

APSM의 예측능 평가에 관한 연구

박기학·윤순창
서울대학교 지구환경과학부 대기환경전공
(2002년 1월 29일 접수; 2003년 3월 13일 채택)

A study on the Assessment of the Predictability of the APSM

Ki-Hark Park and Soon-Chang Yoon

*Atmospheric Sciences Program School of Earth and Environmental Sciences,
Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(Manuscript received 29 January, 2002; accepted 13 March, 2003)*

The Pasquill-Gifford stability category is a very important scheme of the Gaussian type dispersion model defined the complex turbulence state of the atmosphere by A grade(very unstable) to F grade(very stable). But there has been made a point out that this stability category might decrease the predictability of the model because it was each covers a broad range of stability conditions, and that they were very site specific. The APSM (Air Pollution Simulation Model) was composed of the turbulent parameters, i.e. friction velocity(u_*), convective velocity scale(w_*) and Monin-Obukhov length scale(L) for the purpose of the performance increasing on the case of the unstable atmospheric conditions. And the PDF (Probability Density Function) model was used to express the vertical dispersion characteristics and the profile method was used to calculate the turbulent characteristics. And the performance assessment was validated between APSM and EPA regulatory models(TEM, ISCST), tracer experiment results. There were very good performance results simulated by APSM than that of TEM, ISCST in the short distance (<1415 m) from the source, but increase the simulation error(%) to stand off the source in others. And there were differences in comparison with the lateral dispersion coefficient(σ_y) which was represent the horizontal dispersion characteristics of a air pollutant in the atmosphere. So the different calculation method of σ_y which was extrapolated from a different tracer experiment data might decrease the simulation performance capability. In conclusion, the air pollution simulation model showed a good capability of predict the air pollution which was composed of the turbulent parameters compared with the results of TEM and ISCST for the unstable atmospheric conditions.

Key Words : Pasquill-Gifford stability categories, Monin-Obukhov length scale, Dispersion Coefficient, Probability density function model

1. 서론

체계적인 대기질 관리를 위한 대기오염예측도구로서 확산모델을 평가할 때 가장 우선적으로 고려해야 할 기준은 현재의 대기질 수준으로부터 미래의 대기오염도를 얼마나 실제에 가깝게 정확하게 모의(simulation)하느냐 일 것이다. Pasquill-Gifford

(이하 P-G) 대기안정도는 모델운영이 다른 확산모델에 비해 간편하게 구성되어 있다는 특성으로 널리 사용되고 있다^{1~3)}.

그러나 한정된 안정도 수준(6~7 등급)은 지역특성에 따른 기상상태를 특성별로 계량화하는데 한계가 있을 뿐 만 아니라, 수평 및 연직확산계수(이하 σ_y, σ_z) 산출방법이 안정도 등급 내로 한정되어 있기 때문에 동일 안정도범주에서 각기 다른 난류특성을 나타내고 있는 경우라도 동일한 수준으로 평가되는 등의 문제점을 안고 있다. 또한 실제로 대

Corresponding Author : Ki-Hark Park, Atmospheric Sciences Program School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
Phone : +82-02-880-6721
E-mail : pkh0202@hanmail.net

기가 불안정한 상태인 경우에는 연직방향의 바람속도 분포특성이 정규분포(normal distribution)가 아닌 비대칭(asymmetry)분포를 이루고 있다는 연구결과 등 기상특성의 단순한 지수화(指數化)가 결과적으로 모델의 예측결과에 오차를 초래할 수 있다는 지적이 대두되고 있다^{4,5)}.

실제로 특정고도에서 오염물질의 수평방향과 연직방향의 확산을 설명하기 위해서는 바람의 연직방향과 수평방향에서의 흐름을 측정하여야 하며, 이를 위해서는 대상지역에서 측정하고자 하는 높이에 관측탑(tower)을 설치하거나, 풍선(balloon)을 이용하여 고도별 변화를 측정하는 방법을 사용하여야 한다^{6,7)}. 그러나 혼합고 측정과 같은 특정 고도에서의 측정인 경우에는 설치비용 및 유지 관리차원문제 등 장기적 측정이 사실상 불가능하기 때문에 후자에 의한 측정방법을 선호하고 있다. 또한 라디오존데(radiosonde)를 사용한 관측 자료 역시 한 고도에서만 얻을 수 있을 뿐만 아니라 자료 역시 시간적·공간적으로 너무 드물게 분포되어있어서 국지 대기오염예측과 같은 모델링에 직접 이용하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 대기오염확산모델의 경우 특정 경험식(e.g., P-G' curve)에 주로 의존할 수밖에 없는 실정이다⁸⁾. 따라서 보다 효율적으로 대기질을 예측하기 위해서는 연구대상지역의 기상특성을 모델에 직접 반영함으로써 오염물질의 확산특성을 정확히 모의할 수 있는 확산모델이 필요하다^{9,10)}.

이에 이 연구는 대기의 난류특성을 설명할 수 있는 변수인 friction velocity(이하 u_*), convective velocity scale(이하 w_*), Monin-Obukhov length scale(이하 L) 등을 중심으로 하는 확산식인 대기오염추계모델(Air Pollution Simulation Model, 이하 APSM)을 구성하여 모델의 예측능력 검토를 시도함으로써 보다 체계적인 대기질 관리를 위한 대기오염확산모델의 개발 가능성을 검토하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 확산식의 구성

APSM은 대기가 불안정한 상태의 혼합층(CBL : Convective Boundary Layer)에서 부력에 의한 상승(elevate and buoyant)을 고려한 오염물질에 대한 지상농도예측을 목적으로 하고 있다. 또한 식(1)과 같이 확산식의 기본구성은 연직속도에 대한 확률밀도함수모델(PDF : Probability Density Function model)을 사용한 연직확산항(CWIC : Crosswind Integrated Concentration)과 Draxler(1987), Wilkzak와 Phillips(1986)가 제안한 경험식을 중심으로 한 수평확산계

수 산출방법을 중심으로 수평확산특성(HDF : Horizontal Dispersion Function)을 구성하였다^{11,12)}. 확산식과 관련한 각각의 변수에 대한 부가적인 설명은 2.2, 2.3에 자세하게 나타내었다.

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

여기서 CWIC는 $\int \chi dy = (Q/x) P_w(w_z | z_s)$,

$$\chi = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \sigma_x \sigma_y} \exp\left\{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)\right\} \exp\left\{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right\},$$

HDF는 $\frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma_y} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]$ 그리고,

σ_y, σ_v, F_y 는 각각 아래와 같다.

$$\sigma_y = \sigma_v \cdot t \cdot F_y$$

$$\sigma_v = w_* \cdot 0.74 \cdot \left\{0.5 \cdot \left(2 - \left(\frac{z}{z_i}\right)^{1/2}\right)\right\} + 0.3 \cdot \left(\frac{z}{z_i}\right)^{1/2}$$

$$F_y = \left\{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{x}{u \cdot T_L}\right)^{1/2}\right\}^{-1}$$

특히 수평확산항을 구성할 경우 라그랑지 시간규모(T_L)에 대한 신중한 고려가 필요하다. 이에 이 연구에서는 박기학과 윤순창⁹⁾이 Willis와 Deardorff 그리고, Kaimal 의 연구 결과를 기초로 시간규모를 60(sec)부터 1800(sec)까지 8단계로 구분하여 사전 최적화 작업을 거친 후 선택한 값($T_L = 680$ sec)을 적용하였다.

2.2. 연직확산항(σ_z)의 구성

현재까지 널리 이용되고 있는 가우스형 확산모델들은 대기중에서 오염물질의 연직방향의 확산을 설명하기 위하여 바람의 연직속도는 평균값을 중심으로($w=0$) 정규분포를 이루고 있는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 실제 많은 연구에서 혼합층에서 연직속도 분포가 $w=0$ 를 중심으로 정규분포(normal distribution)를 이루지 않는다는 사실이 제기되고 있다¹³⁾.

이와 같은 사실은 부력을 얻은 플룸(plume)이 상승할 경우 하강기류에 의한 하강(down draft)성분이 상승기류에 의한 상승(updraft)성분보다 약 60% 정도 더 크며, 이는 하강 시 보다 상승 시의 난류가 더 강한데서 기인하기 때문이라는 연구결과 등에서 제시한 바 있다^{14,15)}.

따라서 대기가 불안정한 상태에서 기존의 가우스형 확산모델에서 적용하고 있는 혼합층에서 연직속도 분포가 정규분포를 형성한다는 이론은 결론적으

로 대기오염확산예측모델의 예측능력 저하에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다. 특히 바다와 인접한 해안지역에서의 대기오염현상은 대기가 불안정한 상태를 지속할 경우 대기오염의 확산은 해륙풍의 영향을 받아 입자의 대부분이 지면 가까이 도달할 때까지 계속해서 풍하(downward)방향으로 이루어지며, 낮 시간에는 혼합층이 육지에서 형성된다는 사실에 주목할 필요가 있다. 이때 배출원 가까이에서 대기오염이 높게 관측될 수 있다는 가능성은 공업단지 주변 환경에 대한 대기오염 평가 시 대기가 안정한 상태뿐만 아니라 불안정한 상태에서도 역시 공업단지로부터 발생하는 대기오염관리에 신중한 고려가 요구된다는 사실을 짐작케 하고 있다^{13,15}.

따라서 본 연구에서는 혼합층에서 오염물질의 확산을 설명하기 위하여 기존의 σ_z 의 산출방법에 대하여 Weil and Furth, Misra, 그리고 Venkatram등 많은 연구에서 검토된 바 있는 확률밀도함수(PDF) 모델을 도입하여 오염물질의 연직방향의 확산을 설명하고자 하였다¹⁶.

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, 최초 배출원에서 배출당시 연직속도가 혼합층 내 모든 확산과정에 걸쳐 보존되는 것으로 가정하면(horizontal flow velocity, $u=\text{constant} \therefore \text{along-wind dispersion}=0$), 지면으로부터 높이 z 에서 배출원에서 배출된 입자가 path 1, 즉 $\Delta z (z - \Delta z < z < z + \Delta z)$ 을 지날 때 z 에서의 농도는 $QP(w_1 | h_s) \Delta w_1$ 로서 나타낼 수 있다. 여기서 Q 는 배출량이고, $P(w_1 | h_s)$ 는 배출원의 높이(h_s)에서의 연직속도(w_1)에 대한 PDF이다. 따라서 $w_1 = u(z - h_s)/x$, $\Delta w_1 = u \Delta z/x$ 로서 나타낼 수 있으며, Δz 에 대한 질량보전을 고려하면 다음 식(2)과 같이 나타낼 수 있다^{9,16}. 여기서 $\overline{C_1^y \Delta z u} = QP(w_1 | h_s) u \Delta z/x$, $\overline{C_1^y}(x, z) = Q \sum_{n=1}^{\infty} P(w_n | h_s)/x$ 이며, 또한 P_w : Probability density function (PDF), $\int_{-\infty}^{+\infty} P_w dw = 1$ 이다.

$$C^y(x, z) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, z) dy = \frac{Q}{x} P_w(w_n | h_s) \quad (2)$$

PDF이론을 도입한 모델은 바람의 연직속도의 변동성분(w)에 대한 P_w 에 따라 다르지만 바람의 연직속도의 변동성분(w)을 1로 하고 하강과 상승에 따른 분포를 각각 0.6과 0.4의 비율로서 설정한

결과를 기초로 하는 Baerentsen 과 Berkowicz(1984)의 PDF모델이 널리 이용되고 있다.

이에 본 연구에서는 Baerentsen 과 Berkowicz (1984)가 제안한 PDF모델을 사용하여 다음식(3)과 같이 연직방향의 대기오염물질의 확산을 설명하였다¹⁵.

$$P(w) = \frac{a_+}{\sqrt{2\pi\sigma_+}} \exp\left(-\frac{(w-w_+)^2}{2\sigma_+^2}\right) + \frac{a_-}{\sqrt{2\pi\sigma_-}} \exp\left(-\frac{(w+w_-)^2}{2\sigma_-^2}\right) \quad (3)$$

여기서 $a_+, a_-, \sigma_+, \sigma_-, w_+, w_-$ 는 각각 상승과 하강에 따른 발생빈도(up and downdraft frequencies of occurrence)와 속도(up and downdraft velocity) 그리고 상승과 하강난류에너지(turbulent energy of updraft and downdraft)를 나타내며, 또한 $\sigma_+ = w_+, \sigma_- = w_-$ 이다.

그리고 $w_- = \sigma_- = [(S_w^6 + 8\sigma_w^6)^{1/2} - S_w^3]/4\sigma_w^2$, $w_+ = \sigma_+ = \sigma_w^2/2\sigma_-$ 이며, a_+, a_- 는 각각 $w_-/(w_+ + w_-)$, $w_+/(w_+ + w_-)$ 로서 0.4와 0.6이다. 또한 $\sigma_w^2/w_*^2 = \sigma_w^2/w_*^2 = 1.54Z^{2/3} \exp(-2Z) 0.8Z(1-Z)(1+0.667Z)^{-1}$, $Z = z/z_i$, z_i 로서 boundary layer height이다. w_* 는 convective velocity height로서 $w_* = (\frac{gHz_i}{C_p \rho T})^{1/2}$ 이며, w 는 Venkatram(1983)의 값 $w = 0.6w_*$ 을 적용하였다.

2.3. 난류특성변수(u_*, w_*, L)의 산출방법

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.

따라서 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 음파풍속 온도계(sonic anemometer/ thermometer)와 같은 정밀한 측정장비가 필요하다⁷.

그러나 지표면의 플럭스를 직접 관측하지 않고도 일반적으로 쉽게 이용할 수 있는 기온, 풍속과 같은 지상의 기상관측자료들을 중심으로 난류강도계산을 가능하게 하는 방법으로써 Profile method가 개발되어 L 과 같은 난류특성 계산에서 좋은 결과를 보여주고 있다. L 과 w_* 를 나타내는 기본 식은

각각 $L = -\frac{\rho C_p u_*^3 \bar{\theta}}{kgH}$, $w_* = (\frac{gHz_i}{C_p \rho T})^{\frac{1}{3}}$ 이며, 여기서 θ 는 온위, g 는 중력가속도, T 는 기온 (K), ρ 는 공기밀도(gcm^{-3}) C_p 는 정압 비열(1004 JK^{-1}), u_* 는 마찰 속도, k 는 Von Karman 상수, H 는 현열속 (sensible heat flux), z_i 는 혼합고(mixing height), w_* 는 대류속도규모(convective velocity scale)를 나타낸다.

Profile method는 지표면에서 H와 잠열(latent evaporation flux, λE)간의 에너지 수지 관계를 반복법(iterative method)을 이용하여 L산출에 필요한 u_* , w_* 등을 계산하는 방법으로써 Xu 과 Qu(1997)가 제안한 방법인 다음 식(4)~(6)을 사용하여 난류 특성변수를 산출하였다¹⁷⁾.

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_o}\right) - \Psi_M\left(\frac{z}{L}\right) + \Psi_M\left(\frac{z_o}{L}\right) \right] \quad (4)$$

$$\Delta\theta = \theta(z_2) - \theta(z_1) = \frac{\theta_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_H\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_H\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (5)$$

$$\Delta q = q(z_2) - q(z_1) = \frac{q_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_Q\left(\frac{z_2}{L}\right) + \Psi_Q\left(\frac{z_1}{L}\right) \right] \quad (6)$$

여기서 $u_* = \tau/\rho$ 로서 friction velocity (τ = wind stress, ρ = air density)이며, k 는 Von Karman constant, θ_* 는 flux temperature scale, q_* 는 flux specific humidity scale, g 는 acceleration of the gravity이다. 특히 대기가 불안정한 조건($\theta_* < 0$ or $L < 0$)을 고려하여 다음 식(7)~(8)을 적용하였다

$$\Psi_M = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

$$\Psi_{H,Q} = 2 \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right), (\Psi_H = \Psi_Q) \quad (8)$$

여기서 $x = \left(\frac{1-16z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} = \left[1 - \frac{16zk_g\theta_*}{Tz^2}\right]^{\frac{1}{4}}$ 이며,

Ψ_M, Ψ_H, Ψ_Q 는 각각 안정도 함수(stability function)를 나타낸다.

2.4. TEM 모델과 ISCST3 모델

APSM과의 예측능력 비교를 위하여 미국 EPA 권장모델(regulatory model)인 Industrial Source Complex Version 3(Environmental Protection Agency, 1979, 이하 ISC)모델과 Texas Episodic Model version 8(National Technical Information Service, 1979, 이하 TEM)을 선택하여 확산특성을

직접 비교하였다^{18,19)}.

ISC모델과 TEM 모델은 P-G의 대기안정도와 이에 따른 σ_y 와 σ_z 산출방법을 사용하고 있으며, 플룸의 고도계산 시 Briggs의 연기 상승식을 사용하고 있다. 특히 ISC(Version 3)모델은 stack-tip down wash, buoyancy-induced dispersion, final plume rise 및 지형효과를 고려할 수 있는 기능과 함께 예측기간에 따라 단기 농도예측(ISC-short term)과 장기 농도예측(ISC-long term)으로 구분하여 사용하고 있다.

또한 P-G 대기안정도 수준은 Turner(1964)의 태양 고도각을 이용한 산출방법과 Pasquill-Turner의 일사량을 이용하여 산출하는 방법을 사용하였으며, 이에 따른 수평 및 연직확산 특성은 Briggs의 도시 지역을 대상으로 한 σ_y 와 σ_z 산출방법을 사용하였다.

그 외의 자세한 사항은 EPA에서 제공하고 있는 사용자 지침에 따랐다. 또한 TEM과 ISCST 모델 운영에 필요한 기본 입력자료는 본 연구에서 제시하는 모든 모델유형과 동일한 자료를 사용하였다.

그러나 기상자료는 ISCST의 경우 1시간평균 기상자료 사용을 권장하고 있는 것에 반해 TEM의 경우 특히 σ_y 의 산출방법 시 10분 평균화 주기에 기초하여 제시되고 있기 때문에, 이에 따라 시간 평균화 주기가 길어질 경우 풍향의 교란으로 인한 수평교란(lateral meandering)이 더 크게 나타날 수 있음을 고려하여야 한다.

이에 대해 본 연구에서는 풍하(downwind)방향으로 오염물질이 정규분포를 이룬다는 전제를 고려하여 다음 식(9)과 같은 교정을 통하여 30분 평균기상자료로서 σ_y 를 산출하였다.

$$\sigma_{yt} = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{R(S)} \cdot \sigma_{y0} \quad (9)$$

여기서 σ_{yt} 는 시간 주기 t에서의 수평확산계수, σ_{y0} 는 시간 주기 t_0 에서의 수평확산계수, t_0 는 기초 시간주기(10분)를 나타내며, $R(S)$ 는 Singer-Caraway' value를 나타낸다.

Table 1. $R(S)$ value used in TEM

Atmospheric stability class	R(S)
A=1	0.675
B=2	0.550
C=3	0.425
DD=4	0.3
DN=5	0.3
E=6	0.175
F=7	0.175

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델 및 모델링 특성

3.1.1. 모델링 특성

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 400(m) 로서 174.36~181.56 TM-X(km), 421.96~427.95 TM-Y(km)내로 구성되어 있으며, 모델링 영역은 대체로 평탄한 지형을 이루고 있다.

추적자 실험 시 배출원으로 선정된 지점은 지상으로 부터 16m높이의 건물 옥상으로써 격자계 176.6(TM-X)~424.1(TM-Y)상에 위치하고 있다. 또한 배출지점에서의 기상장은 자동기상장치(Auto-matic Weather Station System, Compell, Inc., 이하 AWS)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 theodolitesonde (Atmospheric Instrumental Research Inc. U.S.A)를 사용하여 측정된 상층대기자료(고도별 온도, 습도, 기압, 풍향, 풍속)를 근거로 고도별 온위를 계산하여 산출하였다.

3.1.2. 대기상태 분석결과

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

(degree) 그리고 기온(K)과 태양고도각(α)을 이용하여 산출한 결과 각각 2.34(m/s), 223(degree), 294.2(K) 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/m^2)로 나타났으며, L를 이용한 무차원 안정도 규모(z/L)는 -2065로써 역시 매우 큰 음의 수준($z/L \rightarrow -\infty$)으로써 불안정한 상태로 나타났다. 혼합고는 온위의 연직분포를 조사한 결과 500m인 것으로 나타났다.

3.2. 추적자 실험결과

추적자 실험은 지상으로 부터 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 풍하방향으로 풀림이 비교적 잘 혼합될 수 있는 거리($= 3 \cdot z_i \cdot u/w_*$)와 평균풍속간의 관계로부터 각각 약 3000m와 1시간으로 정하였다.

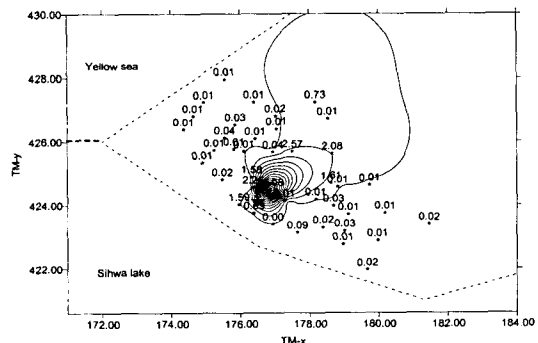
따라서 대기 중으로 추적자로 사용되는 SF6가 정규분포를 형성한 후 Teflon air bag을 사용하여 포집하였으며, 전자포획검출기(electronic capture detector)를 장착한 Gas Chromatography(HP 5890, Hewlett & Packard Inc. U.S.A)로써 분석하였다. 추적자 실험결과를 TM좌표(174.36~181.56 TM-X, 421.96~427.95 TM-Y)상에 도시한 결과 전반적인 농도분포는 주(主)풍향방향인 남서방향(223 degree)으로 확산되는 경향을 보였으며, 배출원으로부터

Table 2. Meteorology datas 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)



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.

가까운 거리(=1415m)까지는 비교적 높은 농도분포를 보였으나, 그 이후 지점부터는 대기중으로의 활발한 확산으로 인해 낮은 농도분포 경향을 보였다²⁰⁾.

3.3. 모델링 결과

가우스형 확산모델은 수평방향과 연직방향에 대한 농도분포가 정규분포(normal distribution)를 이룬다는 가정을 전제로 확산식을 구성하기 때문에 수평방향의 바람변화와 연직방향의 바람변화를 나타내는 σ_y 와 σ_z 의 결정은 확산모델식의 구성에 있어서 매우 중요하다.

특히, 연직방향의 바람변화를 나타내는 연직확산계수는 기존의 모델유형들이 추적자 실험결과를 기초로 하여 P-G 대기안정도의 등급에 따른 분류방법을 기준으로 산출한 데 반해서 본 연구에서는 확률밀도함수모델 도입을 시도했기 때문에 모델의 예측결과는 주로 수평확산계수의 크기에 따라 좌우된다.

기존의 가우스 확산모델에서 이용하고 있는 P-G 대기안정도 등급에 의한 σ_y 의 수준은 모델특성에 따라 각기 다른 산출방법을 적용하고는 있으나 매우 안정한 등급(F)에서부터 매우 불안정한 등급(A)까지의 6~7가지 수준으로 제한되어 있다. 따라서 모델의 예측농도분포에 대한 신뢰성은 풍하거리의 중심선(center line)상 거리 변화에 따른 농도를 비교하는 것이 바람직할 것으로 사료되었다.

이 연구에서는 추적자 실험결과와 제한성과의 적합도 평가를 고려하여 중심선 상(center line)의 풍하거리를 1st site(332m), 2nd site(1415m), 3rd site(2581m), 4th site(3114m)의 4개 지점을 중심으로 모델의 예측결과를 비교하였다. 특히 TEM과 ISCST 모델을 분석한 결과 풍하거리에 대해서 주 풍향(mean wind direction)을 중심으로 좌·우 방향으로 각각 45 degree범위 내로 확산을 제한하고 있는 점을 고려해서 본 연구에서도 TEM과 ISCST 모델간의 예측결과비교를 위하여 풍하거리에 대해서 주 풍향을 중심으로 좌·우 각각 45 degree범위 내에서의 확산만을 고려하도록 모델을 설계하였다.

연구대상지역의 기후자료로부터 산출한 w_* 는 이미 여러 연구에서 실제 관측한 범위($1 < w_* < 2.5$ m/s ; Deardorff 와 Willis(1975))내에 속하는 수준(1.03 m/s)이었으나 u_* 는 0.57(m/s)로서 지표 층(surface boundary layer)에서의 u_* 의 일반적인 수준(0.1~0.3 m/s)보다는 다소 크게 나타났으며, 이는 지면거칠기(roughness)의 차이에서 비롯되는 것으로 사료되었다.

배출원으로부터 가장 가까운 지점(1st site = 332 m)

에 대한 예측결과는 APSM이 35.08 ppb으로 오차 범위가 -0.01(%)로서 매우 정확한 예측능력을 보였으며, TEM(=53.06 ppb)과 ISCST (=38.23 ppb)의 경우에는 예측오차가 각각 51.24(%)과 8.97(%)로서 실제 관측값에 비하여 다소 과대평가되고 있는 것으로 나타났다.

또한 배출원으로부터 1451m(=2nd site)되는 지점에서의 예측결과를 비교한 결과 APSM(-1.94 %)> ISCST(-9.57 %)>TEM(-36.31 %)순으로 나타났다.

그러나 배출원으로부터 거리가 멀어질수록(x > 2581m) 예측 결과는 모든 모델에서 높은 예측오차를 나타냈으며, 이러한 결과는 대기가 불안정하여 배출원으로부터 멀어 질수록 대기오염물질의 확산이 활발하게 이루어진 데서 기인하는 것으로 사료되었다.

따라서 근거리에서의 대기오염으로 인한 피해는 대기상태가 안정한 경우보다는 불안정한 대기상태에서 더 잘 이루어질 수 있기 때문에 불안정한 대

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

Site (downwind distance)	Observation (Tracer) (ppb)	TEM (%/ppb)	ISCST (%/ppb)	APSM (%/ppb)
1st site	35.084	53.061 /51.24	8.97 /38.23	-0.01 /38.05
2nd site	2.572	1.642 /1.638	-9.57 /2.326	-1.94 /2.522
3rd site	0.017	1682.35 /0.303	10141.18 /1.741	5182.35 /0.898
4th site	0.007	8528.57 /0.604	16405.57 /1.155	8957.14 /0.634

※ 1st site : 332m, 2nd site : 1415m, 3rd site : 2581m, 4th site : 3114m
 ※ Error(%)= ((revised model' conc.- observed conc.) / observed conc.) × 100

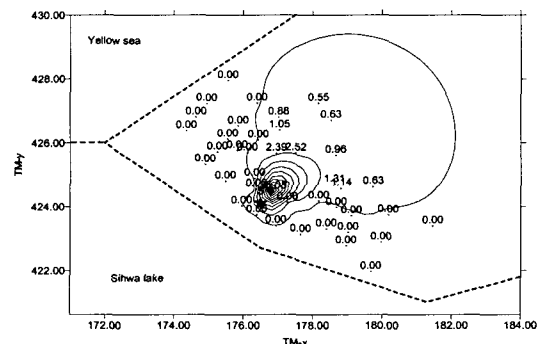


Fig. 2. Simulation result by APSM.

기상태에 대해서 보다 효과적으로 대기오염을 예측할 수 있는 확산모델이 필요하다.

3.4. σ_y 의 특성비교

가우스형 대기오염확산모델에서 사용하고 있는 σ_y 는 Pasquill(1961)이 오염물질의 수송시간(pollutant travel time, 이하 t)과 라그랑지 시간규모(lagrangian time scale, 이하 T_L) 그리고 y 방향의 평균풍속의 변동(σ_v)간의 관계로써 다음 식(10)과 같이 나타내었다.

$$\sigma_y = \sigma_v \cdot t \cdot f_y(t/T_L) \quad (10)$$

그러나 가우스형 대기오염확산모델에서 σ_y 의 경우에는 주로 추적자 실험결과를 기초로 외삽(extrapolation method)에 의한 산출방법을 따르고 있기 때문에 실험대상지역의 지형특성과 기상특성을 충분히 고려한 σ_y 산출방법의 선택이 요구된다. 이러한 사실은 Table 5와 같이 현재 널리 이용되고 있는 P-G 방법과 ISCST 모델과 TEM에서 적용하고 있는 σ_y , σ_z 산출방법이 모델에 따라 서로 다르기 때문에 결론적으로 σ_y , σ_z 산출방법이 예측능력에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 것이다.

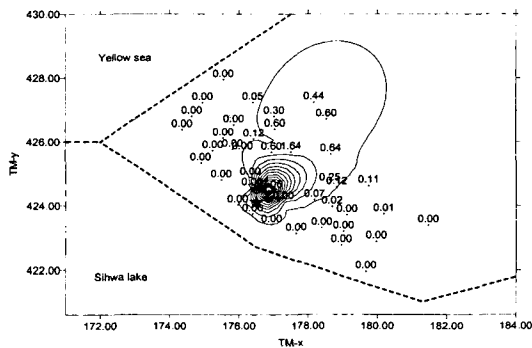


Fig. 3. Simulation result by TEM.

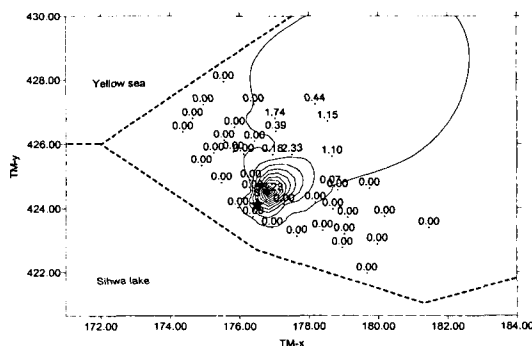


Fig. 4. Simulation result by ISCST.

따라서 대기오염확산 예측을 위한 모델 선정 시 어떠한 확산계수를 선택하느냐가 모델의 예측결과에 큰 영향을 미친다는 점을 고려하여 모델을 선정하여야 하며, 특히 σ_y 를 구성하고 있는 오염물질의 수송시간(t), 라그랑지 시간규모(T_L), y 방향의 평균 풍속의 변동(σ_v)과 같은 요인들에 대한 신중한 고려가 필요하다.

APSM과 TEM 그리고 ISCST 모델 대한 수평 확산계수의 수준을 조사한 결과 Fig. 5, 6에 나타난 바와 같이 모델에 따라 수평확산계수의 수준차이는 있었으나 전반적으로 중심선상의 풍하거리가 배출 원으로부터 멀어지는 확산양상에 따라서 커지는 것을 알 수 있었다.

특히 풍하거리의 중심선상에서 오염물질의 이동 거리에 대한 수평확산거리의 수준은 TEM(=25%) 그리고 ISCST(=26%)의 경우가 APSM(=16%)에 비해서 높은 것으로 나타났으며, 특히 배출 원으로부터 가장 가까운 지점(1st site=332m)에 대한 비교에서는 실제 관측값에 대해 가장 우수한 예측결과를 보인 APSM(=16%)의 경우가 TEM(=20%), ISCST(=25%)에 비해 수평방향으로의 확산이 작게 이루어지는 것으로 나타났다. 이는 TEM과 ISCST에서 사용하고 있는 σ_y 가 모델 개발 시 특정지역을 대상으로 지표면에서 실측된 실험으로부터 유추된 값들이기 때문에 다른 지역에 적용 시 다소의 오차를 발생시킬 수 있다는 것을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

Table 5. Comparison of σ_y and σ_z of P-G', Briggs' and TEM's with the downwind distance in the case of P-G' A class

Site	Downwind distance(m)	P-G' σ_y	Briggs' σ_y	TEM' σ_y
1st site	332	1.19	99.8	78.6
2nd site	1415	4.77	361.83	278.75
3rd site	2581	8.47	579.34	471.68
4th site	3114	10.11	664.97	554.97

Site	Downwind distance(m)	P-G' σ_z	Briggs' σ_z	TEM' σ_z
1st site	332	47.44	0.22	65
2nd site	1415	946.2	0.21	969.6
3rd site	2581	3376.78	0.196	3403
4th site	3114	5000	0.192	5037.39

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

실제로 Manju 와 Siddiqui(1997)의 경우에도 수평확산계수의 산출방법을 특징별로 각각 Irwin, Briggs, P-G, Draxler, Taylor의 5가지 유형으로 분류하여 풍하거리에 대한 수평확산거리의 크기를 비교한 결과를 분석한 결과 배출원으로부터의 거리가 1km인 지점에서는 평균 15.67%, 3km인 지점에서는 41.23%인 것으로 나타났다²¹⁾.

4. 결론

이 연구는 대기오염확산예측 시 대상지역의 다양한 난류특성을 모델에 직접 반영함으로써 보다 향상된 예측능력을 갖춘 확산모델을 개발하기 위한 기초연구과정으로써 연구대상지역의 기상상태를 설명할 수 있는 난류특성변수들로 구성된 대기오염 확산식을 중심으로 하는 대기오염 확산모델의 예측

Table 6. Comparison of σ_y / (σ_y /downwind distance) ratio between the revised model' output with the downwind distance

Site(downwind distance)	TEM	ISCST	APSM
1st site	79 /24	100 /30	71 /21
2nd site	279 /20	362 /26	233 /16
3rd site	471 /18	579 /22	367 /14
4th site	555 /18	664 /21	421 /14
Average	20	25	16

※ 1st site : 332m, 2nd site : 1415m,
3rd site : 2581m, 4th site : 3114m
※ Ratio(%) = (revised model' value / downwind distance)×100

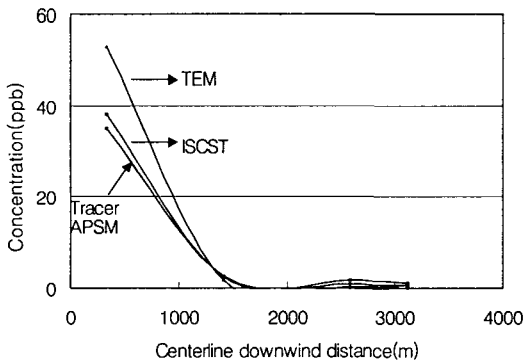


Fig. 5. Comparison of the concentration of TEM, ISCST and APSM distributed by centerline downwind distance(m).

Table 7. Comparison of the σ_y /downwind distance ratio with the downwind distance for the condition of A classified by P-G' stability category

Scheme'	NO	Downwind distance		sigma-y /1Km percent	sigma-y /3Km percent
		1Km	3Km		
Irwin'	1st	112.3	338.3	11.23	33.83
	2nd	109.3	327.8	10.93	32.78
	3rd	101.6	304.9	10.16	30.49
	Mean	107.70	323.70	10.80	32.40
Briggs' urban	1st	209.7	578.8	20.97	57.88
	2nd	209.7	578.8	20.97	57.88
	Mean	209.7	578.80	20.97	57.88
P&G'	1st	208.7	546.4	20.87	54.64
	2nd	208.7	546.7	20.87	54.67
	3rd	208.7	546.4	20.87	54.64
	Mean	208.7	546.4	20.87	54.64
Draxler'	1st	137.8	321.8	13.78	32.18
	2nd	134.9	345.9	13.49	34.59
	3rd	127.6	300.7	12.76	30.07
	Mean	133.40	322.80	13.34	32.28
Taylor'	1st	129.4	303.1	12.94	30.31
	2nd	125.3	293.7	12.53	29.37
	3rd	116.6	273.1	11.66	27.31
	Mean	123.80	290.00	12.38	29.00
Mean		156.7	412.3	15.67	41.23
Standard Deviation(±)		45.4	128.7	4.5	12.9

※ Ratio(%) = (revised model' value / downwind distance)×100
※ Revised from Manju and Siddiqui(1997)

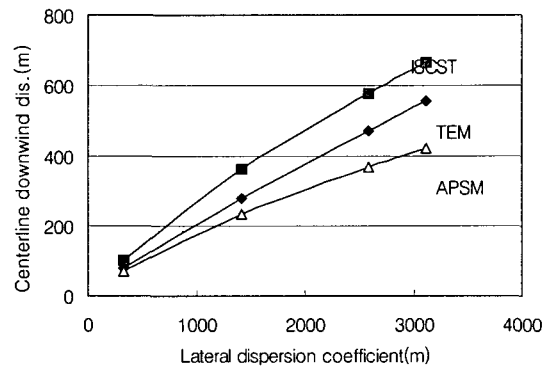


Fig. 6. Comparison of the lateral dispersion coefficient(m) of TEM, ISCST and APSM distributed by centerline downwind distance(m).

능력을 검토하였다.

이를 위해 현지 기상조건으로부터 난류특성변수 (u_* , w_* , L)를 산출하기 위한 방법으로써 Xu 과 Qu(1997)가 제안한 Profile method를 사용하였으며, σ_y 와 σ_z 는 각각 Draxler(1987) 그리고 Wilczak 와 Phillips(1986)의 경험식, Baerentsen 와 Berkowicz (1984)가 제안한 확률밀도함수인 PDF모형을 사용하여 대기오염물질의 확산을 설명하였다. 또한 기존에 사용되고 있는 가우스형 대기오염확산모델과의 비교를 위하여 미국 EPA 권장모델인 ISCST, TEM을 선택하여 추적자 실험 결과를 토대로 예측능력을 비교하였다.

연구결과 TEM과 ISCST은 풍하거리의 중심선상에서 배출원으로부터 332m 떨어진 지점에서의 예측결과가 실제 관측값 보다 각각 51.24%, 8.97% 과대평가하고 있는 것으로 나타났으며, 1415m 떨어진 지점에서는 각각 -36.31%, -9.57%로서 과소평가되고 있는 것으로 나타났다.

또한 APSM과 TEM, ISCST 모델간의 수평확산 특성을 비교하기 위하여 σ_y 의 수준을 평가한 결과 배출원으로부터 가장 가까운 지점(=332m)에서 σ_y 의 크기는 APSM이 86m, 그리고 TEM과 ISCST는 각각 79m, 100m로 나타났다.

이처럼 TEM과 ISCST에서 σ_y 수준차이가 발생한 것은 각기 모델에서 사용하고 있는 σ_y 산출방법이 지표면에서 관측된 각기 다른 실험값으로부터 유추된 값을 사용하고 있기 때문인 것으로 사료되며, 이러한 사실은 타 지역에 적용 시 그 지역의 특성을 제대로 반영하지 못함으로써 궁극적으로는 예측능력저하에 큰 영향을 미칠 수 시킬 수 있음을 시사하고 있다.

따라서 효율적인 대기질 예측을 위해서는 기존에 사용되고 있는 대기안정도 산출방법(예, P-G curve)과 같이 제한된 범위에서(6~7등급) 대기오염물질의 모든 확산특성을 결정짓는 기존의 방법보다는 연구대상지역의 기상상태에 따른 난류특성을 모델에 직접 반영한 대기오염물질의 확산특성에 따른 예측능력을 향상시킬 수 있는 대기오염확산모델개발이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Gifford, F. A. and S. R. Hanna, 1973, Modeling urban air pollution, Atmos Environ., 7, 131-136.
- 2) Turner, D. B., 1979, Atmospheric dispersion modeling, A critical review, JAPCA, 29(5), 502

- 519.
- 3) Pasquill, F. and F. B. Smith, 1983, Atmospheric Diffusion, John Wiley & Sons.
- 4) Weil, J. C. and R. P. Brower, 1984, An updated Gaussian plume model for tall stack, JAPCA, 34, 818-827.
- 5) 김용국, 이종범, 1992, 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향변동폭의 특성, 한국대기보전학회, 8(2), 138-145.
- 6) 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.
- 7) 박문수, 1998, 복잡한 지형에서 대기 난류의 특성 분석, 서울대학교 대학원 석사학위논문, 71pp.
- 8) Turner, D. B., 1997, The long lifetime of dispersion methods of Pasquill in U.S. regulatory air modeling, J. Appl. Meteor., 36, 1016-1020.
- 9) 박기학, 윤순창, 2001, 난류특성을 이용한 대기오염확산모델의 예측 능에 관한 연구, 한국환경영향평가학회, 10(2), 123-133.
- 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) 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.
- 12) Draxler, R. R., 1987, Accuracy of various diffusion and stability schemes over Washington, D. C., Atmos Environ., 21(3), 491-499.
- 13) Venkatram, A., 1983, On dispersion in the convective boundary layer, Atmos Environ, 17, 529-533.
- 14) Weil, J. C., 1985, Updating applied diffusion models, Climate and Appl. Meteor. 24(11), 1111-1130.
- 15) Baerentsen, J. H. and R. Berkowicz, 1984, Monte Carlo simulation plume dispersion in the convective boundary layer, J. Atmos. Sci., 18(4), 701-712.
- 16) Kai, L. Z. and G. A. Briggs, 1988, Simple PDF models for convectively driven vertical diffusion, Atmos., Environ, 22(1), 55-74.

- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) U.S. National Technological Information Service(NTIS), 1979, User's guide for the Texas Episodic Model(TEM).
- 20) 이상미, 윤순창, 홍민선, 1998, SF6 추적자 실험을 통한 대기오염확산모델의 검증 평가, 추계대기보전학회 요지집, 55-56.
- 21) Manju, M. and T. A. Siddiqui, 1998, Analysis of various schemes for the estimation of a atmospheric stability classification, *Atmos Environ.*, 32(21), 3775-3781.