

미기상 특성에 따른 대기오염 농도분포에 관한 연구

김 유 근 · 홍 정 혜 · 전 병 일

부산대학교 자연과학대학 대기과학과
(1993년 12월 21일 접수)

A Study on the Distribution of Air Pollutant Concentration According to Micrometeorological Characteristics

Yoo-Keun Kim, Jung-Hae Hong and Byung-II Jeon

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 21 December 1993)

Abstract

The diffusion of the pollutants released into atmosphere is dependent on its chemical reaction, topography and micrometeorological characteristics. The purpose of the study is to investigate how much micrometeorological characteristics such as stability, wind speed and mixing height affect the diffusion of the air pollutants. For this purpose, this paper let 1) the basic theory be K-theory, 2) eddy diffusivity and wind speed be dependent on mixing height and stability, and 3) Crout method be used for numerical calculation.

The result was 1) the more unstable condition, the higher mixing height and the higher wind speed are, the lower pollutants concentration appears, 2) the most intensive effect on the distribution of the pollutant concentration is the atmospheric stability.

Key Word : K-theory, meteorological condition, Crout method, atmospheric stability

1. 서 론

대기 중에 방출된 오염물의 농도 분포를 파악하는 것은 현재의 오염상태를 이해하고 장래의 대기질을 관리하는 데 있어서 매우 중요한 단계라고 할 수 있다. 이러한 대기 중 오염농도의 파악을 위해서는 야외 실측 및 tracer에 의한 확산실험, 모형실험, 그리고 수치모의 등의 결과를 종합적으로 해석하는 것이 필요하다. 특히 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 수치모형은 대기오염 확산현상 해석을 위한 매우 중요한 도구 중의 하나로 등장했다.

대기 오염물질의 농도분포는 오염물질이 방출된

곳의 지형, 오염물질의 화학반응 그리고 오염물질의 방출이 일어난 곳의 기상조건 등에 의해 결정된다. 특히, 임의 지형에 방출된 오염물질의 화학반응 시간이 길다면 대기오염농도 분포는 기상조건에 절대적인 영향을 받게 된다. Ragland(1973)는 기상조건에 따른 대기오염농도 분포를 오염물질의 이류와 확산을 사용하여 나타내었고, 이후 Runca와 Sardel(1975)는 이류와 확산에 의한 농도변화를 시간에 따라 나타내었다. 기상연구소(1991)에서는 Multi-box 모형을 이용하여 경인지방의 지상풍계에 따른 대기오염물질 확산 현상을 설명하였으며, 김선태(1992)는 차분법이 아닌 의사스펙

트로법을 이용하여 대기확산현상을 수치모델하여 대기오염물의 확산을 설명한 바 있다.

본 연구의 목적은 안정도, 혼합고, 그리고 풍속 등의 미기상 특성이 방출된 오염물질의 농도분포에 어떤 영향을 미치는가를 고찰해보는 것이다. 이를 위해서 기초이론으로는 K-theory를 이용하였고, 확산계수와 풍속은 모두 고도와 안정도의 함수로 두었으며, 수치계산에는 Crout법을 사용하였다.

2. 기초식과 기상변수

대기오염물질의 확산은 대기경계층내로 제한되며, 따라서 오염물질은 대기경계층을 벗어나지 못한다. 그러므로 대기경계층을 고도에 따라 flux가 일정한 지표층과 지표의 영향을 받으며 혼합이 활발히 일어나는 혼합층으로 나누고 그 두 층내에서의 오염물질의 확산 현상을 설명함으로써 대기오염물질의 확산을 고찰해보고자 한다.

본 논문에서는 대기오염물질의 농도 분포를 결정하기 위해 먼저 주어진 지균풍과 안정도를 이용하여 혼합층내에서의 풍속과 확산계수를 고도에 따라 산출하였다. 여기서 오염물질의 화학반응시간이 길다고 가정하여, 오염물질의 화학반응이 농도에 미치는 영향은 없는 것으로 간주하였다.

2.1 기초식

질량보존법칙은

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\bar{U} \cdot C) = \nabla(K \nabla C) \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 공기를 비압축성 유체라 보면, $C \nabla \cdot U = 0$ 이므로

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \nabla C + \nabla(K \nabla C) \quad (2)$$

로 나타난다. 즉, 시간에 따른 농도변화는 이류와 확산에 의해 유입되는 양과 유출되는 양에 의해 결정된다.

직교좌표계에서 X 축을 대기경계층내의 주풍방향으로 하고, 바람에 의한 오염물질의 수송은 X 축으로만 일어나며, 이류방향의 확산은 무시할 정도로 작다고 가정하면, 2차원공간에서 오염물질의 시간에 따른 농도 변화는

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ K \frac{\partial C}{\partial Z} \right\} \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 U는 바람, C는 오염농도, 그리고 K는 난류에 의한 확산계수(eddy diffusivity)이다. 이것은 2차원공간에서의 K-theory로 Fig. 1에 도식화하였다.

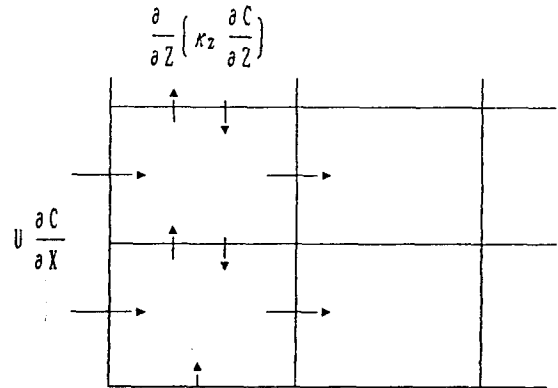


Fig. 1. Schematic of the K - theory at the two dimension.

2.2 기상변수

2.2.1 확산계수

지표층에서 난류에 의한 확산계수가 K, 공기의 밀도가 ρ 일 때 shearing stress τ 와 바람 U와의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Munn, 1966).

$$\frac{\tau}{\rho} = K \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (4)$$

또, 지표층에서 τ 를 일정하다고 하면, 지표에서의 마찰속도는 다음과 같이 정의할 수 있다(Munn, 1966).

$$U_*^2 = \frac{\tau_{sfc}}{\rho} \quad (5)$$

그리고 고도에 따른 풍속의 변화를 Monin-Obukhov(1954) 상사이론에 의해 다음식과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{U_* \varphi}{\kappa Z} \quad (6)$$

따라서, 지표층에서의 확산계수 K는

$$K = \frac{\kappa U_* Z}{\varphi} \quad (7)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 κ 는 Von-Karman 상수, φ 는 고도 Z과 Monin-Obukhov length(L)의 함수로 L은

$$L = \frac{U_*^3 \rho C_p T}{\kappa g Q_H} \quad (8)$$

와 같이 표현된다. 여기서 T는 온도, C_p 는 정압비열, g는 중력, 그리고 Q_H 는 난류에 의한 현열flux로 대기의 상태에 따라 그 부호가 결정되는데 본 연구에서는 이 값을 Ragland(1973)의 연구와 같이 대기가 불안정할 때는 -0.06 ly/min, 중립의 경우에는 0 ly/min, 그리고 안정할 때는 0.24 ly/min으로 두었다. 이에 따른 각 안정도별 보편함수 φ 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Function φ for each stability.

stability	Function φ
stable	$\varphi = 1 + 5.2 Z/L$
neutral	$\varphi = 1$
unstable	$\varphi = [1 + 5.2 Z/L]^{-0.25}$

한편, 혼합층에서의 난류확산계수는 Z의 함수로 각 안정도 별 지표층 top에서의 확산계수를 이용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다(O'Brein, 1970).

$$K = K_H + \frac{(H - Z)^2}{(H - Z_{SL})^2} \left(K_{ZSL} - K_H + (Z - Z_{SL}) \left[\frac{\partial K_{ZSL}}{\partial Z} + \frac{2(K_{ZSL} - K_H)}{(H - Z_{SL})} \right] \right) \quad (9)$$

여기서 H는 혼합고, Z_{SL} 는 지표층의 고도, K_{ZSL} 는 지표층 top에서의 확산계수, 그리고 K_H 는 혼합층 top에서의 확산계수이다.

Fig. 2에 지균풍이 5m/s, 혼합고가 1000m일 때의 이상과 같이 계산한 각 안정도 별 확산계수를 나타내었다. 대기가 불안정한 경우는 약 400m에서, 중립의 경우는 약 350m에서 확산계수가 각각 79m²/s, 24m²/s의 최대값을 나타내었으며, 안정한 경우는 전 고도에서 1m²/s이하의 매우 작은 값을 나타내었다.

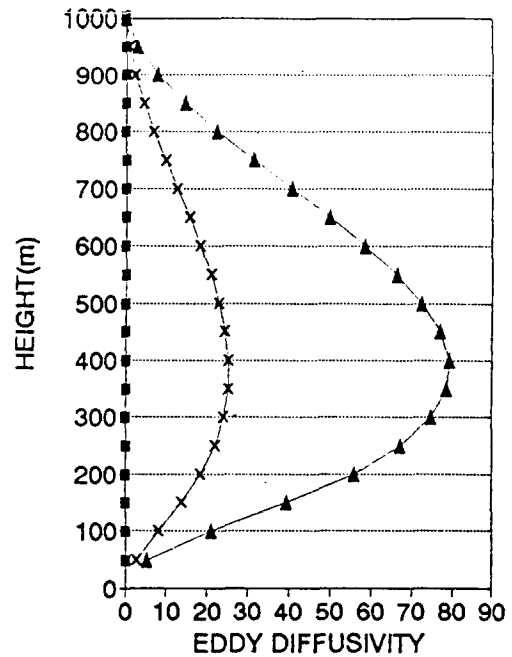


Fig. 2. Eddy diffusivity profiles. —■— line represents stable, —×— line and —▲— line represents neutral and unstable condition, respectively.

2.2.2 풍속

지표층에서의 바람은 식(6)에 φ 를 대입하여 풍속이 0인 곳(roughness length, Z_0)부터 고도 Z까지 적분함으로서 구할 수 있으며,

대기가 안정한 경우에는,

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{Z + Z_0}{Z_0} \right) + 5.2 \right] \quad (10)$$

중립의 경우에는,

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{Z + Z_0}{Z_0} \right) \quad (11)$$

그리고 불안정 경우에는,

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \left[2 \left(\tan^{-1} X - \tan^{-1} X_0 \right) + \ln \left(\frac{X-1}{X_0-1} \right) - \ln \left(\frac{X+1}{X_0+1} \right) \right] \quad (12)$$

$$X = (1 - 15(Z + Z_0) / L)^{0.25}$$

$$X_0 = (1 - 15 Z_0 / L)^{0.25}$$

으로 각각 얻어진다. 여기서 U_* 는 마찰속도로서 $U_* = C_g \cdot U_g$ 이고, C_g 는 geostrophic drag coefficient로서 중립의 경우 $C_g = 0.16 / (\log Ro - 1.8)$ 로 표현되는데, Surface Rossby Number ($Ro = U_g / fZ_0$)의 함수이다(Lettau, 1959). 본 논문에서는 C_g 값을 대기가 불안정한 경우는 중립의 1.2배, 안정한 경우는 중립의 0.6배의 값을 사용하였다(Ragland, 1973).

혼합층에서의 풍속은 Power law를 이용하여 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = (U_g - U_{SL}) \left[\frac{Z - Z_{SL}}{H - Z_{SL}} \right]^p + U_{SL} \quad (13)$$

여기서 U_g 는 혼합고에서의 풍속, U_{SL} 는 지표층의 top에서의 풍속이며, p 는 안정도에 따른 지수로서 안정한 경우 0.5, 중립과 불안정한 경우 0.2의 값을 각각 사용하였다(Jones *et al*, 1971).

이상의 식들에서 사용한 계산 상수들을 Table 2에 제시하였다.

Table 2. Computation constants.

density of air	$\rho = 1.25 \text{ Kg/m}^3$
coriolis parameter	$f = 10^{-4}/s$
roughness length	$Z_0 = 100\text{cm}$
gravity acceleration	$g = 9.8 \text{ m/s}$
specific heat at constant pressure	$C_p = 1004 \text{ JK}^{-1} \text{ Kg}^{-1}$

3. 계산방법

식(3)을 다음과 같이 차분하였으며,

$$\begin{aligned} \frac{C_{ik}^{\tau+1} - C_{ik}^{\tau}}{\Delta t} = & -U_k \frac{C_{ik}^{\tau} - C_{i-1,k}^{\tau}}{\Delta X} \\ & + \frac{1}{2\Delta Z} \left\{ K_{k+1/2} \frac{(C_{i,k+1}^{\tau} - C_{ik}^{\tau} + C_{i,k+1}^{\tau+1} - C_{ik}^{\tau+1})}{\Delta Z} \right. \\ & \left. - K_{k-1/2} \frac{(C_{ik}^{\tau} - C_{i,k-1}^{\tau} + C_{ik}^{\tau+1} - C_{i,k-1}^{\tau+1})}{\Delta Z} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

다시 행렬을 이용하여

$$[A][C] = [D] \quad (15)$$

와 같이 나타냈다. 여기서 행렬 [A]는 오염물질이 수송과 확산에 의해 Box에 유입, 유출되는 과정을 나타내고, [C]는 농도행렬을 나타내며, 행렬 [D]는 경계조건을 포함한다. 이 행렬을 Crout법으로 매 시간마다 반복 계산하였으며 계산을 위해 다음과 같은 초기조건과 경계조건을 사용하였다.

$$\left. \begin{aligned} C &= 0 & \text{at } t &= 0 \\ C &= B = 0 & \text{at } X &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial Z} \left(Kz - \frac{\partial C}{\partial Z} \right) &= S & \text{at } Z &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial Z} &= 0 & \text{at } Z &= Z_{MX} (H) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

4. 계산결과

계산영역은 수평으로 21km, 연직적으로는 혼합고를 이용하였으며, 수평영역의 4분의 1지점까지 $Q=10\mu\text{g/s}$ 의 오염물질이 계산시작시각으로부터 15분간 방출된다고 하였다. 계산영역을 도식화하면 Fig. 3과 같다.

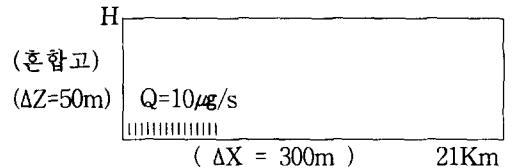


Fig. 3. Domain of the computation and pollutant source.

계산시작시각으로부터 30분후의 오염물질의 농

도분포를 안정도, 혼합고 그리고 풍속에 따라 나누어 고찰하였다.

4.1 안정도의 영향

Fig. 4는 혼합고 1000m에서의 풍속이 5m/s일 때, 안정도에 따른 오염물의 농도분포이다. 그림에서 보듯이 100 μ g 등 농도 곡선은 대기가 불안정한 경우 700m 이상까지, 중립의 경우 500m까지 그리고 안정의 경우 100m부근까지 분포해 있다. 그리고 중립의 경우는 불안정한 경우만큼 연직적으로

높이 발달하지는 못하나, 가장 멀리 이류하고 안정한 경우가 가장 이류가 적다는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 대기가 불안정하면 오염물질이 연직적으로 넓게 존재하여 농도를 저감시키고, 안정한 경우에는 바람에 의한 이류도 적고 작은 확산 계수에 의해 연직적으로 높이 발달하지 못하여 배출원 주위에서 고농도 분포를 보인다. 중립의 경우 최고농도는 불안정한 경우의 약 2배, 안정의 경우는 중립의 경우의 약 4배의 값을 보이므로 안정도가 오염농도 분포에 미치는 영향을 뚜렷하게 나타내었다.

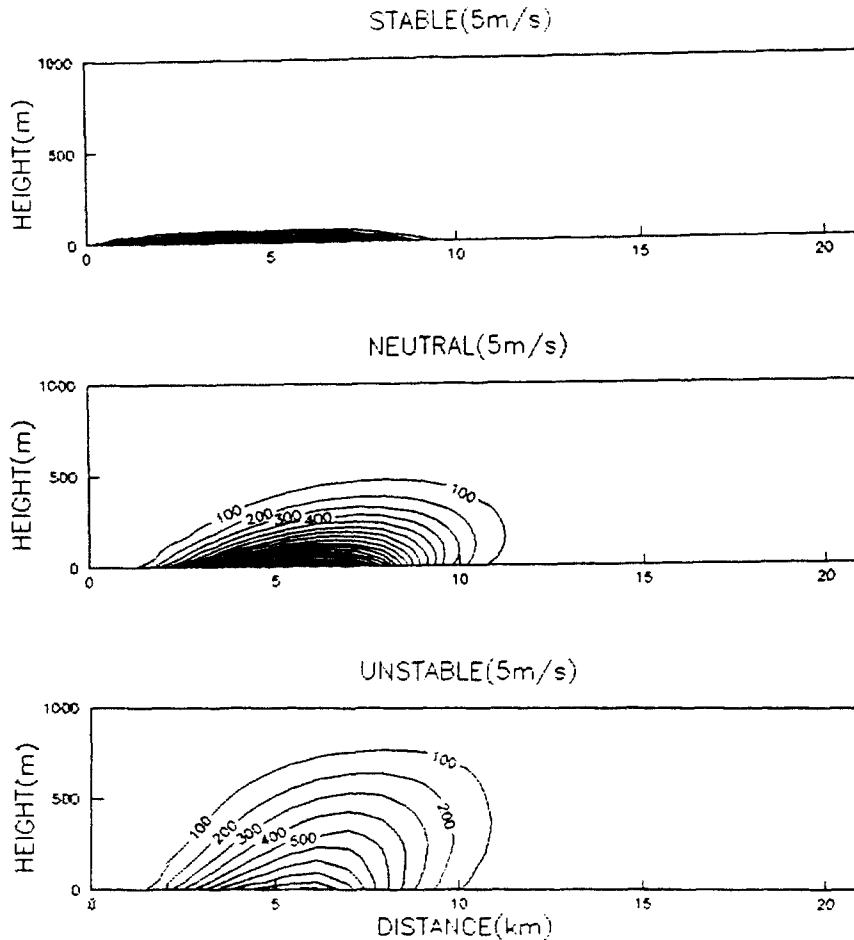


Fig. 4. The distribution of the pollutant concentration with 1000m mixing height and at 5m/s wind speed.

4.2 혼합고의 영향

혼합고가 오염물의 농도분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해 1500m에서 풍속을 7m/s의 일정한 값을 두고, 불안정한 경우의 혼합고 1500m, 1000m 그리고 500m에서의 오염물의 농도 분포를 각각

살펴보았다. Fig. 5에서 보면 혼합고의 높이가 변하는 경우 오염물 농도의 연직적 분포에는 큰 차이가 없으나 혼합고가 1500m에서 1000m에서 500m로 감소할 때마다 최고농도는 각 약 $60\mu\text{g}/\text{m}^3$, $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 증가하였다.

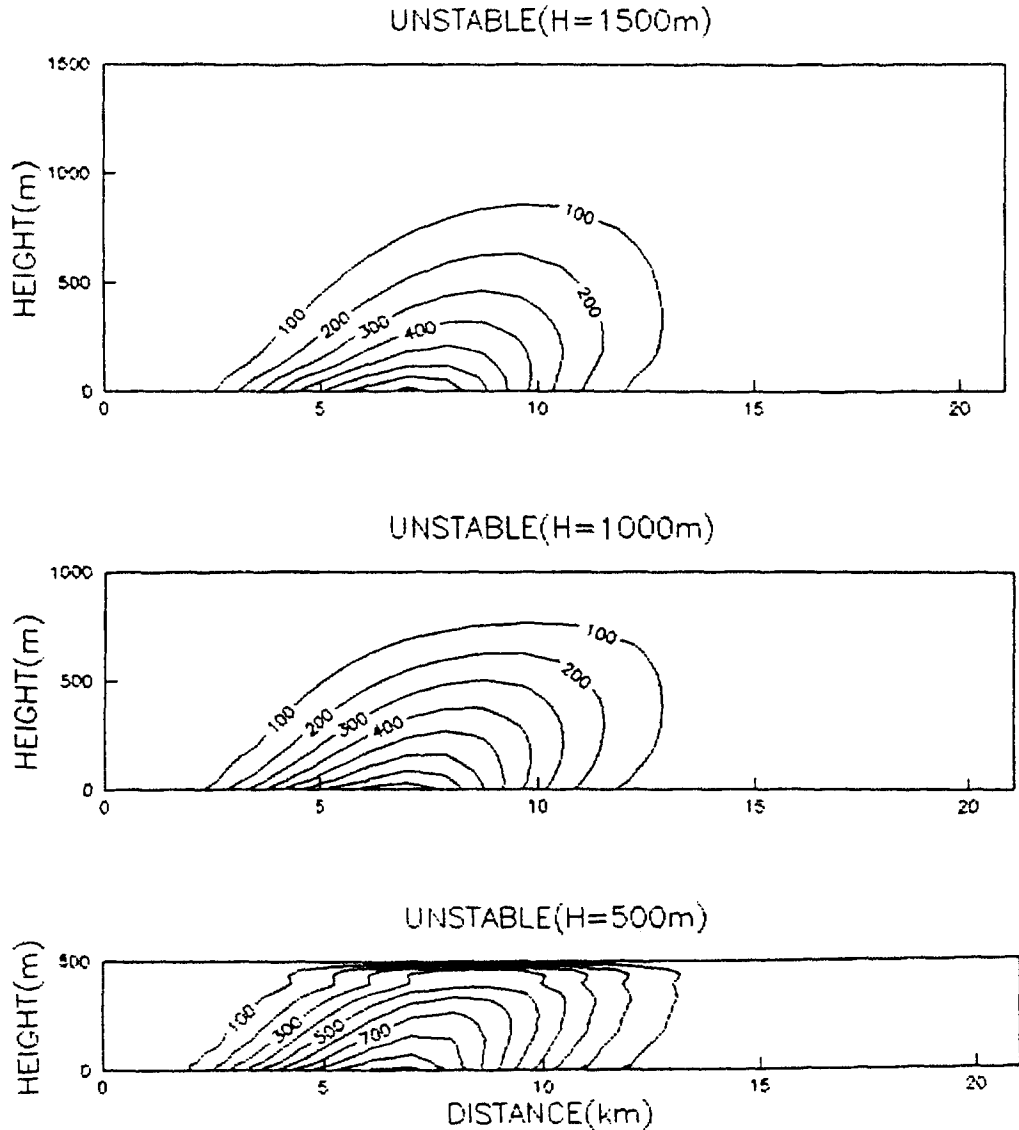
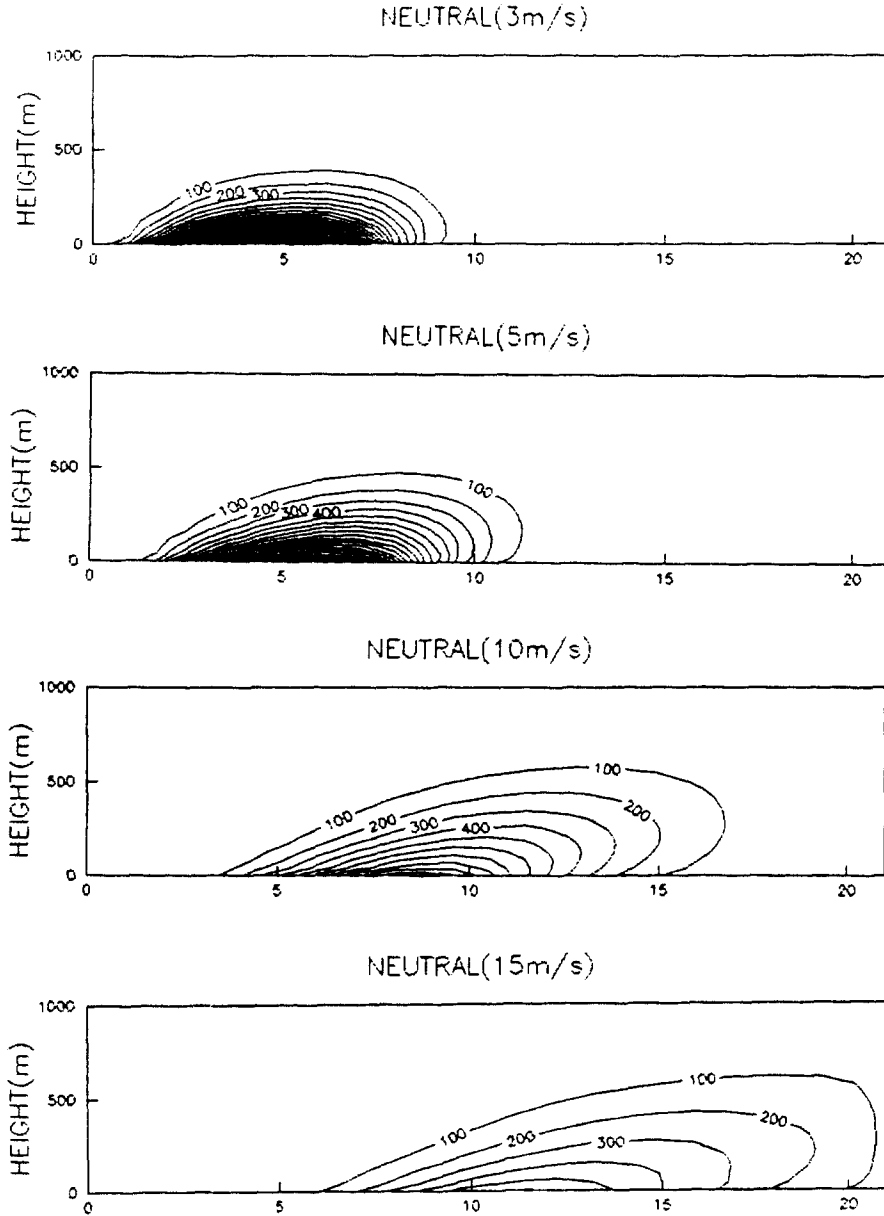


Fig. 5. The distribution of the pollutant concentration according to 1500m, 1000m, 500m mixing height on unstable condition and at 7m/s wind speed.

4.3 풍속의 영향

풍속이 오염물의 농도분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해 중립의 경우에 대해 혼합고 1000m에서의 풍속을 3m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s 그리고 20m/s로 증가 시켰다. Fig. 6에서 보듯이 풍속이

강할수록 오염물질은 멀리 이류하고 연직적으로도 높이 분포하는데, 이는 혼합고에서의 풍속이 연직 확산계수에 지대한 영향을 미치기 때문이다. 따라서, 혼합고에서의 풍속의 증가는 이류 및 확산의 효과를 증가시켜 오염물의 농도를 감소시키는 중요한 역할을 한다.



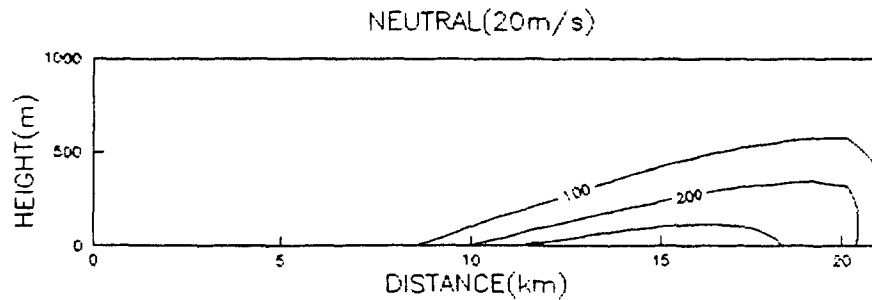


Fig. 6. The distribution of the pollutant concentration with respect to 3m/s, 5m/s, 10m/s, 15m/s and 20m/s at mixing layer top on neutral condition.

5. 결론

본 연구에서 K-theory를 이용하여 안정도, 혼합고, 풍속이 대기오염농도 분포에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰해본 결과, 대기가 불안정할수록, 혼합고가 높을수록, 풍속이 강할수록 대기오염물의 농도는 낮아지는 일반적인 결과를 볼 수 있었다. 그리고 혼합고에서의 풍속의 증가는 연직확산에도 영향을 미치는데, 특히 대기오염농도분포에 가장 큰 영향을 미치는 것은 안정도 조건이었다.

이상에서 기상조건이 대기오염 농도분포에 절대적인 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, 따라서 임의 지형에 방출된 오염물질의 농도분포를 정확히 파악하기 위해서는 먼저 그 지역의 기상조건을 정확하게 파악하는 것이 우선이라고 할 수 있다.

참고문헌

- 기상연구소, 1991, 경인지역의 지상풍계에 따른 대기오염상태의 변화(II), MR91-3, 52pp.
 김선태, 1992, 의사스펙트로법에 의한 대기확산 현상의 수치모델, 일본 경도대학교 박사학위논문, 184pp.

Jones, P. M., M. A. B. Larrinaga and C. B. Wilson, 1971, The urban wind velocity profile. *Atmospheric Environment*, 5, 89-102.

Lettau, H. H., 1959, Wind profile, surface stress and geostrophic drag coefficients in the atmospheric surface layer. *The advances in geophysics*, 6, Atmospheric Diffusion and Air Pollution, 241-256

Monin, A. S. and A. M. Obukhov., 1954, Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere, *Dokl. Akad. USSR* 151, 163-187.

Munn, R. E., 1966, *Descriptive Micrometeorology*, New York, Academic press, 245pp.

O'Brien, J. J., 1970, A note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 27, 1213-1214.

Ragland, K. W., 1973, Multiple box model for dispersion of air pollutants from area sources, *Atmospheric Environment*, 7, 1017-1032.

Runca, E. and F. Sardel, 1975, Numerical treatment of time dependent advection and diffusion of air pollutants, *Atmospheric Environment*, 9, 69-80.