거지역이나 자동차 및 군소 업소와 같이 소량의 오염물질을 배출하는 배출원이 넓은 지역에 고루게 분포되어 있을 경우에는 모든 plume의 확산 농도를 계산하기란 불가능하다. 이러한 경우에는 대기를

단위 체적화하여 기류에 따라 이동하는 것으로 가정한 Box model이 적절하다.

또한 최근에는 여러 전문가들에 의해 기존 모델의 결함을 보완하기 위해 적용지역의 지형을 고려하는 등의 새로운 모델 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 그러한 노력의 한 부분으로써 배출된 오염물질은 순간적으로 고루 확산되어 평형 상태를 이룬다고 가정하고 SO₂ 실측농도와 시간별 기상자료를 이용하여 기상 조건에 따라 SO₂ 농도가 변화하는 상태를 관찰하였다.

* 국립환경연구원(Air Quality Reseach Dept., National Institute of Environmental Research)

2. 연구방법

본 연구에서는 서울 광화문에 설치된 대기오염 측정소의 SO₂농도와 중앙기상대 서울측후소의 시간별 기상자료를 이용하였다. 조사대상 기간은 1986년 7월부터 1989년 4월까지로 하였으며, 대상 시간은 최고 농도 발생 시간(아침)과 최저 농도 발생시간(낮)으로 구분하여 5월부터 9월까지는 6, 7, 8시와 14, 15, 16시, 그리고 10월부터 4월까지는 7, 8, 9시와 15, 16, 17시의 자료를 각각 택하였으며 각 3시간의 평균농도를 이용하였다. 결측치를 제외한 이들의 총자료수는 아침 778개, 낮 819개이다.

광화문 지역만을 택한 이유는 비교적 오염도가 심한 도심에 위치하고 특히 기상자료의 수집이 용이한 중앙기상대로부터 약 1km 밖에 떨어져 있지 않으므로 기상조건을 동일시 할 수 있기 때문이다. 자료의 분석은 4년간의 계절별로 분류하여 시행하였으며 본 연구에서는 겨울은 12, 1, 2월, 봄은 4월, 여름은 7월, 그리고 가을은 10월로 하여 제시하였다. 동절기에 SO₂는 고농도 값을 보이므로 3개월을 모두 택하여 분석하였다.

2.1 SO₂ 배출량

SO₂ 농도에 직접적인 영향을 주는 연료 사용량을 계산하므로써 월별 배출량의 정량화를 시도하였다. 대기 환경 기준 6개 항목중 SO₂만을 택한 이유는 그의 생성 메카니즘이 명확하고 배출량 산정이 용이하기 때문이다.

서울시 통계 연보와 서울시청 자료 및 환경청 대기 배출시설 설문 조사표를 분석하여 년도별, 배출원별 SO₂ 배출량을 산정하였다. 이에 적용된 SO₂ 배출계수는 미국 환경청의 자료를 사용하였으며 연탄은 국내에서만 사용되

는 특수성을 감안하여 무연탄에 대하여 국립환경연구원에서 구한 값 10.9kg/ton을 적용하였다.¹⁾ 연료의 사용량 및 SO₂ 배출량을 나타낸 표1을 보면 가정용 연료인 무연탄의 배출기여율이 60% 이상의 높은 비중을 차지함을 알 수 있다. 각 연료의 사용량을 면·점·선 오염원으로 구분하여 각각의 기여율을 표2에 나타내었다. 서울 전역에 고루 산재해 있는 면오염원의 기여율이 80%를 상회함을 알 수 있으며, 여기서 점 오염원은 환경청 대기 배출 시설 3종 이상의 대형업소이고, 기타 모든 소형배출업소는 면오염원에 포함시켰으며 자동차 등의 이동 오염원은 선 오염원으로 정하였다. 이들의 계산은 羅振均等(1986-1988)^{2,3,4)}에 상술된 내용을 참조하였다.

월별 SO₂ 배출량을 산정한 표3을 살펴보면 겨울철(12, 1, 2월)이 연간 배출량의 약 46%를 차지하며 여름(6, 7, 8월)의 약 8%에 비해 약 6배 가량된다. 이는 광화문 측정소에서 실측한 SO₂농도(표4)의 경우에 겨울철의 평균농도는 144ppb로써, 여름철 평균 농도 18ppb의 약 8배가 되어 계산된 배출량의 경우와 비교해 약간의 차이가 있다. 그 이유는 하절기의 많은 강수 현상에 따른 오염도 감소와 하절기에 비해 동절기의 혼합고도가 낮거나 기타 요인때문으로 생각되지만 계산된 SO₂ 배출량과 실측농도와의 추세변화 관계는 잘 일치하고 있다.

2.2 기상자료

풍속은 오염농도 측정시간 보다 1시간 앞의 값을 택하였다. 이는 SO₂ 농도가 풍속 이외에도 대상 도시의 면적과 측정소의 위치등에 큰 영향을 받기 때문이다.⁵⁾ 측정소가 도시 중앙

Table 1. Fuel consumption and SO₂ emissions in Seoul

Fuels	'86			'87			'88		
	Consumption (x10 ³)	Emission (ton)	Share (%)	Consumption (x10 ³)	Emission (ton)	Share (%)	Consumption (x10 ³)	Emission (ton)	Share (%)
Briquet (ton)	9,108.1	99,279	63.3	8,728.4	95,140	63.4	8,232	89,729	60.0
Gasoline (kl)	629	291	0.2	817	378	0.3	1,084	502	0.3
Kerosene (kl)	474	2,417	1.5	476	2,428	1.6	542	2,764	1.9
Diesel (kl)	2,278	14,083	9.0	2,129	14,477	9.7	2,394	16,279	10.9
B-C Oil (1.6%) (kl)	1,278	38,851	24.8	1,191	36,206	24.1	1,226	37,270	24.9
B-C Oil (0.3%) (kl)	319	1,818	1.2	242	1,379	0.9	524	2,987	2.0
LPG (ton)	210	0	0	253	0	0	303	0	0
City Gas (ml)	85,618	0	0	73,283	0	0	141,255	0	0
Total		156,738	100		150,008	100		149,531	100

(from Seoul Metropolitan Government)

Table 2. Distribution of SO₂ emissions in Seoul

Source	(unit : %)		
	1986	1987	1988
Area	83.2	82.8	80.3
Line	3.2	4.3	5.3
Point	13.6	12.9	14.4

에 위치할 때 풍향에는 별 영향이 없으며 면적이 넓을수록 풍속에 의한 영향은 늦게 나타난다.

다.

이를 설명한 그림1에서 서풍이 3m/sec로 불 때, S₁ 지점에서는 풍속에 의한 영향이 즉시 나타나고 S₂에서는 약 1시간 후에 나타나게 된다. 이는 도시외부에서 유입된 공기가 S₂까지 도달하는데 걸리는 시간에 해당된다. 서울은 반경 약 10km의 원형이며 광화문 측정소는 그의 중앙에 위치한다고 간주할 수 있다. 그리고 1986년부터 1988년까지 3년간의 서울의 월

Table 3. Monthly SO₂ emission amount in Seoul

(unit:ton)

Month	1986		1987		1988	
	Emission	Share (%)	Emission	Share (%)	Emission	Share (%)
1	25,517	16.28	24,302	16.20	24,000	16.05
2	23,135	14.76	22,066	14.71	21,772	14.56
3	17,022	10.86	16,246	10.83	16,104	10.77
4	10,611	6.77	10,171	6.78	10,198	6.82
5	6,677	4.26	6,420	4.28	6,549	4.38
6	4,185	2.67	4,065	2.71	4,262	2.85
7	3,683	2.35	3,585	2.39	3,798	2.54
8	4,263	2.72	4,140	2.76	4,366	2.92
9	6,442	4.11	6,210	4.14	6,356	4.25
10	13,401	8.55	12,856	8.57	12,740	8.52
11	17,805	11.36	17,041	11.36	16,807	11.24
12	23,997	15.31	22,906	15.27	22,579	15.10
Total	156,738	100	150,008	100	149,531	100

Table 4. Observed SO₂ concentration at Kwanghwamun air quality monitoring station

(unit:ppb)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
'86	-	-	-	-	-	-	25	-	40	60	145	153
'87	158	-	-	36	9	-	12	13	32	75	140	173
'87	146	131	98	70	37	19	16	17	21	64	115	147
'89	130	117	69	51	15	25	21	13				
Average	144		48			18			77			*

- : missing data

* : included in winter

평균 풍속은 2.5m/sec이었다. 따라서 외부에서 유입되는 공기가 도심에 도달하는데는 약 1시간이 걸리게 된다. 또한 환경보전법에서 대기 환경기준으로 1시간 평균치를 택하고 있는 질소산화물, 탄화수소 및 옥시단트 등의 자료를 측정소별로 비교할때 이러한 시간지연(time lag)의 영향을 받는지 고려할 필요가 있다.

한편 다음절에서 설명이 되겠지만 풍속이 약

2m/sec 이하일때 SO₂농도는 이와는 무관하고 대기 안정도에 더욱 큰 영향을 받는다. 따라서 풍속에 따른 SO₂ 농도 변화 관계 뿐만 아니라 대기 안정도와 관계도 고려하였다.

SO₂ 농도를 풍속과 안정도에 따른 변화와 연관시키기 위하여 Pasquill-Gifford가 제시하였던 대기 안정도 분류 방법⁶⁾과 유사하게 5가지 경우를 설정하였다. 먼저, 최대 농도가 발

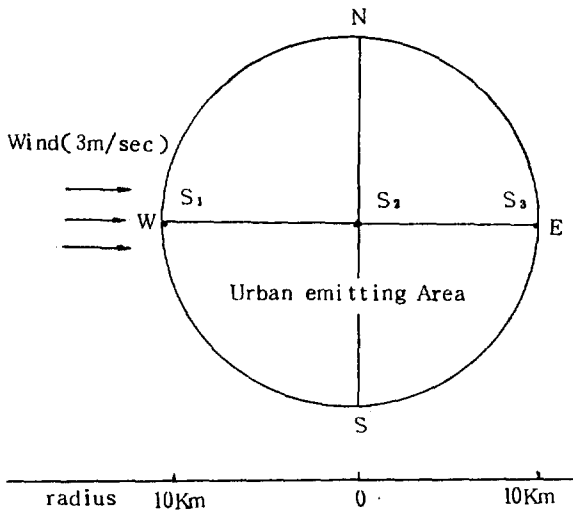


Fig.1 Affection of the siting of Air quality monitors and the extent of the urban area. S_1 is immediately affected with wind speed, S_3 is affected after 2 hours, and S_2 is after 1 hour. When wind direction inverse, cases of S_1 and S_3 are changed each other.

생하는 시간대인 일출 전후는 일사량은 거의 무시되고 야간의 안정도가 지속되기 때문에 고층운을 제외하고 하층운과 중층운을 고려한 전운량을 10등분하여 4/10 이하인 경우, 5/10 이상인 경우로 나누었고, 최저 농도가 발생하는 시간대인 오후에는 일사량을 강·중·약의 세 가지 경우로 다음과 같이 구분하였다. 13~15시 사이의 최대 일사량이 $2\text{MJ/hr} \cdot \text{m}^2$ 이상일 경우는 '강', $1\sim 2\text{MJ/hr} \cdot \text{m}^2$ 의 경우는 '중', $1\text{MJ/hr} \cdot \text{m}^2$ 이하는 '약'으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

기상 인자 가운데 대기오염 농도에 가장 많은 영향을 주는 풍속과 SO_2 농도와의 관계를 구하였다.

이와 관련된 관계식으로는 다음의 두식^{7,5)}이 일반적이다.

$$C = \frac{b}{(1+au)} \quad (1)$$

$$C = AQu^B \quad (2)$$

여기서,

C : 오염농도

u : 풍속

a, b : 매개변수

A : 지수 (0 ~ -1)

B : 대기 안정도에 따른 상수

Q : 오염물질 배출률

위의 식(1)은 오염농도는 풍속의 역수에 비례함을 나타내고 있으며, 식(2)는 box model에서 사용된 식으로써 Hanna등 (1971)⁸⁾은 지수 B의 값으로 -1을 적용하였으나 Benarie, (1978, 1980 a, b)^{9,11)}는 도시지역에서는 그의 부적합함을 지적하여 0~-1 사이의 값을 보임을 주장하였다(1980 b).¹¹⁾

지수 B의 값은 도시의 면적, 측정소의 도시내 위치 그리고 advection에 대한 수직 확산강도에 영향을 받는다. 극한의 예로써⁷⁾, 무한히 넓고 배출원이 없는 평지에서는 box model에서와 같이 -1이 되고 일정한 배출원으로부터 고른 지표 농도를 나타내는 매우 넓은 곳은 풍속에 거의 영향을 받지 않고 0에 가깝게 된다.

본 연구에서는 SO_2 농도와 풍속과의 상관성을 검토(표5참조)하여 더 좋은 결과를 보인 식(1)을 채택하였다. 식(1)은 다음의 형태로 변형이 된다.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{b} + \frac{a}{b}u \quad (3)$$

이는 농도 C의 역수에 대한 직선 회귀식이

Table 5. Correlation coefficient (R) between wind speed and a,b values for Seoul SO₂

	Winter					Spring		Summer		Fall	
	daytime	insolation	nighttime	condition	April		July		October		
	strong	moderate	slight	cloudless	cloudy	morning	afternoon	morning	afternoon	morning	afternoon
a	0.374	-0.341	2.298	-3.105	-3.252	-4.291	0.110	-2.649	1.717	-3.537	0.910
b	0.091	-2.710	0.614	-0.746	-0.967	-0.327	0.015	-0.048	0.055	-0.278	0.067
(A) Correlation Coeff.(R)	0.542	0.788	0.750	0.853	0.616	0.633	0.147	0.475	0.266	0.729	0.642
a	1.381	-30.813	1.454	-1.979	-2.691	-7.667	0.101	-0.633	0.236	-1.077	1.504
b	0.281	-5.812	0.445	-0.477	-0.809	-0.705	0.023	-0.0042	0.027	-0.059	0.118
(B) Correlation Coeff.(R)	0.955	0.963	0.972	0.990	0.979	0.805	0.772	0.664	0.791	0.944	0.978
(C) (R')	-0.975	-0.987	-0.960	-0.960	-0.919	-0.887	-0.621	-0.650	-0.852	-0.925	-0.938

(A) is obtained from all raw measurements of SO₂ and wind speed, (B) is from averaged SO₂ concentration and wind speed category for Eq. (1), (C) is correlation coefficient using the same data of (B) for Eq. (2).

며 a와 b는 최소 자승법에 의해 결정된다. 식 (3)으로 얻은 각 경우의 풍속에 따른 예측농도를 그림 2~11에 곡선으로 나타내었다. 그림 2~6을 겨울철에 대한 것으로 앞에서 언급한 5가지 경우로 나누어 표시한 것이며, 그림 7~11은 4, 7, 10월의 것으로서 단순히 오전과 오후로 구분하여 제시한 것이다.

그림 2~11에 풍속과 SO₂ 농도와의 관계를 나타내었다. 그림에서 막대 그래프는 풍속대별 평균농도를 표시한 것이며 실선으로 표시한 곡선(A)는 모든 data에 대하여 식(1)을 이용하여 구한 풍속에 대한 SO₂ 농도이다. 이 경우 농도 값이 한곳에 밀집(그림4)되어 있거나 전반적으로 낮은 농도(외부에서 유입되는 공기의 SO₂ 농도와 큰 차이가 없을 때)가 나타나는 경우에는 낮은 상관성을 보이며, 특히 4월 및 7월의 오후(그림8, 9)는 상관계수(R)가 각각 0.147과 0.266으로 매우 낮게 나타났다.

이러한 경우를 보완하기 위해 풍속대별 평균 농도를 계산하여 (A)와 같은 방법으로 구한 값을 점선 (B)로 표시하였다.

(A)와 (B) 경우의 상관계수 (R)와 매개변수 a, b의 계산값을 표 5에 나열하였다. 모든

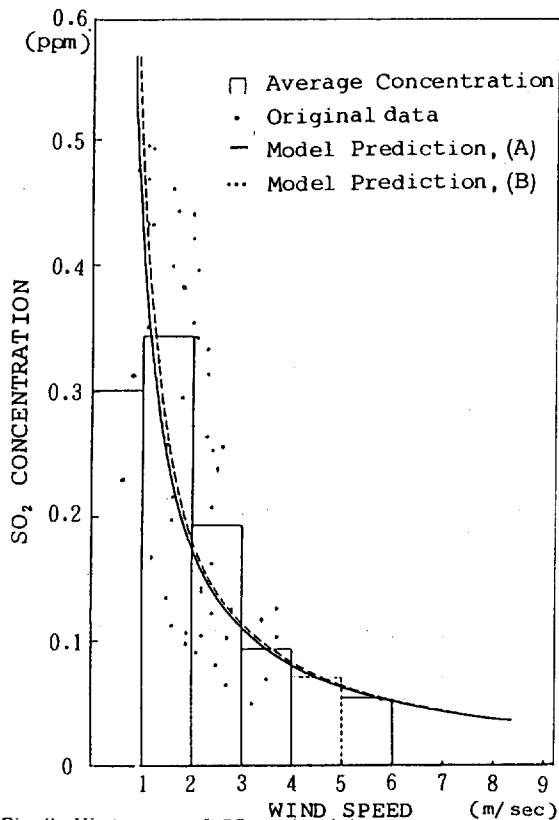


Fig.2 Histogram of SO₂ concentration against wind speed category for the cloudy morning in winter, Dec.1986~Feb.1989.

All figures also include raw SO₂ measurements and regression model output for Eq. (1). Model prediction curve(A) is obtained from all raw data and (B) is from averaging concentration against wind speed category

(A)의 경우보다 (B)의 경우에서 높은 상관성을 보였으며 특히 운량이 적은 겨울의 오전에는 0.990의 매우 높은 상관값을 보였다. 또한 식(2)를 이용하여 구한 상관계수(R')를 표 5의 (C)에 나타내었다.

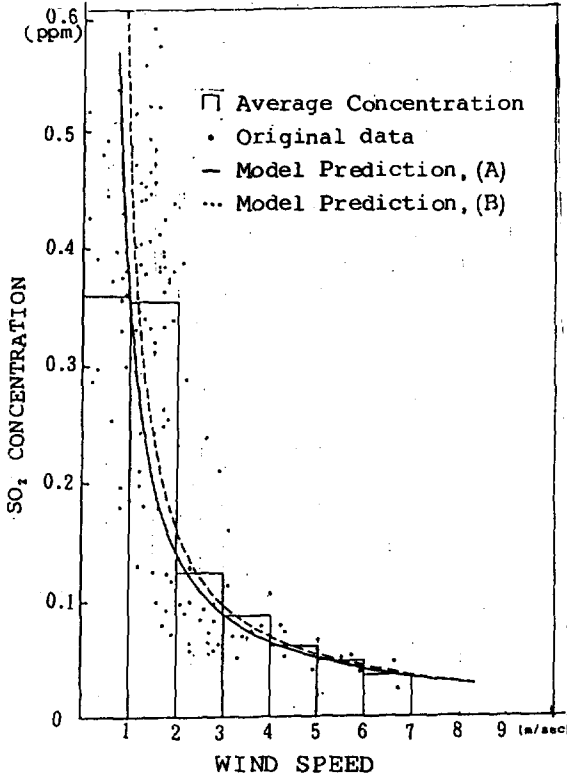


Fig.3 Same as Fig.2 but for the cloudless morning in winter.

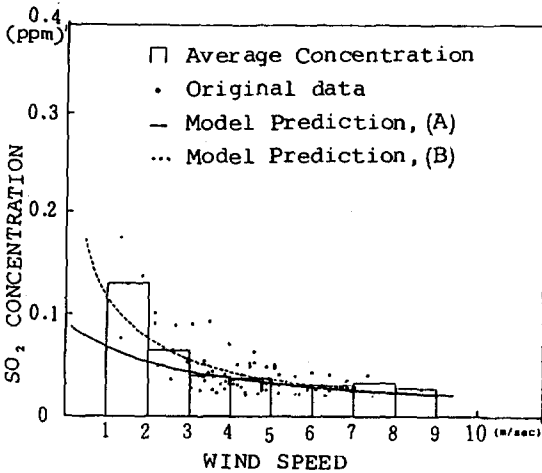


Fig.4 Same as Fig.2 but for the strongly insulated afternoon in winter.

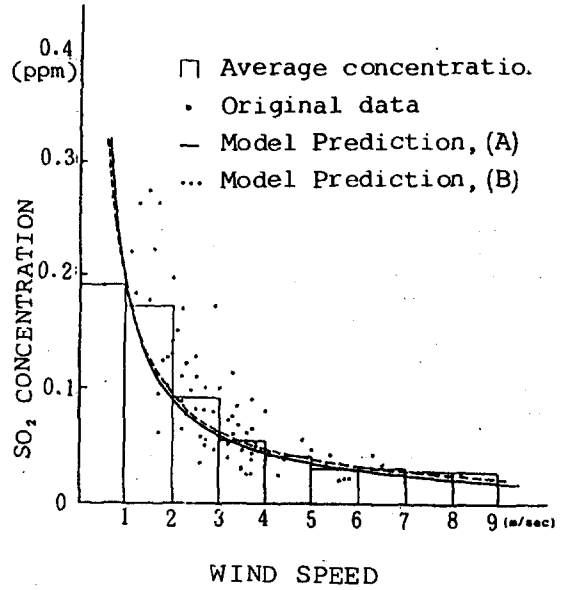


Fig.5 Same as Fig.2 but for the moderately insulated afternoon in winter.

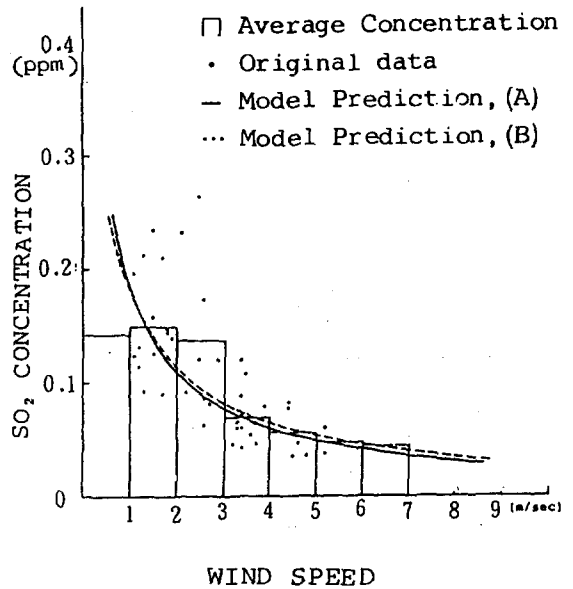


Fig.6 Same as Fig.2 but for the slightly insulated afternoon in winter.

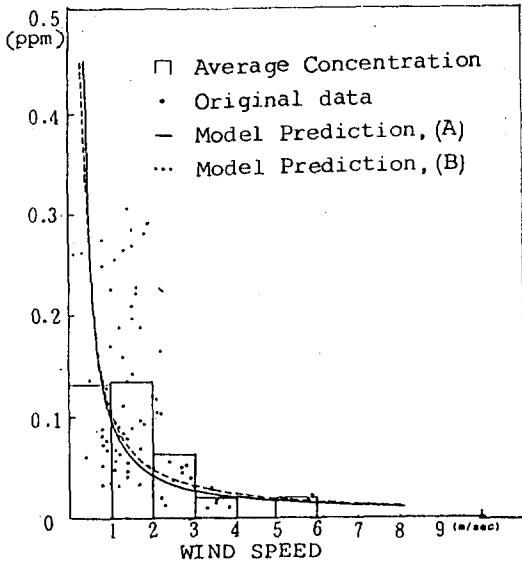


Fig.7 Same as Fig.2 but for all morning data in April, 1987 ~ 1989.

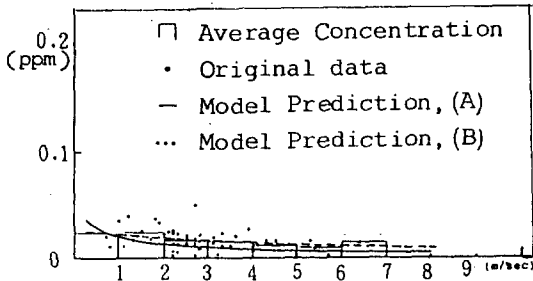


Fig.9 Same as Fig.2 but for all morning data (below), and for afternoon (upper) in July, 1986 ~ 1988.

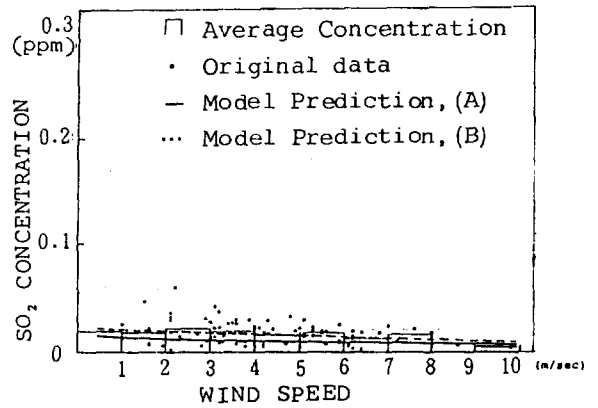


Fig.8 Same as Fig.7 but for afternoon

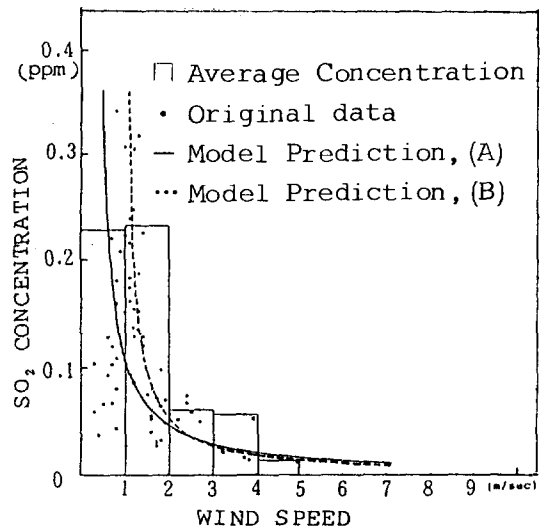


Fig.10 Same as Fig.2 but for all morning data in October, 1986 ~ 1988.

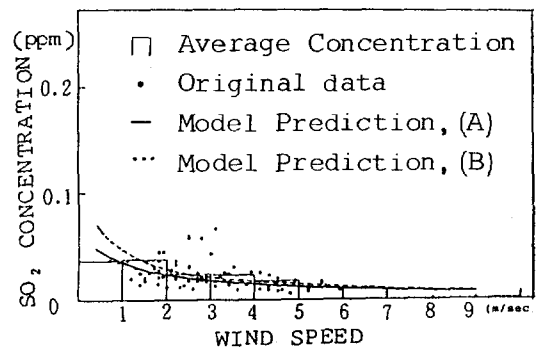
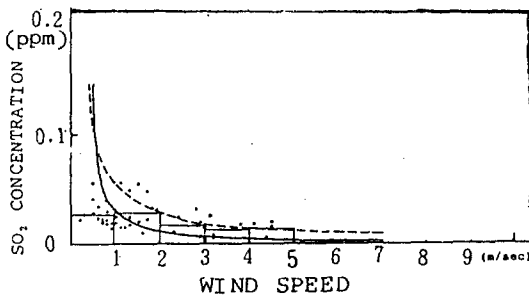


Fig.11 Same as Fig.10 but for afternoon.

5. 결 론

오염 농도는 풍속이 증가함에 따라 역수에 비례하여 감소함을 보였다. 광화문 지역에서 풍속, 운량, 일사량을 알 수 있을 경우 SO₂ 농도를 예측할 수 있는 매개 변수 a, b가 계산되었다.

풍속대별 평균농도와 풍속과의 관계를 그림 2~11에 점선으로 표시한 (B)의 경우에서 높

은 상관성을 보였으며 특히 오염도가 심한 겨울철의 경우에는 더욱 높은 상관계수를 보였다.

따라서 SO₂ 농도와 풍속과의 관계식 $C=b/(1+au)$ 를 이용하여 광화문에서의 SO₂ 농도 변화에 대한 단순한 예측이 가능하며, 지속적인 연구가 필요하지만 다른 오염물질 또는 다른 지역에서도 매개변수 a, b를 구하여 확장 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

(원고접수 '89. 9.19)

参 考 文 献

1. 金良均 外(1984), 主要大都市 大氣污染 排出源別 汚染物質 排出負荷量 算定에 관한 研究, 國立環境研究所.
2. 羅振均 外(1986), 大氣污染度 豫測技法 開發에 관한 研究(I), 國立環境研究院, NIER No. 86-09-175.
3. 李德吉 外(1987), 大氣污染 豫測모델開發에 관한 研究(II), 國立環境研究院, NIER No. 87-03.
4. 姜寅求 外 (1988), 大氣污染 豫測모델開發에 관한 研究(III)-數值모델을 중심으로-, 國立環境研究, NIER No. 88-07-232.
- 5) A.J. Jakeman, Bai Jun and J.A. Taylor (1988), On the variability of the wind speed exponent in urban air pollution models, Atmospheric Environment, Vol.22, No.9, 2013-2019.
- 6) F.A. Gifford, Jr. (1961), Use of routine meteorological observations for estimating Atmospheric dispersion, Nuclear Safety, Vol.2, 47-51
- 7) F.L. Ludwig and J.H.S. Kealoha (1975), Selecting for CO monitoring - Final Report, Environmental Protection Agency, Contract No. 68-02-1471, Report No. EPA-45013-75-077
- 8) S.R. Hanna (1971), A Simple method of calculating dispersion from urban sources, J. Air Pollution Control Ass., 21, 774-777
- 9) M.M. Benarie (1978), The simple box model revisited, Atmospheric Environment, 12, 1929-1930
- 10) M.M. Benarie (1980a), The simple box model simplified, In Air Pollution 1980, Prof. Int. Colloq., Paris, 5-8 May, Studies in Environmental Science, Vol.8.
- 11) M.M. Benarie (1980b), Urban Air Pollution Modelling, pp.143-146, MacMillan, London,