

# DR7) 열대류 경계층에서 비평형 2.5 난류모델을 기초로 한 라그랑지안 입자 확산 모델

## Lagrangian Particle Dispersion Model Based on Non-equilibrium Level 2.5 Closure Model in the Convective Boundary Layer

구윤서  
 안양대학교 환경공학과

### 1. 서론

복잡한 구조를 갖고 시간에 따라서 변하는 바람장내에서 공장굴뚝과 같은 점오염원에서 배출되는 오염물질의 확산을 계산하기 위해서 라그랑지안 입자확산모델(Lagrangian Particle Dispersion Model, LPDM)을 사용하는 것이 최근의 연구 동향이다.

구윤서(1999a, 1999b)는 중립 및 안정한 대기조건에서 바람장 계산시 비평형 2.5 난류모델을 이용한 LPDM을 개발하여 복잡한 대기흐름내 확산현상을 보다 정확히 모사할 수 있는 LPDM을 제시하였다. 이 때에 LPDM은 난류가 균일하고 난류속도의 분포가 Gaussian분포라는 가정을 사용하였다. 그러나 대류경계층에서는 연직방향의 난류특성이 불균일(inhomogeneous turbulence)하고, 난류속도의 분포가 비대칭(skewed distribution)이므로 LPDM에서 이를 반영해야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존에 제시된 LPDM을 보완하여 안정, 중립, 및 불안정(대류) 조건에서도 범용적으로 적용할 수 있는 LPDM을 제시하고자 한다.

### 2. 이론적 배경

라그랑지안 입자 확산 모델은 대기 중의 입자상, 가스상의 오염물질을 입자로 가정하여 각각의 입자가 평균바람장(mean wind field)과 난류바람장(turbulent fluctuating wind field)에 의해 움직인다고 생각하여 그 입자들의 궤적을 계산하는 방법이다. 따라서 각 입자들이 바람에 의해 대기내 3차원 공간에서 이동하는 좌표는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(t + \delta t) &= x(t) + \delta t [U(t) + u'(t)] \\ y(t + \delta t) &= y(t) + \delta t [V(t) + v'(t)] \\ z(t + \delta t) &= z(t) + \delta t [W(t) + w'(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x와 y는 서로 직각의 관계를 갖는 수평방향의 좌표를 나타내고, z는 연직방향의 좌표를 의미한다. U, V는 x, y 방향으로의 평균바람장의 속도를 나타내고 W는 연직방향의 속도이다. 소문자에 상첨자는 난류속도성분을 의미한다.  $\delta t$ 는 입자의 이동에 대한 시간구간이다. 이 때에 수평방향으로의 난류속도성분은 그 분포가 Gaussian이라는 가정하에서 라그랑지안 자기상관계수(Lagrangian auto-correlation coefficient,  $R_i$ ,  $i = u, v, w$ )와 난류속도 표준편차 ( $\sigma_i$ ,  $i = u, v, w$ )로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} u'(t + \delta t) &= R_u(t) u'(t) + (1 - R_u^2(t))^{1/2} \sigma_u r_u \\ v'(t + \delta t) &= R_v(t) v'(t) + (1 - R_v^2(t))^{1/2} \sigma_v r_v \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서  $r_i$  ( $i = u, v$ )는 평균이 0이고, 표준편차가 1인 가우시안 난수(Random number)이다.

그러나 연직방향의 난류속도는 그 분포가 비대칭이므로 아래와 같은 식을 이용하여 계산한다.

$$w'(t) = a(w, z) \delta t + (C_o \varepsilon \delta t)^{\frac{1}{2}} r_w \quad (3)$$

식(3)에서  $a(w, z)$ 는 연직방향의 난류속도( $w'$ )의 가속도이고 이 값은 Franzese(1999)등이 제시한 식을 사용하였다.  $\varepsilon$ 은 난류에너지소실률(dissipation rate of turbulent kinetic energy)이다. 라그랑지안 자기 상관계수 및 난류속도 표준편차를 계산하는 데는 기존 연구에서는 측정된 값이나 경험식을 사용하였으나, 본 연구에서 제시하는 LPDM은 Koo와 Reible (1995)의 비평형 2.5 난류모델을 이용하여 직접 바람장 모델로부터 라그랑지안 모델에서 요구되는 난류특성을 계산하는 장점이 있다.

### 3. 결과 및 논의

대류경계층에서 배출원의 높이에 따른 오염물질의 확산형태를 계산하여 그림1에 나타내었다. 대류경계층 중앙부에서 배출된 오염물질이 지표부근으로 침강한 다음 다시 상승하면서 경과시간에 따라서 점차 대류 혼합에 의해서 경계층내 농도가 균일해지는 것을 관찰할 수 있다(그림 1 (a)와 (b)). 한편 지표부근에서 배출된 경우에는 대류경계층에 존재하는 thermal에 의한 상승류(updrafts)에 의해서 경계층 높이까지 상승한 후에 시간에 따라서 경계층내에서 농도분포가 균일해지는 것을 알 수 있다(그림1 (c)). 이와 같은 현상은 전형적인 대류경계층내에서 확산형태로 기존에 많은 연구자들이 수행한 실험 연구 및 이론적 연구 결과와도 잘 일치하는 것이다.

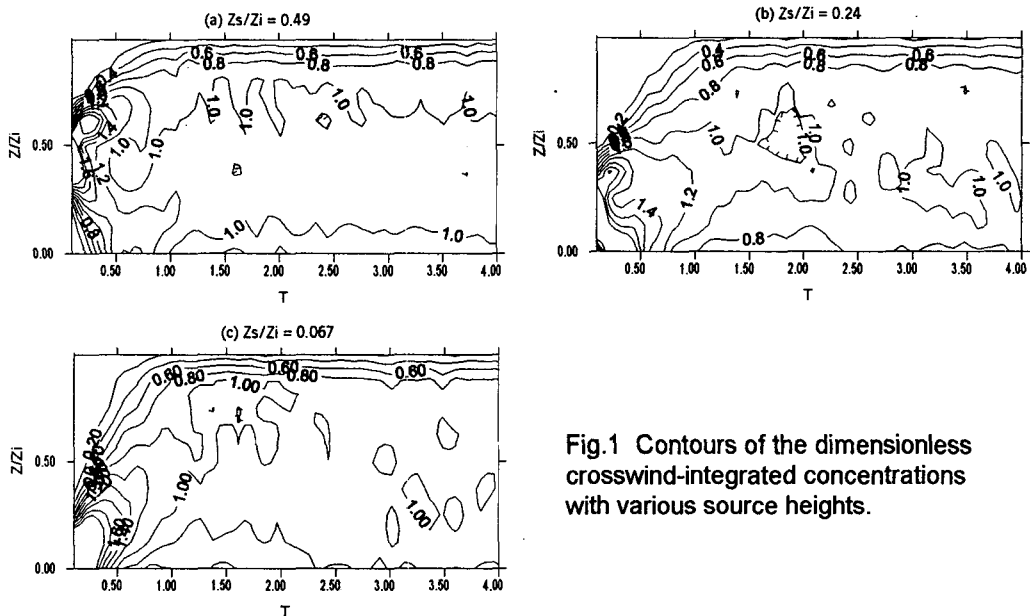


Fig.1 Contours of the dimensionless crosswind-integrated concentrations with various source heights.

### 참고문헌

- 구윤서: 1999, "라그랑지안 입자확산모델 개발(농도 계산방법의 검토)", 한국대기환경학회지, 15(6), 757-765.  
 구윤서: 1999, "비평형2.5난류모델을 이용한 라그랑지안 입자확산모델 개발", 한국대기환경학회지, 15(5), 613-623.  
 Koo, Y.S. and D.D. Reible: 1995, "Flow and Transport Modeling in the Sea Breeze, Part I: A Modified E-ε Model with a Non-equilibrium Level 2.5 Closure", Boundary-Layer Meteorology, 75, 109-140.  
 Franzese, F., A.K. Luhar, M.S. Borgas: 1999, "An Effective Lagrangian Stochastic Model of Vertical Dispersion in the Convective Boundary Layer", Atmospheric Environment, 33, 2337-2345.