

都市型 大氣汚染 모델링에 관한 研究

白南浩·李英馥

한국에너지연구소 환경연구실

(접수 1981. 10. 10)

Studies on Urban Air Pollution Modelling

Nam Ho Baek and Young Bok Lee

Environment Division

Korea Advanced Energy Research Institute

(Received; October 10, 1981)

요 약

1976년 이래 서울특별시 동북부 번두리지역의 한 지점(한국에너지연구소)에서 대기중의 아황산가스 농도를 연속측정한 결과를 정리하여 종합분석하였다. 대기중에 배출되는 오염물질의 확산은 기상학적인 특성과 지형적 인자와 밀접하게 관련되어있다. 아황산가스의 경우 기온의 역전현상이 심화됨에 따라 혼합효과가 크게 감소되며 확산이동거리는 매우 길어서 발생원으로 부터 5~20 km 지점에서 지표면 최고농도를 나타내게 된다. 대기혼합높이는 일사량, 풍속의 변화에 따라 변하며 일출시에 가장 낮고 오후시간에 가장 높아지게 된다.

대기오염도는 일출후 한 두시간경에 일최고치를, 그리고 일몰직전에 일최저치를 나타낸다. 임의 관측 지점에서의 기상학적 인자와 발생원에 대한 지형적 특성을 고려하여 년 평균농도를 추정하는 관계식 $\chi = 55(F/S)^{0.58} \left(\frac{r \cdot Q}{U} \right)$ 이 성립하였다.

ABSTRACT

The sulfur dioxide concentration has been measured in the outskirts of Seoul (KAERI) since 1976, and the accumulated data have been statistically analyzed to modify the simple urban air pollution model developed by Gifford and Hanna.

The dispersion of the effluents in the air depends on the meteorological characteristics and topographical factors in an area. The sulfur dioxide concentration increases due to decreases in the mixing effect of the atmosphere in accordance with the deepening of the inversion and

may travel over 5 to 20 km from the source. The mixing height is usually lowest before sunrise and highest in late afternoon, while the concentration of sulfur dioxide peaks at about 1 or 2 hours after sunrise and is lowest before sunset.

The modified urban air pollution model, $\chi(\mu\text{g}/\text{m}^3) = 55(F/S)^{0.58} \left(\frac{r \cdot Q}{U} \right)$ seems to give a correct prediction of annual average concentration from the two meteorological factors, wind direction and the frequency of calm. It was also assumed that the predominant emission sources are located in the west to southwest region of Seoul.

1. 서론

대도시에 널리 분포되어 있는 많은 수의 점오염원과 선오염원으로 부터 확산되는 대기오염물질의 농도를 예측하는 방법은 Gifford & Hanna¹⁾에 의해 1970 년도에 개발되었다. 이는 Halliday & Ventner²⁾의 매우 복잡한 수치해석에 의해 농도는 단위면적당의 오염배출속도에 비례한다는 사실로부터 유도되었다. 대기오염물질의 장기간 평균치에 관한 예측에 일반적으로 간단한 모델 $\chi = cQ/U$ 이 사용되어왔다. 비례상수 c 는 $(2/\pi)^{0.5} x^{1-b} [a(1-b)]^{-1}$ 로 표현되며 a, b 는 수직확산거리 $\sigma_z = ax^b$ 와 같은 관계가 있으며 대기안정도에 따라 다르다.³⁾ 또한 Garnett⁴⁾는 주요오염원의 위치와 풍향 및 풍속의 관계, Anticyclone과 같은 고기압권내에서의 대기안정도등에 따르는 대기오염 분포상태를 분석·보고하였다. 실제로 Los Angeles의 일최대 일산화탄소량을 예고하는데 주변과의 기압차, 지표면의 온도, 일조시간, 일사량을 변수로 사용하고 있다.⁵⁾ 오염발생지역에 수직확산높이를 포함한 일종의 상자형 모델(Box Model)인 $\chi = cQ/U$ 중 비례상수 c 는 많이 조사되었으나,^{1,2,3)} 특정 대상지역의 오염발생면적과 기상조건에 따라 크게 다르며 실제 측정치와 상당한 차이(2~3배)를 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 대기중에 배출되는 오염물질(아황산가스)의 확산분포는 미기상학적인자와 지형적 상호특성에 의존한다는 사실에 따라 위의 도시형 모델을 서울시 동북부 변두리지역에서 5년동안 측정기록한 자료와 서울시 기

상자료를 가지고 광범위한 지역에 적용가능토록 변형하였다.

2. 실험방법

고순도의 증류수($2\mu\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) 20 liters에 3.4 ml의 35% H_2O_2 (Merck Reagent, GR)과 10ml의 0.1N H_2SO_4 (S.P.C. Reagent, GR)을 첨가하여 전기전도도가 $40\mu\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 정도인 흡수액을 만들었다. Fig. 1의 연속측정기기(DKK SO_2 Analyzer, Model GR-3C-2)의 유통도를 보면 시료공기는 Carbon Filter를 통과한 후 Rotameter에 의해 1 liter/min로 20 ml 흡수액이 있는 Measuring Impinger에 한시간동안 공급된

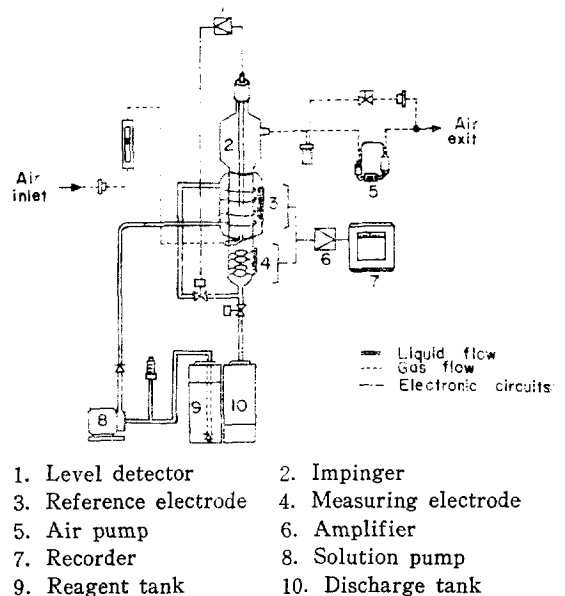


Fig. 1. Flow diagram of SO_2 analyzer

다. 시료공기중의 주된 산성가스인 아황산가스는 과산화수소에 의해 산화되어 황산을 만든다. 생성된 황산에 의해 반응액의 전도율은 증가된다. Impinger 에 시료공기를 흡수시키면 반응액이 약간 증발하면서 증발열을 빼앗아가고 흡수액과 시료공기의 온도차에 의해 측정전극간의 반응액의 온도와 기준전극간의 흡수액의 온도가 다르기 때문에 측정오차를 유발하게 된다. 이를 상쇄시키기 위해 Impinger 를 이중구조로 하여 두 전극사이의 열교환이 가능토록하여 두 흡수액의 온도를 동일하게 하였다. 반응액의 전도율 측정최로는 4 전극법을 사용하여 분극현상을 최소화함으로써 줄이고 측정정밀도($\pm 0.005\text{ppm}$)를 높이며 조작성이 용이하도록 되어있다. 측정원리를 간단히 살펴보면 두 전극에 각각 2개씩의 전류전극을 두어 일정한 교류전류를 흐르게 하고 전극간의 저항차에 의해 전압이 발생하게 된다. 전압차는 증폭기에 입력되어 그 출력에 의해 평형전동기가 작동하도록 되어있다. 이때 흐르는 전류는 증폭되고 ppm 농도로 환산기록된다. 측정범위는 0.0~0.2, 0.0~0.5, 0.0~1.0 ppm 의 3 단계로 되어 있으며 자동적으로 Scale Monitoring 이 되도록 설계되었다. 시료공기의 유량은 Wet Testmeter 에 의해서 그리고 반응액의 검량은 0.01 N H₂SO₄(S.P.C. Peagent, GR)에 의해 매달 1회씩 정기적으로 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 총배출량의 추정

아황산가스의 발생원은 80% 이상이 연료연소에 있으며 그 대부분이 고정성 발생원이다. 서

울특별시외의 연료사용량과 아황산가스 배출량은 Table 1 과 같다. 국내에서 사용되는 무연탄의 유허합량은 0.4%이며 아황산가스의 배출계수(Emission Factor)는 무연탄 1 ton 당 약 5 kg 이다.⁷⁾ 유류중 유허분이 0.1%정도로 낮은 휘발유와 등유를 제외하고 자동차 연료에 많이 사용되는 경유(유허분: 1%)는 1 kl 당 17 kg, 공장이나 발전소에서 사용되는 병커유(유허분: 4%)는 1 kl 당 76 kg 의 아황산가스를 배출한다.⁸⁾ 서울시에서 수집된 연료사용량은 국내현실을 고려할 때 실제 사용량외에 비축량 등 가수요도 포함되어 있어서 연료사용량과 당해년도의 오염도와 연관짓는 데는 약간의 문제가 있으며, 1976

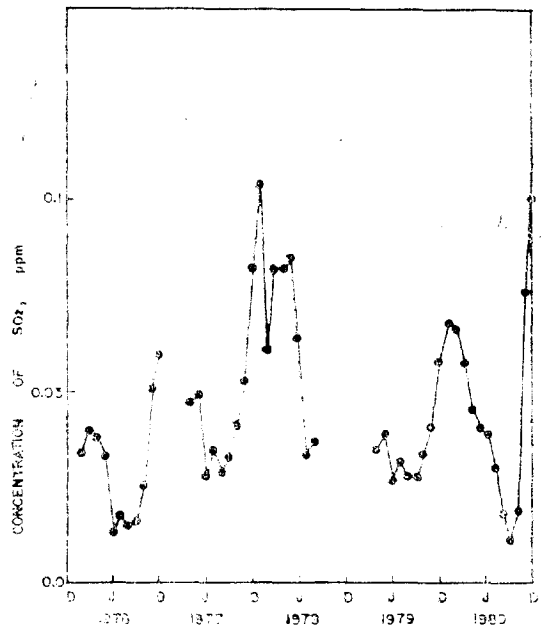


Fig. 2. Annual variations of monthly mean SO₂ concentrations from Feb. 1976 to Dec. 1980 at KAERI

Table 1. 서울시의 연료 사용량과 아황산가스 배출량

연도	연료 (x 10 ⁶ kl)	경유 (x 10 ⁶ kl)	병커유 (x 10 ⁶ kl)	합계 (x 10 ⁶ kl)	무연탄 (x 10 ⁶ Tons)	SO ₂ 배출량 (x 10 ³ Tons/Yr)
1976	0.74	1.32	2.64	6.9	147.4	
1977	0.9	1.6	3.2	7.4	173.9	
1978	1.05	1.95	3.81	7.3	202.6	
1979	1.14	2.01	4.17	6.8	206.1	
1980	1.29	1.99	3.81	7.4	210.2	

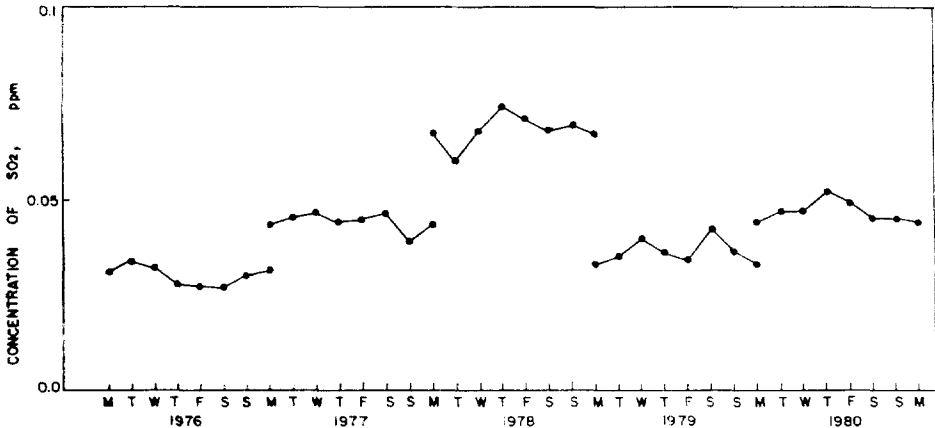


Fig. 3. Weekly cycle of daily mean SO₂ concentration from 1976 to 1980 at KAERI

년, 1977년에는 유증별 자료정리가 되어 있지 않아 총배출량을 계산하는 데 최근 3년간의 평균 유증비로 추정하였다.

측정된 자료를 전체 배출량의 50%를 차지하고 있는 난방시설이 운전되는 추운 철(11월~4월)과 따뜻한 철(5월~10월)로 대별하여 일변화, 요일변화, 월변화를 고찰해 보았다. 본 측정지점 주위에는 고농도의 아황산가스를 배출하는 큰 공장이 없음을 고려한다면 주로 주변의 가정난

방에 의한 배출만이 주원인이라 생각되나 Fig. 2에서 보면 따뜻한 철에도 0.010~0.085 ppm의 높은 농도를 나타냈다. 자동차에 의해 배출되는 아황산가스의 양은 비교적 적지만 배기가스에 의한 Thermal Turbulence와 통행에 의한 Mechanical Turbulence에 의해 높은 농도로 도로위에 놓인 긴 Box형의 선오염원을 형성한다. 간선도로로부터 상당히 떨어진(약 1km) 본 측정지점에는 큰 영향을 끼치지 않으며 Fig. 3의 요일변화에서도 주말의 뚜렷한 감소현상을 발견할 수 없다. 한편 높은 공장굴뚝(40~60m)에서 배출되는 대기오염물질은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 대기확산조건에 따라 5~20km 지점에서 지표면 최고농도를 나타낸다. 결국 반경 11km인 서울시 전지역을 하나의 Box Model로 보면 공장굴뚝의 점오염원, 자동차의 선오염원, 가정난방등의 면오염원에서 배출되는 모든 오염물질은 바람방향에 따라 이동할 것이다. Ronneau⁹⁾는 일반적으로 풍향이 오염된 대기의 발생원을 파악하는 데 좋은 자료가 된다고 했다. 서울시

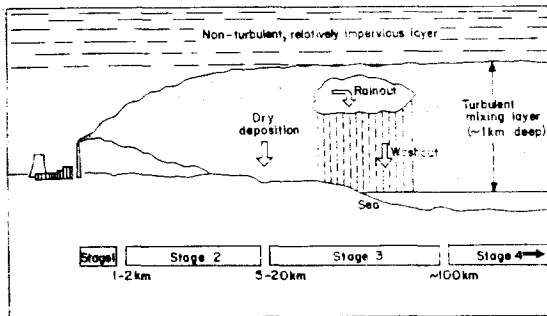


Fig. 4. The four main stages of chimney-plume dispersion are shown schematically.

Table 2. 서울시의 기상관측 자료

기상학적인자	평 균 풍 속 (m/sec)	남풍과 서풍사이의 풍향출현빈도수(%)	정온발생빈도수(%)	연간일사량 (Kcal/cm ²)
1976	2.5	27.3	7.2(1.21)	100.8(1.0)
1977	2.3	33.5	7.1(1.20)	101.3(1.0)
1978	2.4	38.4	8.4(1.41)	96.4(0.95)
1979	2.5	40.3	3.2(0.54)	103.0(1.02)
1980	2.7	48.8	3.8(0.64)	104.0(1.03)

* 괄호안의 숫자는 각 인자의 5년 평균치에 대한 비율이다.

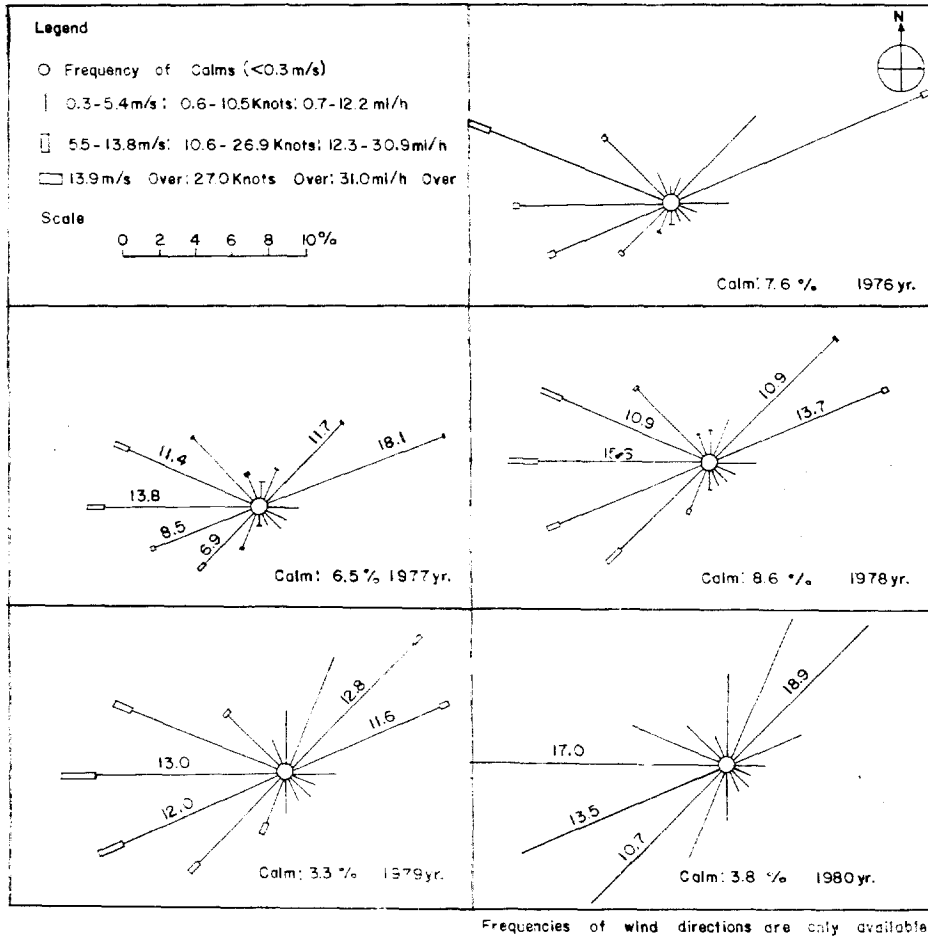


Fig. 5. Annual surface wind roses in Seoul

경우 주발생원인 당인리 발전소, 영등포 공업단지, 도심지의 난방시설 및 교통량은 측정지점의 남서쪽에 위치하고 있어서 남서계열의 바람을 타고 이동된다. 1976년 이후 5년간의 서울시 바람장미(Wind Roses)를 Fig. 5에 도시하였는바 남서방향과 북동방향의 바람으로 대별된다. 그런데 북동쪽에서의 오염발생량은 극히 미약하므로 오염물질은 주로 남서계열풍을 따라 Downwind 쪽으로 이동될 것이 확실하다. Table 2에 5년간의 남서계열의 풍향빈도수를 나타냈으며 매년 약간씩 증가하였다.

3-2. 기상학적 영향

기상학적인 대표인자로는 풍속, 풍향의 변화,

일사량, 운량, 기압변화 등을 들 수 있다. 대기 확산의 기초모형인 Gaussian Modal을 보면

$$\chi(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right]$$

즉 지표면의 농도는 배출물(Q)과 풍속(u), 수평·수직확산계수(σ_y, σ_z), 배출원의 유효높이(H)에 관계된다. 두 확산계수는 Turner의 분류⁸⁾에 의하면 풍속과 일사량에 따른 Pasquill의 대기안정도에 의해 결정된다. 일사량은 기온의 환경감율(Environmental Lapse Rate)을 좌우하고 건조 단열감율(Dry Adiabatic Lapse Rate)과의 관계에 의해 대기안정도가 결정되며 이에 따라 Coning, Looping, Fanning 등 특유

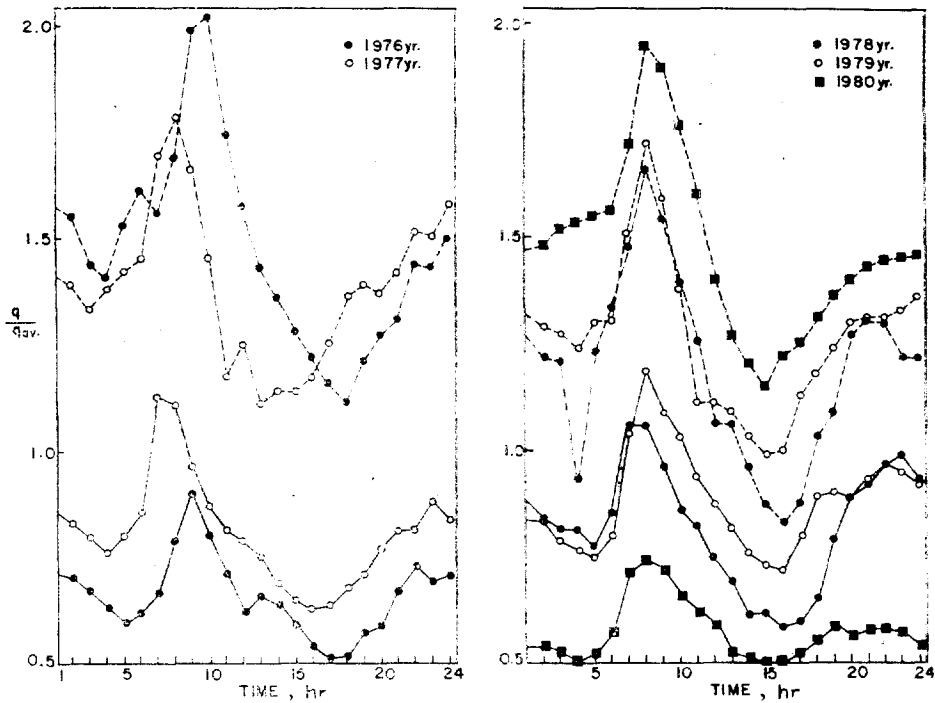


Fig. 6. Diurnal variations of the sulfur dioxide concentrations during the cold(.....) and warm(—) periods, respectively

의 Plume Behaviours가 나타나서 지표면을 오염시킨다. 즉 일출후에는 형성되었던 접지역전층의 파괴로 인하여 상층에 축적되어 있던 고농도의 오염물질이 수직 확산되어 지표면을 크게 오염시킴으로써 1차 극대치가 나타나며 그 후 대기안정도가 감소됨에 따라서 대기중의 오염물질이 활발히 확산되어 일몰전에 극소치를 보인다. 초저녁에 형성되기 시작한 접지역전층은 자정에 이르러 공장굴뚝높이 위에 까지 이르게 되며 이들 고농도의 연기는 Coning이나 Fanning으로 지상농도에는 큰 영향을 미치지 않고 단지 선·면 오염원에서의 배출물질이 점차 축적되어 자정전 후에 완만한 2차 극대치를 나타낸다. Fig. 6의 5년간의 일변화를 보면 따뜻한 철과 추운 철에 관계없이 예상된 시간변화를 나타내어 대기중의 오염물질농도는 그 발생원의 배출물의 변화뿐만 아니라 기상학적 인자 특히 일사량의 변화에 크게 기인됨을 확인하였다. 이러한 이유로 Los Angeles의 일최대 일산화탄소의 농도를 예측하는 데 일사량도 주위와의 기압차와

함께 중요한 변수로 사용되고 있다.⁵⁾ 일사량의 에도 바람에 의한 희석작용이 일어날 수 없는 정온상태 (Calm Condition)는 대기안정도를 심화시켜 오염도를 증가시킨다. Fig. 5의 바람장미에서 고찰하면 최근 2년 동안에 현저히 낮은 정온빈도수를 나타내어 낮은 오염도가 예상된다. 물론 굴뚝에서 배출된 아황산가스는 Fig. 4와 같이 Internal Turbulence에 의한 초기확산, 여러크기의 Eddy에 의한 희석효과, Rainout 또는 Washout 그리고 대규모 기상 현상에 의해 순환되고 평형을 유지하게 된다. 배출물질은 바람에 의한 단순한 물리적 희석외에도 화학적 침적에 의해서 지표면에 도달하게 된다. Ronneau⁹⁾에 의하면 배출 물질의 침적속도는 물리화학적 특성에 의해서 평균기온에 따라 증가되고 상대습도에는 큰 영향을 받지 않으며 혼합높이에 반비례한다고 했다. 따라서 오염물질(아황산가스)의 지표면의 농도는 기상학적 특성(풍속, 일사량, 풍향의 변화)에 깊이 관련되어 있다.

3-3. 모델연구

지금까지 사용되어 온 $\chi=cQ/U$ 의 사용범위와 정확도를 높이기 위하여 다음과 같은 가정 아래 $\chi=k\left(\frac{F}{S}\right)^\alpha\left(\frac{r\cdot Q}{U}\right)$ 로 변형하였다.

(1) 오염물질은 주요오염발생원으로 부터 남서계열의 바람을 따라 이동해 온다.

(2) 경유, 병커유, 무연탄의 연료연소가 아황산가스의 주된 발생원이다.

(3) 일사량과 정온빈도수가 대기혼합도를 대표한다.

여기서 $(r\cdot Q)$ 는 총 배출량중 남서풍(90° Sector)을 따라 측정지점에 도달하는 양이며, $(F/S)^\alpha$ 는 정온빈도수의 상대비(F)에 의한 축적효과와 일사량의 상대비(S)에 의한 희석효과의 기여도를 나타낸 것이다. Table 1의 아황산가스 배출량과 Table 2의 5년간 기상관측자료에 의해 대수화시킨 모델의 두 확률변수들, 오염물질의 분포도 $\ln\left(\frac{\chi\cdot U}{r\cdot Q}\right)$ 와 기상학적 영향에 따른 대기혼합도 $\ln\left(\frac{F}{S}\right)$, Fig. 7과 같이 회귀분석(Regression Analysis)한 결과 $k=55$ 와 $\alpha=0.58$ 을 얻었다. 변형된 모델식 $\chi=55\left(\frac{F}{S}\right)^{0.58}$

$\cdot\left(\frac{r\cdot Q}{U}\right)$ 에 의한 계산치는 Table 3과 같이 실제 측정치와 큰 차이가 없다. 자료수의 부족함과 정확한 연료사용량 추정외 어려움으로 인한 Significance는 낮지만 서울시와 같은 대도시형의 대기오염도를 예측하는 데는 큰 도움이 될 것

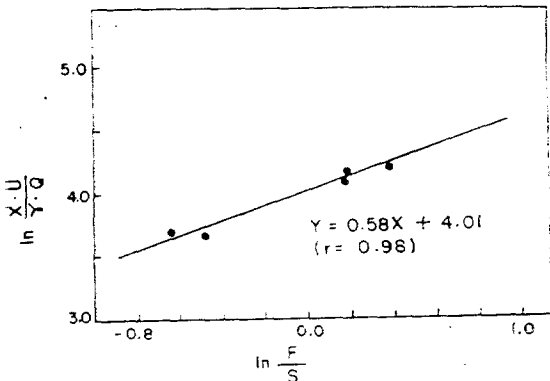


Fig. 7. Regression analysis between emission rate and meteorological parameters by least square method

Table 3. 아황산가스의 측정치와 계산치 비교

년도	농도 Q ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{sec}$)	측정치 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	계산치 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1976	12.23	86.46	82.21
1977	14.43	128.38	128.10
1978	16.82	180.78	186.79
1979	17.11	110.04	105.06
1980	17.45	123.14	131.45

으로 믿어진다. 무연탄 연소가 주된 소도읍지나 대기안정도에 심각한 영향을 주는 소규모 대기 이동외에 대규모 이동이 가능한 넓은 들판지역에서는 변형된 모델에 의한 추정효과가 감소될 것으로 예상된다. Gifford & Hanna³⁾의 미국 30여개 대도시에서 측정된 풍속과 배출량에 의한 비례상수 c의 평균값은 50이었다. 상기 변형식에서 χ 의 농도가 본 연구와 달리 서울시 전체의 평균농도($r=1$)라면 $55(F/S)^{0.58}$ 은 5년 평균치 54로 미국의 평균값과 비슷하다. 실제로 대도시의 기상변화는 Heat Island Effect 등에 의한 Thermal Convection과 도심지 건물과 자동차 통행에 의한 Mechanical Turbulence가 비슷하여 큰 차이가 없기 때문이다.³⁾

4. 결 론

대기중의 아황산가스 농도측정에 의한 간단한 확산모델의 변형을 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 점오염원에서 배출된 고농도의 오염물질(아황산가스)은 22 X 22 km Box형 Model 안에 확산분포된다.

(2) 배출된 오염물질(아황산가스)은 대도시의 기상학적 특성에 의해 일출후의 1차 극대치, 일몰전의 극소치, 자정전후의 완만한 2차 극대치와 같은 일변화를 나타낸다.

(3) 도시형 대기확산모델, $\chi=55\left(\frac{F}{S}\right)^{0.58}$
 $\cdot\left(\frac{r\cdot Q}{U}\right)$ 은 정온빈도수 및 일사량에 의한 기상학적 인자와 배출원과의 방향성에 따라 대도시의 오염도를 예측할 수 있다.

기호 설명

F : 5년 평균치에 대한 년 정온빈도수의 비율
 H : 배출원의 유효높이, m
 Q : 배출강도, $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{sec}$
 Q_0 : 배출률, g/sec
 S : 5년 평균치에 대한 년 일사량의 비율
 U : 평균풍속, m/sec
 a, b : 수직확산계수의 상수
 c : Hanna's Model의 비례상수
 k : 변형식의 비례상수
 r : 회귀분석 계수
 q/q_{av} : 년 평균치에 대한 아황산가스의 한시간농도 비율
 x, y, z : 3차원 좌표계에서의 거리, m
 Z : 농도, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 또는 g/m^3
 α : 기상학적 인자의 기여도
 r : 측정지점을 향한 풍향비

참고 문헌

1. F.A. Gifford & S.R. Hanna, "Urban Air Pollution Modelling," The 2nd Int. Clean Air Congress, Dec. (1970).
2. E.C. Halliday & G. Ventner, *Atm. Env.*, **5** (1971) 815.
3. F.A. Gifford & S.R. Hanna, *Atm. Env.*, **7** (1973) 131.
4. A. Garnett, *Atm. Env.*, **14** (1980) 787.
5. R.H. Aron & I. Aron, *J. Air Poll. Control Assoc.*, **7** (1978) 681.
6. "Introduction Manual of SO₂ Analyzer," Model GR-3C-2, DENKI KAGAKU KEIKI Co.
7. 한국과학기술연구소, "전국특별대책지역 대기 관리에 관한 연구," BSE 475(4)-1339-6 (1979).
8. H.C. Perkins, "Air Pollution," p.52. p 190, Int. Student Ed. (1974).
9. C. Ronneau & N. Spappe-Jacob. *Atm. Env.*, **12** (1978) 1517.