

粗度에 기인한 鉛直方向 大氣擴散의 增大

Enhancement of Vertical Atmospheric Dispersion Due to Roughness

박 옥 현

부산대학교 환경공학과

(1998년 3월 15일 접수, 1998년 12월 23일 채택)

Ok-Hyun Park

Dept. of Env. Eng., Pusan National Univ.

(Received 15 March 1998; accepted 23 December 1998)

Abstract

Many atmospheric dispersion models have been based on the Gaussian distribution concept of plume spread. In application of Gaussian plume dispersion models, vertical dispersion coefficient σ_z has been known as a sensitive variable. Vertical diffusivity $K_z (= \sigma_z^2/2t)$ tends to increase with surface roughness, and the value of K_z in urban area is larger than that in rural area due to heat emission as well as increased roughness.

Though Pasquill proposed a modification scheme for σ_z vs x system of Pasquill-Gifford under consideration of roughness effect in 1976, there appears not to be realistic reexamination on the modification scheme. In this study literature review on the effect of terrain or roughness on vertical plume dispersion has been carried out in order to improve the prediction results of atmospheric pollution concentration. Again a few research objectives on vertical atmospheric dispersion in complex terrain were proposed.

Key words : vertical dispersion coefficient, roughness effect, complex terrain, vertical diffusivity

1. 서 론

와동확산 편미분 방정식들에 대한 유한 차분법 등의 수치해석법을 제외한 많은 대기확산 모델들은 기본적으로 正規煙 모델들에 기초하고 있다. 이들 정규연 모델들의 입력자료 오차 및 불확실성에 대한 민감도를 조사했던 Hilst (1970)에 의하면 반감기, 풍속, 연직방향 풍속 분포 역수, 혼합고, 분산계수, 面源格子線간격, 방출고, 농도평가지점위치 등 여러 변수들을 평균치, 평균치의 1.5배 및 0.5배에 해당하는 값으로 각각 취하여 확산식들에 적용했을

때 평균치 적용의 경우에 비해 50% 이상의 출력 변화를 나타내는 변수를 민감한 변수로 판정할 때 물질방출강도, 풍향, 연직방향 분산계수 및 반감기가 유의하게 민감한 변수들에 해당한다.

이중에서 σ_z (plume의 연직방향 퍼짐의 표준편차로서 분산계수)가 보전성 오염물질 확산 평가의 정확도 개선에 특히 중요한 의의를 갖는 기상 변수이나 Pasquill-Gifford시스템의 σ_z 값은 원래 0.5 m 높이에서 방출된 tracer 확산실험자료에 기초한 것으로서 방출고도가 30 m 이상 높은 경우엔 적용할 수 없으며, 보다 높은 고도에서 방출된 경우 plume이 풍하쪽으로 이동함에 따라 plume 단면중심위치가

연직방향으로 변동하기도 하고, 단면퍼짐이 커지면서 그 아래부위에 속한 물질들이 땅에 가까워지면서 기온 성층화로 인해 확산률 $K_z (= \sigma_z^2/2t)$ 이 달라질 수 있다. 이 확산률은 완만한起伏이 있는 지형, 혹은 숲이 우거진 지형에서는 粗도가 커짐에 따라 증대되는 경향이 있다. 도시에서의 확산률이 시골지역에서의 그것보다 더 큰 이유는 이 粗度뿐만 아니라 여러 배출원들로부터의 열방출 때문이다. Prairie-Grass 실험조건인 시골 평탄한 초원에 해당하는 粗度길이 $z_0 \approx 3$ cm 이상의 경우엔 Smith (1972)의 노모그램에 기술된 인자들을 적용한다고 Pasquill (1976)은 P-G system에 대한 수정안을 제시한 바 있으나 이것이 충분한 교정안인가에 대한 실증적 재검토는 없었던 것 같다.

또한 Smith의 교정표는 널리 적용되지 못해 왔으며 시골 평탄한 지형이면 나락(rice)이 성숙한 가을, 낮은 가옥들이 조밀한 경우이나 들판에 식물이 자라지 않은 겨울, 가옥들이 散在한 경우에도 z_0 값에 따라 교정되지 않은 P-G system의 기본 노모그램으로부터 σ_z 를 구하여 적용하는 경향을 보여왔다. 이 연구에서는 대기오염 농도 평가의 정확도 개선을 위해 plume의 연직방향 퍼짐에 미치는 지형 내지 조도의 영향에 관한 기왕의 문헌들을 고찰하면서 복잡한 지형상 대기확산에 관한 연구의 몇가지 목표들을 제시하고자 하였다.

2. Smith의 σ_z 교정식

Smith의 노모그램을 다시 처리해서 식 (1) (McMullen, 1975)에 대입할 I, J, K 값들을 구해서 도시하면 그림 1과 같다.

$$\sigma_z = \exp [I + J(\ln x) + K(\ln x)^2] \quad (1)$$

여기서, σ_z 는 연직방향 분산계수(m), I, J, K는 상수이며 x는 거리(km)이다.

Smith에 의해 수정된 거리 x에 따른 σ_z 노모그램은 그림 2와 같다.

3. Smith의 σ_z 교정법에 대한 보완

Smith의 노모그램을 立式하는 과정에서 검토되지 않거나 기술되지 않은 요소들을 정리해 볼 필요

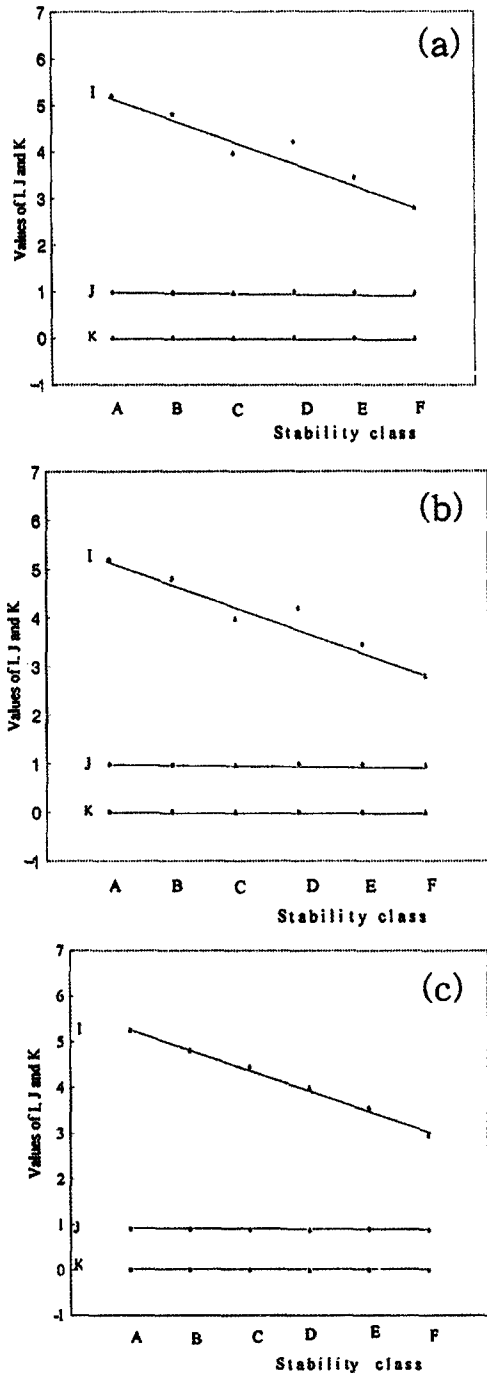


Fig. 1. Values of I, J and K in the equation (1) for various stability and roughness conditions. (a) $Z_0 = 10$ cm, (b) $Z_0 = 30$ cm, (c) $Z_0 = 100$ cm

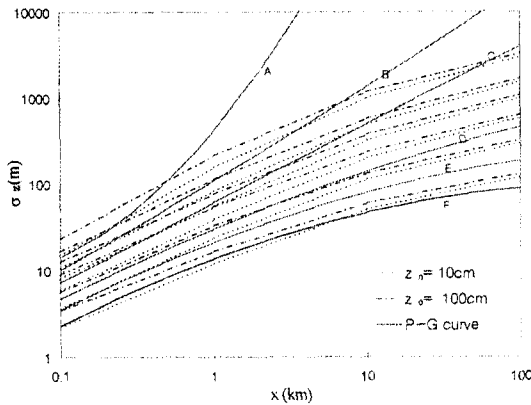


Fig. 2. σ_z vs. x nomogram modified by Smith.

가 있는 것 같다. Robert와 Fryer-Taylor(1994)는 실제 길이의 1/100로 축척한 風洞실험을 통해서 실제 scale 0.5 m 이하의 조도길이를 가진 지형에서는 Gaussian plume 모델이 잘 적용될 수 있으며 plume 幅은 물론 plume 두께가 조도길이 z_0 에 따라 증가함을 실증하였다. 일반적으로 σ_z 의 거리, 조도 및 안정도 의존성은 식(2)로 표현된다.

$$\sigma_z(m) = a \cdot x^b \quad (2)$$

여기서 a 와 b 가 각각 z_0 와 안정도의 함수이며 x 는 거리(km)이다. 식(2)는 일반적으로 식(1)보다 평가 정확도가 떨어지는 기본적인 멱수함수이다. 보다 큰 조도에 대해서는 조도요소들의 配列에 따라 달라지며 σ_z 는 실험 실행조건들에 민감하게 변한다. 배출원 영향은 조도길이가 길어짐에 따라 저감된다. 또한 그들에 의하면 (i) cloud 깊이에 비해 그 치수가 큰 장애물 근처의 확산예측의 입증된 방법은 없다. 이때는 z_0 가 현장확산에 사용하기 위한 적절한 파라미터인지에 대한 의문이 따른다. (ii) 어떤 process site에 대해 어떤 z_0 값이 할당되어야 하는가를 정하기 위해서는 측정과 관측에 의존해야 하는데 변하는 z_0 의 경계층 모의를 위해 물리적 유체 모델을 사용해서 확산거동을 관찰하고 이들을 실제 site에서의 모델예측결과와 비교하는 것이 필요하다. 만약 이 과정이 성공적이면 조도길이에 의해 실제 site를 어떻게 파라미터화 하는가 하는 문제가 조사될 수 있다. 고정된 조도분포에서는 풍동 풍속 변화에 의해 확산에 어떤 강한 체계적 영향은 생기지

않았다.

3.1 건물 밀집지역에 대한 σ_z 수정식

Industrial Source Complex (ISC) 확산모델 (Bourer 등 1979)에서는 낮은 건물들에 대해서 식(3)과 같은 σ_z 수정식을 사용한다.

$$\begin{aligned} \sigma_z' &= 0.7h_b(m) + 0.067[x(m) - 3h_b(m)] : \\ & 3h_b(m) < x(m) < 10h_b(m) \text{ 인 경우} \\ & = \sigma_z[x(km) + x_v(km)] : x(km) \geq 10h_b(m) \text{ 인} \\ & \text{경우} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, h_b : 건물높이(m)이며 x_v 는 연직방향 유효거리(virtual distance)로서 식(5) 및 식(6)에 의해 정의된다.

한편 높은 건물에 대해서는 h_b 대신에 h_w (m)를 식(4)와 같이 대체하되 h_w 는 건물의 수평면적과 같은 면적을 가진 어떤 원의 직경에 의해 근사적으로 구해진다.

$$\begin{aligned} \sigma_z' &= 0.7h_w(m) + 0.067[x(m) - 3h_w(m)] : \\ & 3h_w(m) < x(m) < 10h_w(m) \text{ 인 경우} \\ & = \sigma_z[x(km) + x_v(km)] : x(km) \geq 10h_w(m) \text{ 인} \\ & \text{경우} \end{aligned} \quad (4)$$

σ_z' 는 식(1)에 의해 주어지는 점원에 대한 σ_z 값보다 작은 값이 허용되지 않는다. 낮은 건물 및 높은 건물들에 대한 연직방향 유효거리(virtual distance: 장애물들로 인해 증대된 연직방향분산과 등가의 plume 분산을 야기할 수 있는 가상적인 平坦地上 点源으로부터의 거리) x_v 는 각각 식(5) 및 식(6)에 의해 표현된다.

$$x_v = \left(\frac{1.2h_b}{a} \right)^{1/b} - 0.01h_b \quad (5)$$

$$x_v = \left(\frac{1.2h_w}{a} \right)^{1/b} - 0.01h_w \quad (6)$$

여기서 a 및 b 는 식(1)의 그것들과 같다.

3.2 복잡한 자연지형에서의 연직방향확산특성

Zegadi 등(1994)의 風洞실험에 의하면 난류(turbulent flow)의 운동학적 및 열적특성 그리고 확산특성 모두가 하나의 낮은 언덕같은 간단한 지형

을 만나서도 변화되며, 언덕 때문에 유발된 요동(perturbation)은 평균풍속 및 온도저감보다 더 멀리까지 지속된다. 또한 경계층 두께의 1/8 정도되는 낮은 언덕 장애물에서도 후류부(wake)에서는 Reynold stress ($\overline{u'w'}$), 연직방향 및 풍하방향 와동속도 w' 및 u' 의 r.m.s. 값 그리고 요란 열 flux ($\overline{w'\theta'}$) 등에 있어 장애물 없는 지형에 비해 몇배나 큰 요동이 관찰됐으며 후류부에서의 평균 및 요동치들이 $[(X-X_c)/L]^{-1}$ (여기서, X ; 좌표계 원점(풍동입구)으로부터 하류측 거리, X_c ; 좌표계 원점(풍동입구)으로부터 언덕 정상지점까지의 거리, L ; 언덕 정상으로부터 풍상측으로 언덕최대 높이 절반지점까지의 거리)에 따라 감소하는 것으로 밝혀졌다. 이들 요동과 후류부 영역두께는 대기가 안정할수록 증가한다. Taylor 등(1987)은 당시까지 이루어진, "낮은 언덕을 지나는 경계층 기류"에 관한 13개 지역 연구 보고들을 조사·고찰하고 언덕(hill; 높이 약 100m까지, 길이가 약 1km까지의 지형) 장애물로 인한 난류(turbulence)변화에 관한 이해를 개선하는 문제가 장차의 연구 과제라고 논급하였으나 그로부터 10여년이 지난 지금까지도 이 문제에 관한 체계적 조사가 이루어지지 못한 것 같다. Gong(1991)에 의하면, 유선의 수렴과 발산을 포함한, 언덕들에 의해 유발된 평균흐름에 있어서의 요동이 확산에 있어서의 변화를 지배하는 것이다. 연직방향으로의 plume 퍼짐은 언덕의 風上側 아랫부위(foot)에서 증대되고 언덕 정상부에서 감소되며 유선의 발산-수렴 정도에 따라 더욱 증대 혹은 감소될 수 있다. 완만한 hill의 경우에 있어 상류측 배출원으로부터 나온 plume의 난류확산에 관한 지형영향은 격심하지는 않으나(moderate) 2차원 언덕보다 3차원의 것에 의해 더욱 커진다. 언덕들에 의해 유발된 확산 파라미터들에 있어서의 변화를 Gong(1991)이 검토한 바에 의하면 풍상측에서 배출된 plume 확산에 대한 언덕의 영향은 확산 파라미터들에서 보다 잘 관찰되며 2차원보다 3차원 언덕에서 더욱 커진다. 2차원 언덕으로 인한 연직방향 확산에의 영향은 보다 낮은 배출원들에 대해 더 잘 관찰된다.

3.3 운동량에 의한 연직방향 확산률, $K_M(z)$

지구경계층에 관한 물리적으로 실제적인 모델들을 생각해 내기 위해 모든 관련 파라미터들의 연직

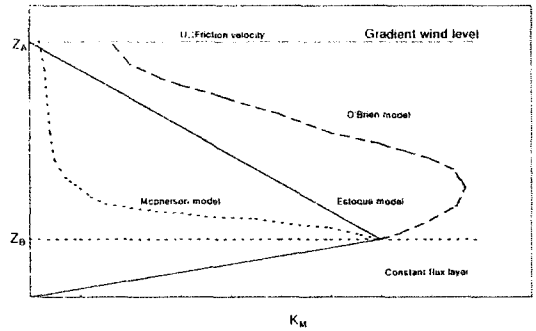


Fig. 3. Profile of vertical diffusivity by momentum.

방향 분포에 관한 양호한 물리적 이해를 갖는 것이 필요하고, 가장 중요한 파라미터는 운동량에 의한 연직방향 확산률, $K_M(z)$ 이며 K_M 분포 및 그 1차 도함수가 높이에 따라 연속적이어야 한다는 요건을 감안하면 K_M 는 다음과 같이 구체화될 수 있으며 이 식이 수치모델에서 보편적인 가정이다(O'Brien, 1970).

$$K_M(z) = \frac{ku_*z}{(1 + \phi(z))} \tag{7}$$

여기서 k : Karman 상수

$\phi(z)$: 안정도 함수(불안정조건시(-), 중립조건시 zero, 안정조건시(+)).

운동량에 의한 연직방향 확산률의 고도에 따른 분포는 그림 3과 같다.

$K_M(z)$ 는 특히 대기가 불안정시에 z_A 에서 반드시 zero여야 한다. $z_A \approx u_*^2/f$ (여기서 u_* ; 마찰속도, f ; Coriolis 파라미터)

식(7)을 미분하지 않고 z_A 및 z_B 만을 써서 간단히 $K_M(z)$ 를 구하면 식(8)과 같다.

$$K_M(z) = K_A + \left[\frac{(z - z_A)^2}{(\Delta z)^2} \right] \times \left\{ K_B - K_A + (z - z_B) \left[K_B' + \frac{2(K_B - K_A)}{\Delta z} \right] \right\} \tag{8}$$

Lettau와 Dabberdt(1970)은 $K_M(z)$ 가 포물선 분포여야 함을 보이고 있다. barotropic(수평방향으로는 밀도 경사가 없고, 연직방향으로는 모든높이에서 같은 압력장을 갖는) 경계층에서 Lettau(1959)는 경계층구조가 Rossby수, $R_0 = V_g/z_0 \cdot f$ (여기서 V_g ; 지균풍

속, z_0 ; 표면조도길이, f ; Coriolis 파라미터)의 하나만의 함수임을 나타냈다. Liu와 Carroll (1996)은 복잡 지형에서의 확산연구에 적합한 高解詳 대기오염모델에서渦들에 의한 운동량 전달률 K_M 과 열전달률 K_H 는 Blackadar (1979)에 의해 국지경사 Richardson 수 $[g(\partial\theta/\partial z)/\theta s^2]$ 에 의존하는 것으로 만들어졌던 식들을 적용했다.

$$\text{안정조건시: } K_M = K_H = l^2 \cdot s \left(1 - \frac{Ri}{Ri_c}\right)^2 \quad (9)$$

$$\text{불안정조건시: } \begin{aligned} K_M &= l^2 \cdot s (1 - 21 Ri)^{1/2} \\ K_M &= l^2 \cdot s (1 - 87 Ri)^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 l : 혼합길이 $= 0.4z(1 + 0.4z/\lambda)^{-1}$, $\lambda = 80m$

Ri_c : 임계 Ri수 $= 0.25$

$$s : \text{국지 벡터 바람전단 (shear)} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

중립조건시 $\frac{K_M}{K_z} = \text{난류 Schmidt 수 } (= S^T)$ 이며

$S^T \approx 1$ 로 가정하는 것이 관례이므로 $K_M = K_z = ku_*z$ 이고, 여기서 k 는 von Karman 상수이다.

3.4 연직방향 와동확산률 K_z

미국에서의 복잡지형에서 많이 검증된 바 있는 MATHEW/ADPIC (M/A) 모델 (하나의 3차원 수송·확산모델)에서는 대기경계층 밖에서의 K_z 값을 다음 식으로 평가하도록 정하고 있다 (Desiato, 1991).

$$K_z = ku_*z [\phi(z/L)]^{-1} \cdot \left[\exp\left(-\left|\frac{V_g}{u_*}\right| \cdot (z/h)\right) \right] \quad (11)$$

여기서 $\phi(z/L)$; Monin-Obukhov 길이 L 과 높이 z 에 기초한 대기 안정도 함수, h ; 혼합고 $= 0.4(u_* \cdot L/f)^{1/2}$ 이다 (Zilitinkevich, 1972).

Ragland와 Dennis (1975)에 의하면 각 안정도 조건별, 고도에 따른 풍속 및 와동확산률의 분포는 표 1과 같다. 여기서 $x = [1 - 15(z + z_0)/L]^{1/4}$ 이고 $x_0 = (1 - 15z_0/L)^{1/4}$ 이다. 또한 Z_{SL} 과 Z_m 은 각각 표면층 두께 및 혼합고이다.

3.5 마찰속도, u_*

Lettau (1959)에 의하면 中立조건시

Table 1. Variation of eddy diffusivity and wind speed with stability, height and roughness.

Stability	Vertical distance z	Wind speed u	Eddy diffusivity K_z
within surface layer	neutral $0 < z < Z_{SL}$	$\frac{u_*}{0.4} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right)$	$K_z = 0.4u_*z$
	stable $0 < z < Z_{SL}$ and $0 < z < L$	$\frac{u_*}{0.4} \left[\ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) + \frac{5.2z}{L} \right]$	$K_z = \frac{0.4u_*z}{\left(1 + \frac{5.2z}{L}\right)}$
		$L < z < Z_{SL}$	$\frac{u_*}{0.4} \left[\ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) + 5.2 \right]$
	unstable or $0 < z \leq 12L$	$\frac{u_*}{0.4} \left[2(\tan^{-1}x - \tan^{-1}x_0) + \ln\left(\frac{x-1}{x_0-1}\right) - \ln\left(\frac{x+1}{x_0+1}\right) \right]$	$K_z = 0.4u_*z \cdot (1 - 16z/L)^{1/4}$
above surface layer	neutral $Z_{SL} < z < Z_m$	$(u_g - u_{SL}) \left(\frac{z - Z_{SL}}{Z_m - Z_{SL}} \right) + u_{SL}$	$K_z = 0.4u_*Z_{SL}$
	stable $Z_{SL} < z < Z_m$	$(u_g - u_{SL}) \left(\frac{z - Z_{SL}}{Z_m - Z_{SL}} \right) + u_{SL}$	$K_z = 0.4u_*L$
	unstable or $12L < z < Z_m$	$(u_g - u_{SL}) \left(\frac{z - Z_{SL}}{Z_m - Z_{SL}} \right) + u_{SL}$	$K_z = 160u_*^3 \cdot (1 - 6000u_*/L)^{1/4}$

$$u_* = \frac{0.16V_g}{\log R_0 - 1.8} \quad (12)$$

Wang과 Chen(1980)에 의하면 불안정조건시

$$u_* = \frac{0.4u}{\ln[(z-d)/z_0]} [1 + d_1 \cdot \ln(1 + d_2 \cdot d_3)] \quad (13)$$

여기서,

$$d_1 = 0.128 + 0.005 \ln \left[\frac{z_0}{(z-d)} \right]; \frac{z_0}{(z-d)} < 0.01 \text{의 경우}$$

$$= 0.107; \frac{z_0}{(z-d)} > 0.01 \text{의 경우}$$

$$d_2 = 1.95 + 32.6 \left[\frac{z_0}{(z-d)} \right]^{0.45}$$

$$d_3 = \frac{Q_H \cdot 0.4g(z-d)}{\rho \cdot C_p \cdot T} \left[\frac{\ln \{(z-d)/z_0\}}{0.4u} \right]^3 \text{ 이고}$$

여기서 Q_H 는 顯熱 flux이다.

Holtslag와 van Ulden (1983)에 의하면 Q_H 는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$Q_H = \left[\frac{(1-\alpha) + S}{1+S} \right] (Q_* + Q_A - Q_G) - \alpha\beta' \quad (14)$$

여기서, α ; Penman-Monteith 표면 溫熱可用계수

$$S; \frac{C_p}{\left(L_c \cdot \frac{dq_s}{dT} \right)}$$

$$L_c; \text{잠열, } \frac{dq_s}{dT}; \text{포화比濕度}$$

곡선의 기울기

Q_* ; 순복사 flux

Q_A ; 인위적 열입사량

Q_G ; 지표면 열 flux = $0.1 Q_*$ (시골)
= $0.3 Q_*$ (도시)

β' ; 상수로써 $20W/m^2$ 로 가정

안정조건시엔 식 (15)와 같이 u_* 값이 평가된다 (Wang과 Chen, 1980).

$$u_* = \frac{0.2u}{\ln[(z-d)/z_0]} \left[1 + \left\{ 1 + 4(4.7g \cdot z \cdot Q_* \cdot \frac{\ln((z-d)/z_0)}{0.4T \cdot u^2}) \right\} \right] \quad (15)$$

축척온도(단위; °K)의 첫 평가치 $Q_{*1} = 0.09(1 - 0.5N^2)$ 이며 여기서 N ; 분율로 나타낸 층운량이다.

u_* 의 높이 의존성은 식 (16)과 같이 나타낸다 (Rotach, 1993).

$$\frac{\langle u_*(z) \rangle}{u_{*r}} = C_1 [1 - \exp(-C_2 z')]^{1/3} \quad (16)$$

여기서 u_{*r} ; 참조고도에서의 마찰속도, $\langle u_*(z) \rangle$; $u_*(z)$ 의 평균, z' ; $z-d$, C_1, C_2 ; 계수, $1/3$; 보다 나은 적합을 위해 물리적 합리성없이 도입된 멱수이다. Q_* 의 상한치 Q_{*2} 는 다음과 같다.

$$Q_{*2} = \frac{0.4T \cdot u^2}{\left[18.8g \cdot z \cdot \ln \frac{(z-d)}{z_0} \right]} \leq \frac{0.05 (^\circ K \cdot m/s)}{u_*(m/s)} \quad (17)$$

여기서 T ; 표면부근 기온(°K), d ; 변위길이(displacement length)

식 (15)의 Q_* 는 Q_{*1} 과 Q_{*2} 중에서 작은 것과 같다.

3.6 複合因 擾亂 (mixed turbulence)에 의한 연직방향 分散, σ_z^2

Hanna(1984)에 의하면

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zb}^2 + \sigma_{zi}^2 \quad (18)$$

이며 σ_{zb} 는 σ_z 의 浮力成分, σ_{zi} 는 σ_z 의 난류 성분이고, $\sigma_{zb} = 0.4He$ (여기서 He : 굴뚝 底에서 plume 중심축까지의 높이)이다. 와동에 의한 연직방향분산은;

$$\sigma_{zi}^2 = i_r \cdot x \cdot S_z(x) \quad (18-1)$$

여기서 $i_r = (\overline{w^2})^{1/2}$; 연직 방향 난류강도이고, $S_z(x)$; 무차원 함수로서 배출원 근처에선 1이고, 멀리 떨어져질수록 거리에 따라 서서히 감소한다. 중립, 안정, 불안정조건들에 대해 공히,

$$S_z(x) = 1.0; \text{ 낮시간, } u < 8 \text{ m/s 일 경우}$$

$$= (1 + 0.0003x)^{-1}; \text{ 밤시간, } u < 8 \text{ m/s 일 경우} \quad (18-2)$$

$$= (1 + 0.0015x)^{-1/2}; \text{ 어느 시간이나, } u > 8 \text{ m/s 일 경우}$$

3.7 연직방향 요란속도 표준편차, σ_w

불안정 조건시 ($L < 0$), Panofsky 등(1977)에 의하

면

$$\sigma_w = u_* [1.44 + 2.9 (-z/L)^{2/3}]^{1/2}; z/h \leq 0.1 \text{ 일 경우} \quad (19)$$

$$\sigma_w = (1.44u_*^2 + 0.35w_*^2)^{1/2}; 0.1 \leq z/h \leq 1.0 \text{ 일 경우} \quad (20)$$

안정 조건시 ($L > 0$) 지표근처에서의 σ_w 는 Panofsky 등(1977)에 의하면,

$$\sigma_w = 1.2u_* = (\overline{w'^2})^{1/2} \quad (21)$$

Banta 등(1996)에 의하면,

$$\sigma_w^2 = u_*^2 [1.6(1-z/h)^{3/2} + F(z/L)] \quad (22)$$

여기서 $F(z/L)$; 대기 안정도 함수이다.

Rotach(1993)에 의하면 $\sigma_w = A_w u_*$ 에서 A_w 는 중립 조건에서 넓은 범위의 상이한 장소에 걸쳐서, 약 1.25이지만 불안정 조건에서는

$$\sigma_w = 1.3u_* [1 - 3(z-d)/L]^{1/3} \quad (23)$$

여기서 L : Monin-Obukov 길이이다.

$\sigma_w^2 = \overline{w'^2}$ 이고, $K_z = \overline{w'^2} t_{Lz}$ 이며 여기서 t_{Lz} 은 z 방향 Lagrangian 시간 scale이다. K_z 를 $\overline{w'^2}$ 의 함수형으로 모델링하는 것은 山地유동처럼 난류특성변화가 큰 경우엔 난점이 있다(Carrol, 1993).

3.8 최소 Monin-Obukov 길이, L_{min}

길이 L 은 기계적 혼합층 깊이라고 생각될 수 있고, 건물들은 기류를 휘저어서 결과적 교란 渦들은 건물높이, 폭 및 간격에 비례하는 크기를 갖는다. 어떤 곳에서의 최소 L 을 선정하기 위해 관심의 배출원 주변에 반경 3km의 원을 그리고 그 내부의 토

지용도와 빌딩층수 등을 고려하여 최소 L 을 결정한다(Auer, 1978). 토지용도별, 빌딩높이별 최소 Monin-Obukov 길이는 표 2와 같다.

4. 결 언

복잡한 지형에서의 대기확산에 관한 연구가 적극적으로 이뤄지기 시작한지 10여년이 지났으나 복잡한 지형 자체의 형상이나 피복상태, 주변의 水陸 분포 등이 매우 다양하여 정량적 확산 평가가 극히 어려운 상태에 있다.

그리하여 풍향에 直交하는 鍾모양 단면을 가진 2차원 능선같은 간단한 경우에도 劣度(kurtosis)의 수준별로 풍속의 크기에 따라 정상부 하류 영역에서의 박리현상이나 고농도 형성지역 및 고도에 따른 농도 분포등이 달라질 것이며, 따라서 鍾 단면을 갖는 동일한 피복상태의 간단한 지형 하류부에서도 능선의 劣度, 풍속 및 대기안정도에 따라 능선 하류 쪽 거리 별로 확산능이 어떻게 달라지는지를 조사할 필요가 있을 것이다. 지형의 분류(예; 임해지형, 산악지형 등), 조도등급분류에 이어 안정도 등급에 따라 어떤 경계(예; 조도에 있어 현저한 차이가 있는 지역 경계, 혹은 산의 능선 등) 하류측에서의 난류변화 및 확산능의 변화를 체계적으로 조사할 필요가 있는 것 같다.

複合因擾亂(mixed turbulence)에 의한 확산능(예; 분산)의 변화를 열적요란 및 기계적 요란 등 成因別로 식(18)을 써서 구분하고, 또한 대류실험 수조에서 기계적 난류를 발생하는 格子板의 上下진동 stroke와 頻度の 조합이 실제 지형 및 기상조건에 있어 어떤 조합에 해당하는 기계적 난류를 유발하는 것인지에 대한 대조, 조사 등이 필요한 것 같다.

사 사

본 연구는 부산대학교 기성희 재원 학술연구 조성비에 의한 연구의 일부이며, 지원에 감사합니다.

참 고 문 헌

Auer, A.H. (1978) Correlation of land use and cover with meteorological anomalies", J. Appl. Meteor. 17,

Table 2. Minimum Monin-Obukov length.

Land-use	Building situation	L_{min}
commercial	>40 story Bd	150 m
	10~40 story Bd	100 m
	<10 story Bd	50 m
industrial	<10 story Bd	50 m
densed residential		50 m
residential		25 m
agricultural		5 m

- 636-643.
- Banta, R.M., L.D. Olivier, P.H. Gudiksen, and R. Lange (1996), Implications of small scale flow features to modelling dispersion over complex terrain, *J. of Appl. Meteor.*, 35, 330-342.
- Blackadar, A. (1979) High Resolution Models of the Planetary Sciences and Engineering, VI. Pfaffin J.R. and E.N. Zieglov, Eds., Gordon and Breach, 50-82.
- Bourers, J.F., J.R. Bjorklund, and C.S. Cheney (1979), Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model User's Guide, VI. US. EPA. 2-34~35.
- Carroll, J.J. (1993) Sensitivity of PBL model predictions to model design and uncertainties in environmental inputs, *Boundary Layer Meteor.* 65, 137-158.
- Desiato, F. (1991) A dispersion model evaluation study for real time application in complex terrain, *J. App. Meteor.*, 30, 1207-1219.
- Gong, W. (1991) A wind tunnel study of turbulent dispersion over two and three dimensionl gentle hills from upwind point sources in neutral flow, *Boundary Layer Meteor.* 54, 211-230.
- Hanna, S.R., B.A. Egan, C.J. Vaudo, and A.J. Curreri (1984) A complex terrain dispersion model for regulatory applications at the Westvaco Luke Mill, *Atm. Env.* 18, 685-699.
- Hilst, G.R. (1970) Sensitivities of air quality prediction to input errors and uncertainties, *Proc. Symp. Multiple-Source Urban Diffusion Models*, US. EPA. Publ. No. A-49.
- Holtstag, A.A.M. and A.P. van Ulden (1983) A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from weather data, *J. Clim. App. Meteor.* 22, 517-529.
- Lettau, H.H. (1959) Wind profile, surface stress, and geostrophic drag coefficients, *Advances in Geophysics*, 6, 241-256.
- Lettau, H.H. and W.F. Dabberdt (1970) Variangular wind spirals, *Boundary Layer Meteor.* 1, 64-79.
- Liu, M. and J.J. Carroll (1996) A high resolution air pollution model suitable for dispersion studies in complex terrain, *Monthly Weather Review*, 124, 2396-2409.
- McMullen, R.W. (1975) The change of concentration standard deviations with distance, *JAPCA*, 25, 1057-1058.
- O'Brien, J.J. (1970) A note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary boundary layer, *J. Atm. Sci.*, 27, 1213-1215.
- Panofsky, H.A., H. Tennekes, D.H. Lenschow, and J.C. Wyngaard (1977) The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions, *Boundary Layer Meteor.*, 11, 355-361.
- Pasquill, F. (1976) Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modelling : Part II, A Review of Current Systems and Possible Future Developments, *Publ. EPA. North California*, 7-24.
- Ragland, K.W. and R.L. Dennis (1975), Point source atmospheric diffusion model with variable wind and diffusivity profiles, *Atm. Env.*, 9, 175-189.
- Robert, P.T. and E.J. Fryer-Taylor (1994), Wind tunnel studies of roughness effects in gas dispersion, *Atm. Env.* 28, 1861-1870.
- Rotach, M.W. (1993) Turbulence close to a rough urban surface, Part 2 : Variances and gradients, *Boundary Layer Meteor.* 66, 75-92.
- Smith, F.B. (1972) A Scheme for Estimating the Vertical Dispersion of a Plume from a Source near Ground Level, *NATO Committee on the Challenge of Modern Society*, Publ. 14.
- Taylor, P.A., P.J. Mason, and E.F. Bradley (1987) A review-boundary layer flow over low hill, *Boundary Layer Meteor.*, 39, 107-132.
- Wang I.T. and P.C. Chen (1980) Estimation of heat and momentum fluxes near the ground, *Proc. 2nd Joint Conf. on Applications on Air Pollution Meteorology*, AMS, 45, Beacon St., Boston. MA02108, 764-769.
- Zegadi, R., M. Ayrault, and P. Mejean (1994) Effects of a two-dimensional low hill in a thermally neutral and stably stratified turbulent boundary layer, *Atm. Env.* 28 1871-1878.
- Zilitinkevich, S.S. (1972) On the determination of the height of the Ekman boundary layer, *Boundary Layer Meteor.*, 3, 141-145.