

난류특성을 이용한 대기오염확산모델의 예측능에 관한 연구

박기학 · 윤순창

서울대학교 자연과학대학 대기과학과

A Study on the Predictability of the Air Pollution Dispersion Model Composed of the Turbulent Parameters

Park, Ki-Hark · Yoon, Soon-Chang

Dept. of Atmospheric Science, College of Natural Sciences, Seoul National University

Abstract

Gaussian dispersion model is the most widely used tool for the ground level air pollution simulation. Though in spite of the convenience there are important problems on the Pasquill-Gifford' stability classification scheme which was used to define the turbulent state of the atmosphere or to describe the dispersion capabilities of the atmosphere which was each covers a broad range of stability conditions, and that they were very site specific, and the vertical dispersion calculation formula on the case of the unstable atmospheric condition. This paper was carried out to revise the Gaussian dispersion model for the purposed of increase the modeling performance and propose the revised model, which was composed of the turbulent characteristics in the unstable atmospheric conditions. The proposed models in this study were composed of the profile method, Monin-Obukhove length, the probability density function model and the lateral dispersion function which was composed of the turbulent parameters, u_* (friction velocity), w_* (convective velocity scale), T_L (lagrangian time scale) for the model specific.

There were very good performance results compare with the tracer experiment result on the case of the short distance (<1415m) from the source, but increase the simulation error(%) to stand off the source in the all models. In conclusion, the revised Gaussian dispersion model using the turbulent characteristics may be a good contribution for the development of the air pollution simulation model.

Keyword: Pasquill-Gifford' stability categories, Monin-Obukhove length scale, dispersion coefficient, probability density function

I. 서론

대기오염확산 모델은 오염물질의 대기확산특성을 공간적으로 실제와 가장 근사(近似)하게 예측하기 위한 도구로서 개발사업계획이 대기질에 미치는 영향을 조사하기 위한 환경영향평가, 대기의 용량을 산정하기 위한 오염물질의 총량규제산정시 그리고 도시의 미래의 대기질을 예측하기 위해 수행하는 대기오염관리대책수립, 지역·국가간의 대기오염물질의 출입문제 등과 같은 체계적인 대기질관리에 널리 이용되고 있다¹⁾. 현재 널리 이용되고 있는 대기오염예측 모델들은 주로 미국 기술정보국(National Technical Information Service)에서 제공하는 UNAMAP (User's Network for Applied Modeling of Air Pollution)과 미국 환경청(Environmental Protection Agency)에서 제공하고 있는 SCRAM (Support Center for Regulatory Air Models)으로써 이들 대부분의 모델들은 주로 가우스형 확산이론을 기초로 하고 있다^{2),3)}. 가우스형 확산모델들은 아황산가스나 먼지와 같은 비(非)반응성 물질을 대상으로 오염물질의 대기 중으로의 이류 및 확산을 나타낼 수 있는 복잡한 난류특성들을 간단하게 지표화시킨 대기 안정도를 중심으로 구성되어 있으며, 이와 같은 입력자료의 간단함과 짧은 계산소요시간(CPU time)등 모델운용에 따른 편리성과 경제성 때문에 라그랑지형 모델, 오일러형 모델 등 기타 대기오염확산 예측모델에 비해 널리 이용되고 있다^{4),5)}. 특히, 확산모델의 구성요소들 중에서 오염물질의 대기 중 수평방향과 연직방향의 확산특성을 나타내는 수평확산계수(이하 σ_y)와 연직확산계수(이하 σ_z)는 Pasquill-Gifford(이하 P-G) 대기안정도 분류방법에 따라 안정, 중립, 불안정 등 6~7 단계로 분류한 후 이를 풍하방향으로의 오염물질의 이동거리에 따른 지수함수(power-law approximation) 또는 외삽법(extrapolation method)에 의한 함수관계로서 나타내고 있기 때문에 다른 확산모델에 비해 운

영면에서 간편한 특성을 갖고 있다. 그러나 이상의 특성에도 불구하고 대기오염모의 시 모델예측의 정확성에 따른 신뢰도문제가 이러한 σ_y 와 σ_z 의 대기안정도 등급에 따른 기상특성의 단순한 지수(指數)화 등에서 비롯될 수 있다는 지적이 많은 연구에서 제기되어 왔다^{6),7)}.

이에 본 연구는 불안정한 대기를 중심으로 Profile method, Monin-Obukhov length scale(이하 L), Probability density function(이하 PDF) 등과 같은 난류특성을 이용하여 구성된 모델의 예측능을 중심으로 보다 체계적인 대기질 관리를 위한 대기오염확산모델의 개발 가능성을 검토하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연직확산항의 구성

대기에서 오염물질의 연직방향 확산을 설명하기 위하여 바람의 연직속도는 평균값을 중심으로($w=0$) 정규분포를 이루고 있는 것을 전제로 하고 있기 때문에 대기가 불안정한 상태에서 오염물질의 연직방향 확산을 나타내는 σ_z 에 대한 선택이 모델의 예측결과에 매우 중요한 요인으로 작용할 수 있다. 대기가 불안정한 경우 혼합층에서 연직방향에 대한 풍속분포는 $w=0$ 에서 대칭이 아니라는 사실을 Lenschow가 1970년에 비행선을 이용한 실제관측결과를 발표한 이래 실내에서의 수조(tank)를 이용한 실험, 수치 모델링을 이용한 연구결과 등 활발하게 논의 되어왔다²¹⁾. 따라서 대기가 불안정한 상태를 지속할 경우 대기오염의 확산은 입자의 대부분이 지면 가까이 도달할 때까지 계속해서 풍하방향으로 이루어진다는 사실을 고려한다면 혼합층(convective boundary layer : 이하 CBL)이 주로 낮 시간 동안에 육지에서 형성되며 이때 배출원 가까이에서 대기오염이 높게

관측될 수 있다는 가능성은 공업단지 주변환경에 대한 대기오염 평가시 대기가 안정한 상태뿐만 아니라 불안정한 상태에서도 역시 공업단지로부터 발생하는 대기오염관리에 신중한 고려가 요구된다는 사실을 짐작케 하고 있다^{8)~10)}.

따라서 본 연구에서는 CBL에서의 오염물질의 확산을 설명하기 위하여 기존의 σ_z 의 산출방법에 대하여 이미 많은 연구에서 검토된 바 있는 PDF 모델을 도입하여 오염물질의 연직방향으로의 확산을 설명하고자 하였다. PDF이론을 도입한 모델은 P_w (연직방향에 대한 풍속분포에 대한 PDF), 즉 $\int_{-\infty}^{+\infty} P_w dw = 1$ 을 기본개념으로 하고 있으며, 바람의 연직속도의 변동성분(w)에 대한 P_w 에 따라 다르지만 본 연구에서는 아래 식과 같이 바람의 연직속도의 변동성분(w)을 1로 하고 하강(down draft)과 상승(updraft)에 따른 분포를 각각 0.6과 0.4의 비율로써 설정한 결과를 기초로 하는 Baerentsen and Berkowicz(1984)가 제안한 PDF모델을 사용하여 대기오염물질의 연직방향 확산을 설명하였다¹¹⁾.

$$P(w) = \frac{a_+}{\sqrt{2\pi}\sigma_+} \exp\left(-\frac{(w-w_+)^2}{2\sigma_+^2}\right) + \frac{a_-}{\sqrt{2\pi}\sigma_-} \exp\left(-\frac{(w-w_-)^2}{2\sigma_-^2}\right)$$

a_+, a_- : up and downdraft frequencies of occurrence,

σ_+, σ_- : up and downdraft velocity

w_+, w_- : turbulent energy of updraft and downdraft

$$\sigma_+ = w_+, \sigma_- = w_-,$$

$$w_- = \sigma_- = [(S_w^6 + 8\sigma_w^6)^{1/2} - S_w^3] / 4\sigma_w^2,$$

$$w_+ = \sigma_+ = \sigma_w^2 / 2\sigma_-,$$

$$a_+ = w_- / (w_+ + w_-) \rightarrow 0.4,$$

$$a_- = w_+ / (w_+ + w_-) \rightarrow 0.6,$$

$$\sigma_w^2 / w_*^2 = 1.54 Z^{2/3} \exp(-2Z),$$

$$S_w^3 / w_*^3 = 0.8Z(1-Z)(1+0.667Z)^{-1},$$

$Z = z/z_i, z_i$: boundary layer height,

w_* = convective velocity height,

$$\left(\rightarrow w_* = \left(\frac{gHz_i}{C_p\rho T}\right)^{1/3}\right)$$

$w = 0.6w_*$ (by Venkatram, 1983)

2. 난류특성변수의 산출방법

대기경계층(planetary boundary layer)은 지면의 영향에 의해 형성되는 대기의 난류층으로써 풍속, 풍향, 습도, 기온 등과 같은 대부분의 기상 요소들은 공간적으로 복잡한 변화를 하지만, 지면과 가장 가까운 대기층인 지표층의 경우에는 운동량속(momentum flux), 현열 속(sensible heat flux), 수증기 속(moisture flux)등과 같은 난류특성이 연직방향으로 규칙적인 변화특성을 갖는다. 특히 지상의 배출원으로부터 연속적으로 배출되는 대기오염물질의 대기 중으로의 확산은 바람의 연직 및 수평성분의 난류강도에 의해 영향을 크게 받기 때문에 대기오염확산모델을 사용하여 오염물질들의 대기 중으로의 확산을 설명하기 위해서는 보다 정확한 난류특성자료가 필요하다. 이에 이미 많은 연구에서 지표층의 기상요소들을 중심으로 개발된 지표면 상사이론, 대기 경계층 상사이론, 혼합층 상사이론 등과 같은 진단적 방법을 이용하여 u_* (friction velocity : 이하 u_*), w_* (convective velocity scale : 이하 w_*), L 등과 같은 난류특성변수들을 산출하여 대기의 난류특성을 설명하고 있다. 이와 같은 난류특성변수들을 산출하기 위해서는 실제로 연구대상지역의 지표면과 대기사이의 난류특성의 교환과정을 정확하게 측정할 수 있는 매우 빠른 반응 수감부를 가진 에디상관 시스템(eddy correlation system)이나 음과풍속 온도계(sonic anemometer/thermometer)와 같은 정밀한 측정장비가 필요하다¹²⁾. 그러나 지표면의 flux를 직접 관측하지 않고도 일반적으로 쉽게 이용할 수 있는 기온, 풍속과 같은 지상의 기상관측자료들을 중심으로 난류강도계산을 가능하게 하는 Profile method가 개발되어 L과 같은 난류특성 계산에서 좋은 결과를 보여주고 있다. L과 w_* 를 나타내는 기본 식은 다음과 같다.

$$L = -\frac{\rho C_p u_*^3 \bar{\theta}}{kgH}, \quad w_* = \left(\frac{gHz_i}{C_p\rho T}\right)^{1/3}$$

여기서 θ 는 온위이며, g 는 중력가속도, T 는 기온(K), ρ 는 공기밀도(1.2), C_p 는 정압 비열(1004 JK⁻¹), u_* 는 마찰 속도, k 는 Von Karman 상수(0.4), H 는 열속(sensible heat flux, H), z_i 는 혼합고(mixing height), w_* 는 대류속도규모(convective velocity scale)를 나타낸다.

Profile method는 지표면에서 현열속(sensible heat flux, H)과 잠열(latent evaporation flux, λE)간의 에너지 수지 관계를 반복법(iterative method)을 이용하여 L산출에 필요한 u_* , w_* 등을 계산하는 방법이며, 본 연구에서는 Xu과 Qu(1997)가 제안한 방법을 이용하여 난류특성변수를 산출하였다¹³⁾.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_M\left(\frac{z_0}{L}\right) \right] \quad (1)$$

$$\Delta\theta = \theta(z_2) - \theta(z_1) = \frac{\theta_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_H\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_H\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (2)$$

$$\Delta q = q(z_2) - q(z_1) = \frac{q_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_Q\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_Q\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (3)$$

$u_* = \tau/\rho$, friction velocity (τ : wind stress, ρ : air density)

k : Von Karman constant

θ_* : flux temperature scale

q_* : flux specific humidity scale

g : acceleration of the gravity

for unstable surface layer($\theta_* < 0$ or $L < 0$)

$$\Psi_M = 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

$$\Psi_{H,Q} = 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right), (\Psi_H = \Psi_Q) \quad (5)$$

$$\rightarrow x = \left(\frac{1-16z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} = \left[1 - \frac{16zk g \theta_*}{T z_*^2}\right]^{\frac{1}{4}},$$

$\rightarrow \Psi_M, \Psi_H, \Psi_Q$: stability function

3. 확산식의 구성

본 연구에서는 P-G대기 안정도 등급에 따른 σ_y 산출방법을 연구대상지역의 기상변수들로부터

산출한 난류특성변수들(u_* , w_* , L)을 사용하여 수평바람특성을 설명하고자 하였으며, σ_y 산출방법은 현재 SCI(scific citation index)에 발표된 연구결과들로서 이미 여러 단계의 검증과정을 걸친 바 있어 이를 토대로 산출특성에 따라 다음의 Type 1~Type 5의 5종류의 모델유형으로 나누어 구성하였다.

Type 1은 난류특성을 이용한 산출방법으로써, 대기가 불안정한 경우 지면과 대기간의 에너지 교환은 대기가 안정한 경우보다 작기 때문에 L과 같은 난류변수로서는 대기의 안정상태를 설명하는 것은 부정확할 수밖에 없으며, 따라서 이와 같이 대기가 불안정한 경우 u_* 보다는 w_* 를 사용하여 난류특성을 설명하는 것이 적합하다는 연구결과에 기초를 두고 σ_y 를 산출하고자 하였다¹⁴⁾. Type 2와 Type 3은 각각 Pasquill이 제안한 라그랑지 시간규모(lagrangion time scale, 이하 T_L)의 변화에 따른 산출방법을 특성으로 하고 있고, T_L 의 변화에 따른 오염물질의 확산특성변화를 살펴보고자 한 경우이다^{15,16)}. Type 4는 수평방향의

Table 1. Model Types

Model type	Dispersion function
Type 1	$\sigma_y = \left\{ 0.08^2 + (0.56 \cdot \left(\frac{w_*}{u}\right)^2) \right\} \cdot x$
Type 2	$\sigma_y = \sigma_v \cdot t \cdot F_y$ $\sigma_v = 1.78 \cdot u_* \cdot \left\{ 1 + 0.59 \left(-\frac{z_i}{L}\right) \right\}^{1/3}$ $F_y = \left\{ (1 + 0.9 \cdot \left(\frac{x}{u \cdot T_L}\right)^{1/2}) \right\}^{-1}$
Type 3	$\sigma_y = \sigma_v \cdot t \cdot F_y$ $\sigma_v = w_* \cdot 0.74 \cdot \left\{ 0.5 \cdot \left(2 - \left(\frac{z_i}{z_i}\right)^{1/2}\right) \right\} + 0.3 \cdot \left(\frac{z_i}{z_i}\right)^{1/2}$ $F_y = \left\{ 1 + 0.9 \cdot \left(\frac{x}{u \cdot T_L}\right)^{1/2} \right\}^{-1}$
Type 4	$\sigma_y = \sigma\theta \cdot X \cdot \left\{ 1 + 0.9 \cdot \left(\frac{x}{u \cdot T_L}\right) \right\}^{1/2}$ $\sigma\theta = 0.6 \cdot w_* / u$
Type 5	$\frac{\sigma_y}{z_i} = 0.6X / (1 + \alpha X)^{1/2}, (X = \frac{w_* \cdot x}{u \cdot z_i})$ $(\alpha : \text{probability coefficient})$

풍향변동(σ_θ)을 이용하여 σ_y 를 산출하는 방법으로써 정밀한 풍향측정장비를 필요로 하는 기존의 산출방법에 대해 풍속(u)과 w_* 그리고 T_L 만으로 구성된 비교적 간편한 σ_y 산출방법을 특성으로 하고 있다. Type 5은 오염물질의 이동시간과 CBL에서의 속도규모간의 관계를 고려한 무차원 거리(nondimensional distance : X)를 사용하여 σ_y 를 산출하는 방법으로써 주로 probability coefficient(α)에 의해 확산정도가 결정되는 특성을 갖고 있다¹⁷⁾. 이상의 Type 1~Type 5의 경우 연직방향 확산계수의 산출방법은 공히 PDF 모델을 사용하였다(Table 1).

이상에서 설명한 바와 같이 대기가 불안정한 상태의 CBL에서 부력에 의한 상승을 고려한 오염물질에 대한 지상농도예측을 목적으로 연직확산특성과 수평확산특성에 따라 다음과 같이 Type 1~ Type 5의 5종류로써 확산식을 구성하였으며, 기본 확산식은 다음과 같다.

$$C(x, y, z) = \frac{Cwic}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] = \frac{\int \chi dy}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]$$

$$\rightarrow \int \chi dy = (Q/x) Pw(w_e | z_s) = \text{Crosswind integrated concentration(CWIC)}$$

$$\rightarrow \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] = \text{Horizontal dispersion function(HDF)}$$

III. 연구결과 및 고찰

1. 모델 및 모델링 특성

1) 모델링 특성

본 연구에서 제시한 대기오염확산 모델을 사용하여 오염물질의 농도분포예측을 위하여 설정한 모델링 대상지역은 서해안의 126° 41'~126° 45' E, 37° 21'~37° 18' N에 위치한 경기도 시흥시 그리고 안산시에 걸쳐 위치한 시화공단 전체와 안산시의 반월공단 일부이며, 격자계로서는 동-서, 남-북 방향 모두 격자 크기가 400 X 400m 로써 174.36

Table 2. Meteorology data of modeling

Sampling time	W.D (degree)	W.S(m/s)		Temp.(K)	
		SFC(0.1m)	16m	SFC(0.1m)	16m
14: 30 ~ 15: 20	223	0.1m	2.34	293.7	294.2

Table 3. Input conditions of modeling

Release height(m)	Exit temp(K)	Exit velocity (m/s)	Stack diameter(m)	Grid size (m)	Stability
16.00	300	10	0.03	X=400, Y=400	1(A)

~181.56 TM-X(km), 421.96~427.95 TM-Y(km) 내로 구성되어 있으며, 모델링 영역은 대체로 평탄한 지형을 이루고 있다. 추적자 실험 시 배출원으로 선정한 지점은 지상으로부터 16m높이의 건물 옥상으로써 격자계 176.6(TM-X)~424.1(TM-Y)상에 위치하고 있다.

또한 배출지점에서의 지상 기상장은 AWS (Automatic Weather Station System, Campbell, Inc. U.S.A.)를 설치하여 풍속(05103 RM Young Wind Monitor, 0.1 m/s), 풍향(05103 RM Young Wind Monitor, degree), 기온 (HMP35P Vaisala Temperature and RH probe, 0.1°C) 그리고 습도 (HMP35P Vaisala Temperature and RH probe, %)를 각각 1분 간격으로 측정하여 평균값으로써 사용하였다. 혼합고는 Radio Theodolite Sonde (Atmospheric Instrumental Research Inc. U.S.A.)를 사용하여 측정된 상층대기자료(고도별 온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속)를 근거로 고도별 온위(potential temperature)를 계산하여 산출하였다 (Table 2~3).

2) 대기상태 분석결과

연구대상지역의 대기상태를 조사하기 위하여 먼저 기존의 산출방법인 P-G대기안정도를 사용하였으며, 이를 위한 기상측정은 추적자 실험이 수행된 동일지점에서 AWS를 설치하여 풍속(m/s)과 풍향(degree) 그리고 기온(K)과 태양고

도각(α)을 이용하여 산출한 결과 각각 2.34m/s, 223degree, 294.2K 그리고 $\alpha=60.1$ 로써 매우 불안정한 상태인 것으로 조사되었다. 또한 난류특성을 이용하여 대기안정도를 평가하기 위하여 Profile method를 이용하여 u_* , w_* , H를 조사한 결과 각각 0.6(m/s), 1.05(m/s), 84.8 (W/m²)로 나타났다. L를 이용한 무차원 안정도 규모(z/L)는 -2065로써 역시 매우 큰 음의 수준($z/L \rightarrow -\infty$)인 불안정한 상태로 나타났다. 혼합고(Radio Theodolite Sonde, Atmospheric Instrumental Research Inc, U.S.A.)는 온위의 연속적 분포를 조사한 결과 500m인 것으로 나타났다.

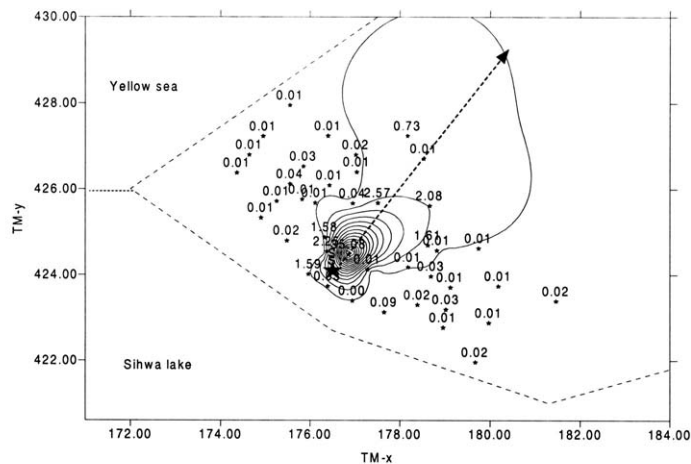
2. 추적자 실험결과

추적자 실험은 지상으로부터 16m 상공에서 단거리 또는 장거리 확산실험의 정량분석에 널리 이용되고 있는 기체상의 SF6를 사용하여 약1시간(13:50~14:50)동안 방출(61.6Kg)하였으며, 정규분포를 이루는 시간은 Misra(1982)의 불안정한 대기상태에서 풍향방향으로 플룸이 비교적 잘 혼합될 수 있는 거리(=3 · zi · u/w_{*})와 평균풍속간의

관계로부터 각각 약 3000(m)와 1시간으로 정하였다²⁰⁾²¹⁾. 따라서 대기 중으로 추적자로 사용되는 SF6가 정규분포를 형성한 후 Teflon air bag을 사용하여 포집하였으며, 전자포획검출기(electronic capture detector)를 장착한 Gas Chromatography (HP 5890, Hewlett & Packard Inc, U.S.A.)로써 분석하였다. 추적자 실험결과를 TM좌표(174.36~181.56 TM-X, 421.96~427.95 TM-Y)상에 도시한 결과 전반적인 농도분포는 주(主)풍향방향인 남서방향(223 degree)으로 확산되는 경향을 보였으며, 배출원으로부터 가까운 거리(=1415m)까지는 비교적 높은 농도분포를 보였으나, 그 이후 지점부터는 대기중으로의 활발한 확산으로 인해 낮은 농도분포 경향을 보였다(Fig. 1).

3. 모델링 결과

본 연구에서는 추적자 실험결과와의 정합도 평가를 위하여 사용 가능한 추적자 실험 결과를 토대로 예측지점을 선정한 결과 중심선 상에서 가장 가까운 풍하거리의 4개 지점, 1st site(332m), 2nd site(1415m), 3rd site(2581m), 4th site(3114m)



Large ★ : Tracer emitting point →176.6(TM-X)~424.1(TM-Y) Small ★ : Sampling point

Fig. 1. Contouring of tracer experiment result at Sihwa area

를 선정하였으며, 풍하거리에 대해서 주(主)풍향을 중심으로 좌·우 방향으로 각각 45 degree범위 내에서의 확산만을 고려하도록 모델을 설계하였다. 전반적으로 산출한 난류특성변수를 사용하여 구성된 모델들(Type 1~Type 5)의 모의결과는 실제 추적자 실험에 의한 관측농도 분포에 가깝게 나타났다. 특히 Type 4을 제외한 나머지 모델 유형들은 사전에 가능한 한 실제 관측값에 가깝도록 최적화(optimization)한 상태에서 예측농도를 비교하였다. 또한 난류특성을 이용하여 수평확산항을 구성할 경우 수평바람변동(σ_v), 오염물질의 이동시간(t)과 함께 오염물질의 특성이 소멸되는 시간을 나타내는 T_L 에 대한 신중한 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서 Willis and Deardorff (1974), Kaimal et al.(1976)의 연구 결과를 토대로 60sec부터 1800sec까지 8단계로 구분하여 사전 최적화를 하였으며, Type 4와 Type 5의 경우 T_L 이 각각 245sec와 680sec에서 실제 관측 값(=35.08 ppb)에 가장 가까운 예측 값(Type 4=35.09ppb, Type 5=35.08ppb)을 얻을 수 있었다. 연구대상지역의 기후자료로부터 산출한 w_* 는 많은 연구에서 실제 관측한 범위(1 < w_* < 2.5m/s ; Deardorff and Willis, 1975)내에 속하는 수준(1.03m/s)이었으나 u_* 는 0.57(m/s)로서 지표 층에서의 일반적인 수준(0.1~0.3m/s)보다는 다소 크게 나타났으며, 이는

지면 거칠기의 차이에서 비롯되는 것으로 사료되었다. 모델링 결과 1st site(=332m)에서 Type 4(=35.09ppb)와 Type 5(=35.08ppb)는 전체 모델 유형 중에서 실제 관측값을 매우 정확하게 예측하고 있는 것으로 나타났으며, 특히 Type 5는 실제 관측값을 정확하게 예측함으로써 대기가 불안정한 상태에서 대기오염확산예측을 위한 확산모델의 선택시 기존의 가우스형 확산모델에 비하여 난류특성을 이용한 확산모델의 사용이 효과적일 것으로 사료되었다^{23),24)}. 또한 2nd site(=1415m)에서도 역시 다른 모델유형에 비하여 Type 4와 Type 5 그리고 예측오차가 각각 7.58(%)와 -1.94(%)로서 실제 관측값을 비교적 정확하게 예측하고 있는 것으로 나타났다. Type 4의 경우는 복잡한 풍향의 변화를 고려하지 않고 단순하게 풍속 u , w_* , T_L 로써 구성해서 σ_y 산출할 수 있다는 장점은 있으나, 다른 모델유형에 비하여 예측 결과는 매우 낮은 것(1st site = -20.57%, 2nd site = -24.11%)으로 나타났다. 실제로 풍향의 변화가 건물의 높이나 넓이와 같은 배출원 주변지형과 구조물에 매우 민감한 영향을 받는다는 사실을 고려할 때 이를 직접 측정하지 않고 근사(近似)화 시킨 난류특성을 이용하여 나타낸다는 것은 측정이 불가능한 경우와 같은 특별한 경우 외에는 사전에 신중한 고려가 필요할 것으로 사료

Table 4. Comparison of the concentration(ppb)/performance error(%).

Site	Observation (Tracer)	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
1st site	35.084	34.925 /-0.45	35.090 /0.30	35.080 /-0.01	27.866 /-20.57	35.007 /-0.22
2nd site	2.572	1.928 /-25.04	2.767 /7.58	2.522 /-1.94	1.952 /-24.11	2.061 /-19.87
3rd site	0.017	0.579 /-3305.88	1.002 /5794.12	0.898 /-5182.35	0.671 /3847.06	0.658 /3770.59
4th site	0.007	0.398 /5585.71	0.733 /10371.43	0.634 /8957.14	0.483 /6800.00	0.464 /6528.57

※ 1st site : 332m, 2nd site : 1415m, 3rd site : 2581m, 4th site : 3114m

※ Error(%)=(revised model' conc.- observed conc.) / observed conc.) × 100

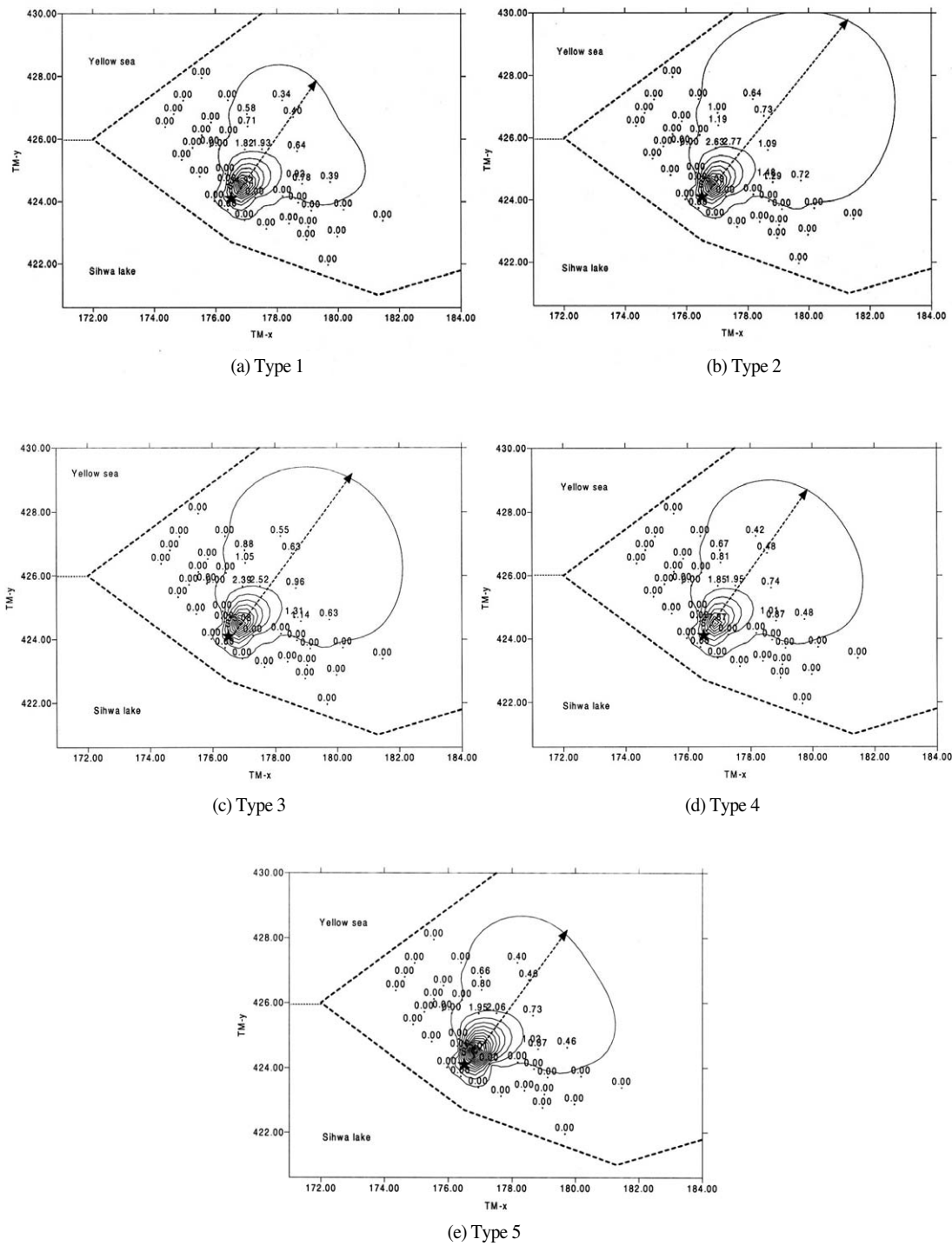


Fig. 2. Simulation results

Table 5. Comparison of $\sigma_y/(\sigma_y/\text{downwind distance})$ ratio between the revised model' output with the downwind distance

Site (downwind distance)	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
1st site	86/26	86/26	71/21	108/33	86/39
2nd site	368/26	256/18	233/16	363/26	344/24
3rd site	671/26	388/15	367/14	579/22	590/23
4th site	809/26	439/14	421/14	666/21	694/22

※ 1st site : 332m, 2nd site : 1415m, 3rd site : 2581m, 4th site : 3114m

※ Ratio(%) = (revised model' value / downwind distance) × 100

된다.

Type 5의 경우는 Probability coefficient(α)와 K의 변화에 따른 예측결과를 고려하여 실제 관측값에 비교적 가깝게 접근한 최적의 조건을 고려하였을 경우 $\alpha=0.15$ 에서 실제 관측값에 가까운 우수한 예측결과(1st site = 35.00ppb)를 얻을 수 있었다. 그러나 2nd site(=-19.87%)는 실제 관측값을 과소평가하고 있는 것으로 나타났으며, 풍하거리가 배출원으로부터 멀어질수록 다른 모델 유형들과 마찬가지로 실제 관측값간의 예측 오차가 매우 큰 수준으로 증가하는 것으로 나타났다 (Table 4)(Fig. 2).

4. 수평확산계수의 특성비교

가우스형 대기오염확산모델에서 사용하고 있는 σ_y 는 주로 추적자 실험결과를 기초로 한 산출방법을 따르고 있기 때문에 실험대상지역의 지형특성과 기상특성을 충분히 고려한 σ_y 산출방법의 선택이 요구된다. 따라서 대기오염확산 예측을 위한 모델선정 시 어떠한 σ_y 를 선택하느냐가 모델의 예측결과에 큰 영향을 미친다는 점을 고려하여 모델을 선정하여야 하며, 특히 σ_y 를 구성하고 있는 오염물질의 수송시간(t), 라그랑지 시간규모(T_L), y방향의 평균풍속의 변동(σ_v)과 같은 요인들에 대한 신중한 고려가 필요하다. 본 연구에서 제시한 Type 1~Type 5의 σ_y 의 수준을 조사한 결과 모델유형에 따라 수평확산계수의 수준차이

는 있었으나 전반적으로 중심선상의 풍하거리가 배출 원으로부터 멀어질수록 확산양상에 따라서 커지는 것을 알 수 있었다. 특히 풍하거리의 중심선 상에서 오염물질의 이동거리에 대한 수평확산거리의 수준은 Type 1(26%), Type 4(26%), Type 5(27%)의 경우가 Type 3(16%), Type 2(18%)에 비해서 높은 것으로 나타났다. 또한 Type 2, Type 3 그리고 Type 5의 경우 풍하거리의 중심선상에서 배출원으로부터 가장 가까운 지점(1st site = 332m)에서의 σ_y 의 크기가 동일한 수준(87m)를 나타냈으며, 이에 따른 예측농도 또한 동일한 수준으로써 Type 2 = 35.09(ppb), Type 3 = 35.08(ppb), Type 5 = 35.00(ppb)을 각각 나타냄으로써 본 연구에서 제시한 확산식 구성특성을 고려할 때 배출원으로부터 가까운 지점에서의 오염물질의 농도분포는 수평확산계수의 크기에 비례하는 것을 알 수 있었다(Table 5).

IV. 결론

본 연구는 불안정한 대기를 중심으로 기존의 가우스형 확산모델이 갖고 있는 문제점을 개선하여 보다 향상된 예측능력을 갖춘 대기오염확산모델을 개발하기 위한 기초연구로써 연구대상지역의 난류특성을 기초로 한 대기오염확산모델의 가능성을 검토하였으며, 이를 위하여 현재 발표된 연구결과들을 토대로 연구대상지역의 기상 실측자료(on-site)를 기초로 난류특성변수(u_{**} , w_{**} , L,

H)를 산출할 수 있는 Profile method, 수평확산특성을 설명할 수 있는 수평확산계수(σ_y) 그리고 확률밀도함수(PDF) 모델을 도입하여 σ_z 를 산출하여 5종류(Type 1~Type 5)의 확산식을 구성하였다. 미국 환경청(EPA)에서 제공하고 있는 SCRAM중 일부 가우스 형 확산모델들(ISC, TEM 등)의 프로그램을 분석한 결과 풍하거리에 대해서 주(主)풍향을 중심으로 좌·우 방향으로 각각 45 degree범위 내에서의 확산만을 고려하도록 설계되어있었다. 따라서 본 연구에서도 동일 조건간의 비교를 고려하였으며, 본 연구에서는 사용 가능한 추적자 실험결과를 토대로 예측지점을 선정된 결과 중심선 상에서 비교적 제일 가까운 풍하거리 4개 지점을 선택하여 모델의 예측결과를 비교하였다. 연구결과 Type 3과 Type 4의 경우 예측결과가 실제 대기에서의 추적자 실험결과를 비교적 우수하게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용한 σ_y 산출방법들뿐만 아니라, 대기가 불안정한 상태에서 연직확산특성을 설명할 수 있는 PDF 모델과 난류특성변수를 산출할 수 있는 Profile method 역시 이미 SCI의 많은 연구에서 비교적 우수한 연구결과로써 검증 받은 바 있기 때문에 우리나라의 지형특성을 고려하여 다양한 지역을 대상으로 하는 추적자 실험과 같은 정합도 평가·검증과정을 거친다면 난류특성을 이용한 대기오염예측모델에 관한 연구는 기존의 가우스 확산모델에만 의존해왔던 우리나라의 대기질 관리정책에 좋은 기초자료로써 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Pasquill, F. and F. B. Smith. 1983. Atmospheric Diffusion, John Wiley & Sons.
2. U.S. EPA. 1995. User's guide for the Industrial Source Complex(ISC) dispersion models, Vol. I, user instruction, Vol. II, description of models algorithms, EPA-454/B-95-003b.
3. Atkinson, D. G., D. T. Bailey, J. S. Irwin, and J. S. Touma. 1997. Improvement of the EPA industrial source complex dispersion model, *J. Appl. Meteor.*, 36, 1088-1095.
4. Turner, D. B., 1979. Atmospheric dispersion modeling, A critical review, *JAPCA*, 29(5), 502-519.
5. Gifford, F. A. and S. R. Hanna. 1973. Modeling urban air pollution, *Atmos Environ.*, 7, 131-136.
6. Turner, D. B. 1997, The long lifetime of dispersion methods of Pasquill in U.S. regulatory air modeling, *J. Appl. Meteor.*, 36, 1016-1020.
7. 김용국, 이종범. 1992. 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향변동폭의 특성. *한국대기보전학회*, 8(2), 138-145.
8. Venkatram, A. 1983. On dispersion in the convective boundary layer, *Atmos Environ*, 17, 529-533.
9. Kai, L. Z. and G. A. Briggs. 1988. Simple PDF models for convectively driven vertical diffusion, *Atmos., Environ*, 22(1), 55-74.
10. Deardorff, J. W. and G. E. Willis. 1975. A laboratory model of diffusion into the convective planetary boundary layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 427-445.
11. Baerentsen, J. H. and R. Berkowicz. 1984. Monte Carlo simulation plume dispersion in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 18(4), 701-712.
12. 박문수. 1998. 복잡한 지형에서 대기 난류의 특성 분석, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 71.
13. Xu, Q. and C. J. Qiu. 1997. A variational method for computing surface heat fluxes from ARM surface energy and radiation balance systems, *J. Appl. Meteor.*, 36, 3-11.
14. Draxler, R. R. 1987. Accuracy of various diffusion

- and stability schemes over Washington, D. C., *Atmos Environ.*, 21(3), 491-499.
15. Weil, J. C. and R. P. Brower. 1984. An updated Gaussian plume model for tall stack, *JAPCA*, 34, 818-827.
 16. Irwin, J. S. 1979. Estimating plume dispersion- A recommended generalized scheme, 4th symposium on turbulence diffusion and air pollution, Jan. 15-18, Reno, NV, 62-69.
 17. Wilczak, J. M. and M. S. Phillips. 1986. An Indirect estimation of convective boundary layer structure for use in pollution dispersion models, *J. Climate and Appl. Meteor.* 25, 1609-1624.
 18. Luhar, A. K. and R. E. Britter. 1989. A random walk model for dispersion in inhomogeneous turbulence in a convective boundary, *Atmos. Environ.*, 23(9), 1911-1924.
 19. Weil, J. C. 1985. Updating applied diffusion models, *Climate and Appl. Meteor.* 24(11), 1111-1130.
 20. Misra, P. K. 1982. Dispersion of non-buoyant particles inside a convective boundary layer, *Atmos. Environ.*, 16(2), 239-243.
 21. 이상미, 윤순창, 홍민선. 1998. SF6 추적자 실험을 통한 대기오염확산모델의 검증 평가, 추계대기보전학회 요지집, 55-56.
 22. U.S. National Technological Information Service(NTIS). 1979. User's guide for the Texas Episodic Model(TEM).
 23. Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, D. A. Haugen, O. R. Cote, Y. Izumi, S. J. Caughey, and C. J. Readings, 1976, Turbulence structure in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 33, 2152-2168.
 24. Willis, G. E. and J. W. Deardorf. 1981. A laboratory study of dispersion from a source in the middle of the convectively mixed layer, *Atmos Environ*, 15, 109-117.