복잡한 지형에서의 대기확산모델 개발

박홍목*, 김영성**, 오우석*
* 서강대학교 화학공학과, ** 한국과학기술연구원

Development of an atmospheric diffusion model for complex terrains

H. M. Park, Y. S. Ghim, W. S. Oh
Department of Chemical Engineering, Sogang University

서론

본 연구의 목적은 중규모(meso-β 및 meso-γ) 기상 모델을 개발하고 이를 이용하여 복잡한 지형(complex terrain)에서 공해 물질의 전달 현상을 해석하고 예측하는 것이다. 현재 많이 사용되는 Gaussian plume 모델은 평탄한 지형에서 바람의 속도와 방향이 일정할 때만 적합하기 때문에 대부분이 산악지인 우리 나라의 지형에 적용하는데는 한계가 있다. 복잡한 지형에서의 공해 물질의 이동과 확산을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 대기경계층 내에서의 유동을 정확하게 구할 필요가 있으며, 본 연구에서는 삼차원 Navier-Stokes식을 컴퓨터를 사용해서 풀어서 복잡한 지형에서의 유동장을 수치적으로 구한 다음 이를 이용하여 대기확산식을 풀어서 공해 물질의 이동 및 확산을 예측하고 해석한다. 복잡한 지형을 효율적으로 처리하기 위하여 body-fitted 좌표계를 이용하며(Thompson,et.al. 1982), 또 공기의 압축성을 고려함과 동시에 에너지의 보유량은 무시할 만하나 수치 해석상의 어려움을 초래하는 음파(acoustic wave)를 제거한 anelastic식을 도입한다. 대기 경계층내의 유동은 거의가 다 난류 상태이므로 정확한 유동장의 예측을 위해서 적절한 난류 모델을 도입하여 유동장을 구하며, 또 적절한 지표층 모델을 골라서 이들을 개발한 전산 code에 적용한다. 이러한 전산 모사 결과로 얻은 유동장을 이용하여 대기 확산 방정식을 정확하게 풀면 복잡한 지형에서의 공해 물질의 전달 현상을 Gaussian plume 모델을 이용하는 것 보다 더 정확하게 예측할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 우리 나라의 대규모 석유 화학 단지에서 공해 물질이 여러 공장에서 동시에 유출될 경우, 그 책임 소재 및 배상 문제를 원만하게 해결하는데는 본 연구에서와 같이 Navier-Stokes식에 근거하여 정확한 유동장을 구한 다음 이를 이용하는 공해 물질의 전달을 해석하는, 종래의 방법보다 더 엄밀한 접근이 앞으로 필요할 것이라고 생각된다. 또한 장기적으로는 이러한 모사 결과를 대기 오염정책을 설정하는데 중요한 기초자료로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

지배 방정식

일반 곡선 좌표계에서의 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla_j \rho U^j = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho U^i + \nabla_j \rho U^j U^i = -g^{ij} \nabla_j P + \nabla_j [\mu_{tur} (g^{jk} \nabla_k U^i + g^{ik} \nabla_k U^j)]$$

여기서

$$\nabla_j U^i \equiv \frac{\partial U^i}{\partial \xi^j} + \left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} U^k$$

이다.

Turbulent viscosity μ_{tur}은 다음의 Mellor and Yamada model을 풀어서 구하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} e + \nabla_j U^j e = P^* - \varepsilon^* + \nabla_j (\mu_{tur} g^{jk} \nabla_k e)$$

여기서 P^*는 shear에 의한 난류 생성항, ε^*은 isotropic dissipation 항이며 μ_{tur}은 e의 함수로 나타낼 수 있다.

지표면에서의 복잡한 토지사용과 거칠기를 고려해 주기 위해 접지층을 도입하였으며 본 연구에서는 다음과 같은 Businger formulation을 이용하였다.

$$U(z) = \frac{u_*}{k_0} \left[\ln \frac{z+z_0}{z_0} + \beta \frac{z}{L} \right]$$

여기서 u_*는 friction velocity, k_0는 von Karman constant, z_0는 토지 사용과 roughness에 따른 상수, β는 대기의 안정도에 의해 결정되는 상수 그리고 L은 Monin-Obukhov length이다.

격자 생성

복잡한 영역에서 Navier-Stokes 식을 유한차분법으로 풀기 위하여 다음과 같이 미분방정식을 이용하여 불규칙적인 경계를 가진 물리 공간을 규칙적인 경계의 계산공간으로 변환한다.

$$\xi = \xi(x, y, z)$$
$$\eta = \eta(x, y, z)$$
$$\phi = \phi(x, y, z)$$

여기서 (x, y, z)는 물리공간의 좌표계이고 (ξ, η, ϕ)는 계산공간에서의 좌표계이다. 격자생성에 사용되는 미분방정식은 다음과 같으며,

$$\alpha_{11} x_{\xi\xi} + 2\alpha_{12} x_{\xi\eta} + 2\alpha_{13} x_{\xi\phi} + \alpha_{22} x_{\eta\eta} + 2\alpha_{23} x_{\eta\phi} + \alpha_{33} x_{\phi\phi} = -I^2 (P x_\xi + Q x_\eta + R x_\phi)$$
$$\alpha_{11} y_{\xi\xi} + 2\alpha_{12} y_{\xi\eta} + 2\alpha_{13} y_{\xi\phi} + \alpha_{22} y_{\eta\eta} + 2\alpha_{23} y_{\eta\phi} + \alpha_{33} y_{\phi\phi} = -I^2 (P y_\xi + Q y_\eta + R y_\phi)$$
$$\alpha_{11} z_{\xi\xi} + 2\alpha_{12} z_{\xi\eta} + 2\alpha_{13} z_{\xi\phi} + \alpha_{22} z_{\eta\eta} + 2\alpha_{23} z_{\eta\phi} + \alpha_{33} z_{\phi\phi} = -I^2 (P z_\xi + Q z_\eta + R z_\phi)$$

이를 이용하여 구한, 임의의 언덕 주위의 격자계는 그림 1과 같다.

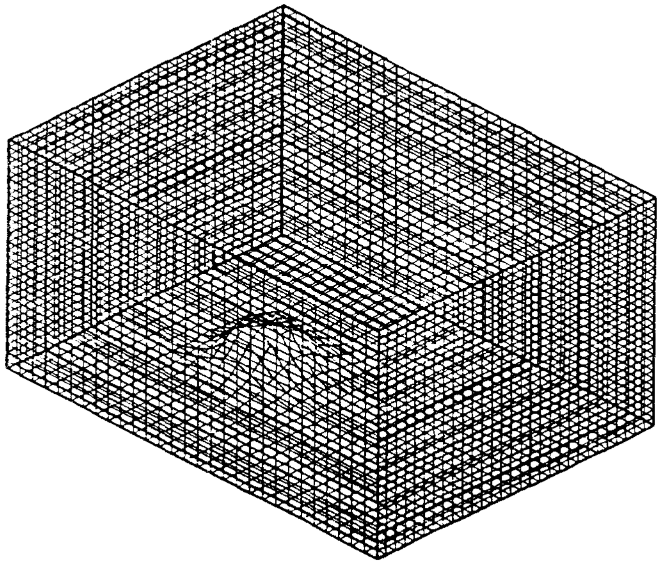

그림 1

유한차분화

본 연구에서는 종래의 유한차분화의 기법인 엇갈린 격자계를 이용하지 않고, 계산이 더 간편하며 전산기의 기억용량을 적게 소요하는 엇갈리지 않은 격자계를 이용한다. 엇갈리지 않은 격자계에서는 속도 성분과 압력 변수 모두를 격자의 중심에 위치시키며 일반적으로 이러한 변수 배열에서 나타나는 인위적인 압력장의 진동은 Rhie-Chow 내삽법을 이용하여 피할 수 있었다. 격자 중심에서의 변수를 ϕ로 표현하면 다음과 같은 19개의 ϕ로 구성된 행렬 방정식을 얻게 된다.

$$\left(\sum_{nb} a_{nb} + S_m\right)\phi_p - \sum_{nb} a_{nb}\phi_{nb} - S_x = V_p\langle S\rangle_p, \qquad nb = E, W, N, S, U, D$$

혼합차분법을 사용하였을 때 a_{nb}는, 예를 들어 a_E의 경우,

$$a_E = \max\left(\frac{1}{2}|C_e|, D_e\right) - \frac{1}{2}C_e$$

S_m은 질량생성항으로

$$S_m = C_e - C_w + C_n - C_s + C_u - C_d$$

비압축성유체나 정상상태의 압축성유체에서는 0이다.

S_x는 비직교좌표계에서 경계면에 접선 방향의 교차미분 때문에 생기는 항들을 모은 것이다.

(그림 1)에 나타낸 언덕 주위의 영역에서 윗면의 속도가 일정할 때 본 연구에서 개발한 전산코드를 이용하여 구한 유동장의 x단면을 (그림 2)에 나타내었다.

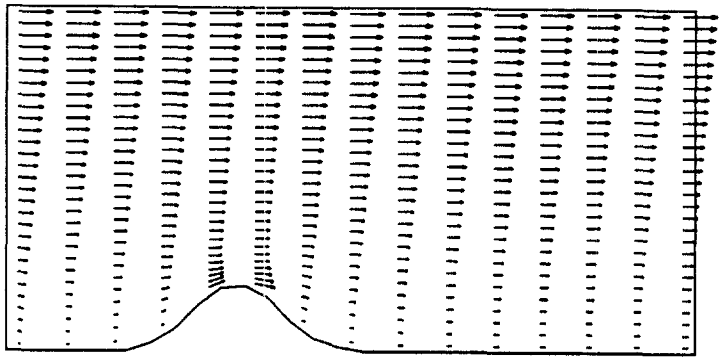

그림 2

본 연구는 1995년 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

[1] Park,H.M. and Lee,I.Y. : Atmos. Environ. **28**(9), 1615-1625,(1994).
[2] Lee,I.Y. and Park,H.M. : Atmos. Environ. **28**(14), 2343-2349,(1994).
[3] Seinfeld, J.H. : *"Atomospheric Chemistry and Physics of Air Pollution"*, John Wiley and Sons(1986).
[4] Thompson, J.F., Warsi, Z.U. and Mastin, C.W. : Boundary-fitted coordinates systems for numerical solution of partial differential equation, J. Comp. Phys., **47**, 1-108,(1982).