

Two-Dimensional Numerical Analysis of the Pollutant Dispersion over Hilly Terrain

김현구, 이정목, 경남호*

포항공과대학교, *한국에너지기술연구소

I. 서론

오염물질의 확산이 주민보건과 주변환경에 심각한 영향을 미치게 되는 지표면 부근의 대기유동은 지형에 의하여 유동박리, 유선방향의 변경 및 절단 등의 복잡한 변형이 수반되므로 이러한 국지 유동장의 변화특성을 충분히 고려하지 않은 확산예측에는 수용하기 어려운 오차가 발생할 수 있다(김영성과 경남호, 1995). 특히 우리 나라와 같이 전국토의 70%가 산지로 구성된 대표적인 산지 지형에서의 확산예측에는 국지 유동장에 대한 파악이 선결되어야 한다. 그런데 대기오염 확산예측에 가장 널리 사용되는 가우시안 연기모델은 그 적용범위가 평지에서의 확산문제에 국한되므로 복잡지형내 확산예측에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 대기오염의 실측결과와의 비교가 용이하고 계산영역 내의 모든 배출원의 고려가 가능하며, 특히 복잡한 변형을 수반하는 유동장에서의 확산예측에 적합한(심상규, 1995) 오일러리안 모델을 사용하여 2차원 언덕지형(hilly terrain)에서의 오염물질 확산거동을 수치해석적으로 연구하였다.

II. 수치해석법

본 연구에서는 언덕지형 내 오염물질 확산의 수치예측을 위하여 유한체적법을 기초로 한 오일러리안 모델을 사용하였으며, 복잡한 국지 지형의 상세한 모사를 위하여 비직교 경계면 일치 좌표계를 도입하였다. 오염물질을 유동과 상호작용을 일으키지 않는 *passive scalar*이고 부력의 영향이 없다고 가정하면, 난류유동장 내에서 오염물질의 이송 및 확산 지배방정식은 2차원인 경우 구배확산이론(*gradient diffusion theory*)을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x_s} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_s} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x_s} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q(t) \cdot \delta(0, z - H_s)$$

여기서 (x_s, z) 는 각각 풍하거리와 연직방향이며, C 는 오염물질의 평균농도이다. $(0, H_s)$ 에 위치하는 배출원에서의 배출유량은 $Q(t)$ 이다. 본 연구에서 평균유속 (U, W) 와 난류확산계수 (K_x, K_z) 는 기획득된 유동장 해석결과(김현구 등, 1997)를 이용하였는데, 이 결과는 동일한 언덕모델에 대한 풍동실험(임희창 등, 1996)을 통하여 검증되었다. 그림 1은 연속되는 언덕지형을 지나는 대기유동장의 수치예측 결과로 언덕 경사가 급한 (b) S5H4-S5H7 언덕의 경우 계곡 및 후류언덕 뒷부분에서 유동박리가 수반됨을 관찰할 수 있다. 그림에서는 박리영역의 경계($\psi = 0$)를 실선으로 나타내었다.

위 식에서 난류확산계수는 난류와점도 μ_t 를 이용하여 $K_z = \mu_t / Sc_t$ 로 모델링하였는데, 여기서 Sc_t 는 *turbulent Schmidt number*로 본 연구에서는 1.0의 값을 사용하였다. 지표면에는 경계조건으로 완전반사 조건을 부가하였다. 수렴된 평균농도해는 다음의 적분 보존식을 만족하여야 한다.

$$\int_0^{\infty} U(x_s, z) C(x_s, z) dz = Q \quad \text{for } (x_s > 0)$$

이송 및 확산의 수치해석에서 격자계의 선정은 수렴해의 정확도에 상당한 영향을 미치므로, 본 연구에서는 Kasibhatla et al.(1988)의 지침을 따라 격자계를 생성하였다.

III. 연구결과 및 토의

본 연구에서 사용된 오일러리안 수치모델의 정확성 및 타당성을 검증하기 위해 기존의 평지확산 실험 결과와의 비교분석을 수행하였다(그림 2). 평지 난류경계층 내 지표상(elevated) 선 용출원(source)에 의한 확산실험(Raupach와 Legg, 1993)과의 비교를 보면 잘 알려진 바와같이 배출원 직후($x/H_s = 2.5$)에서 구배확산이론에 의한 해석결과가 실험의 최대치보다 작게 예측함을 제외하면 전반적으로 좋은 일치율 보인다. Rounds(1955)의 이론해에 의하면 $x/H_s = 2.5$ 에서의 최대치는 1.4로 수치계산과 거의 동일하다.

배출원 부근에서의 과소예측을 보정하기 위하여 연기반쪽 σ_z 의 측정치를 이용하여 난류확산계수를 수정하였는데, 그림 2(b)는 이러한 방법에 의한 계산결과로 배출원 직후에서도 Fackrell과 Robins(1982)의 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

방출된 오염물질이 주변보전 및 환경에 주로 영향을 미치는 영역은 지표면 부근이므로 지면농도의 분포에 주안점을 두어 해석을 수행하였는데, 배출원의 위치를 언덕앞단, 언덕정상, 언덕끝단으로 변경시켜 가며 배출높이에 따른 지면농도의 분포양상을 살펴보았다. 언덕과 같은 지형지물에 의한 지면농도 최대치의 변화를 나타내는 척도인 Terrain Amplification Factor(TAF)를 근거로 판단하여 볼 때 지면농도에 가장 심각한 영향을 미치는 배출원의 위치는 언덕의 뒤쪽끝단으로 나타났다. 특히 언덕의 경사가 급하여 유동박리가 발생되는 경우, 박리영역 내에 배출원이 위치하게 되면 강한 난류혼합과 재순환 유동에 의하여 박리영역내의 농도는 급격히 증가하게 된다(그림 3).

오염물질의 비정상 확산특성은 정상상태와는 달리 특이한 현상이 나타날 수 있으므로 특히 원전사고를 대비한 확산각본(dispersion senario)에는 비정상 확산예측이 반드시 포함되어야 한다. 그런데 실험적 방법으로 비정상 확산문제를 연구하기에는 측정상 기술적 난점이 많은 반면 수치해석은 신속하며 효과적인 예측이 가능하므로 비정상 확산예측에 적합한 예측법이다. 그림 4는 연속되는 언덕지형에서 상류 언덕앞단의 배출원으로부터 단시간동안 배출된 오염물질이 특정위치에 체류하게 되는 정체시간을 나타낸 그래프로 유동박리가 발생하는 지형의 경우, 박리영역에서는 오염물질이 재순환 유동에 포획되어 타 지점에 비해 상당시간 체류함을 알 수 있다.

본 연구의 결과를 해변도로를 주행하는 차량의 배기가스에 의한 환경영향 평가에 적용하였다. 배기가스 중 배출량이 가장 많은 $\text{NO}_x(\text{NO}_2)$ 의 환경규제치(50 ppb)를 기준으로 보면 교통량 및 유동조건에 따라 인근지역의 최대 지면농도가 환경규제치를 초과하는지의 여부를 판별할 수 있다. 예를 들면 유동박리 영역인 계곡사이에 도로가 위치한 경우, 최대 지면농도가 환경규제치를 초과할 가능성이 가장 높다.

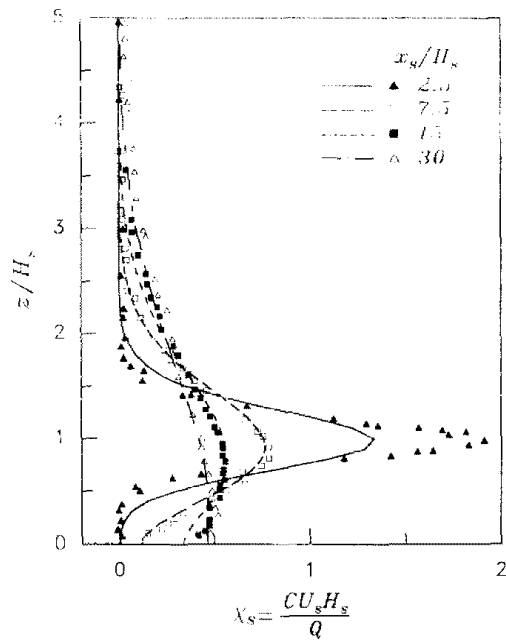
IV. 결론

일반적으로 환경법규에서는 방출물에 포함된 오염물질의 최대 함유농도를 규제기준으로 정하고 있지만 실제로는 동일농도의 오염물질이 배출된다고 하더라도 배출원 부근의 지형과 유동조건 및 기상상태에 따라 주변환경에 미치게 되는 영향은 상당한 차이가 있으며, 이에 대한 정확한 환경영향 평가를 위해서는 본 연구와 같은 유동장 및 확산거동에 대한 다각적인 검토가 요구된다.

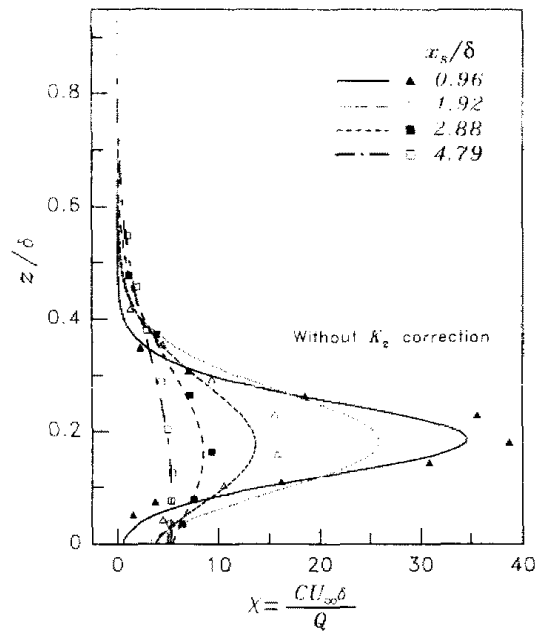
본 연구에서는 언덕지형에서의 오염물질 대기확산을 수치해석적으로 연구하였는데, 특히 배출원이 유동박리 영역내에 위치하게 되면 최대 지면농도가 급격히 상승하며, 비정상 해석을 통하여 박리영역내에 오염물질이 체류하는 정체시간도 타지점에 비해 월등히 긴 것을 알 수 있었다. 차후로는 대기오염 확산에 중요한 영향을 미치는 대기의 안정도를 고려하기 위한 수치모델로 발전시켜 나가야 할 것이며, 더 나아가서는 도시 건물군에서의 대기오염 확산거동을 예측할 수 있는 수치계산법을 개발해야 할 것이다.

참고문헌

- 김영성, 경남호 (1995) 복잡한 지형 내 오염물질의 대기확산 풍동실험; II. 산지지형 실험의 Gaussian 모델링, 한국대기보전학회지, 11, 145-152.
- 김현구, 이정목, 경남호 (1997) 언덕지형을 지나는 유동의 수치해석적 연구, 한국대기보전학회지, 13.
- 심상규 (1995) 오일러리안 모델, 한국대기보전학회지, 11, 29-36.
- 입희창, 김현구, 이정목, 경남호 (1996) 언덕지형을 지나는 유동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12, 459-472.
- Fackrell, J.E. and A.G. Robins (1982) Concentration fluctuations and fluxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 117, 1-26.
- Kasibhatla, P.S., L.K. Peters and G. Fairweather (1988) Numerical simulation of transport from an infinite line source: Error analysis, *Atmos. Environ.*, 22, 75-82.
- Raupach, M.R. and B.J. Legg (1983) Turbulent dispersion from an elevated line source: Measurements of wind-concentration moments and budgets, *J. Fluid Mech.*, 136, 111-137.

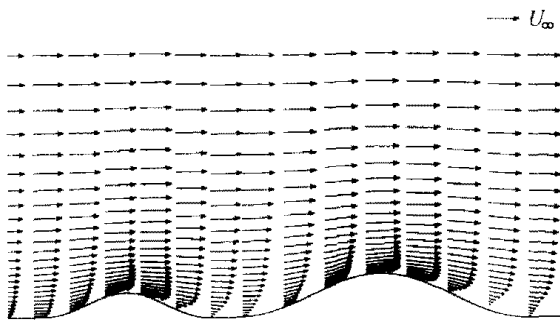


(a) Line source (Raupach and Legg, 1983).

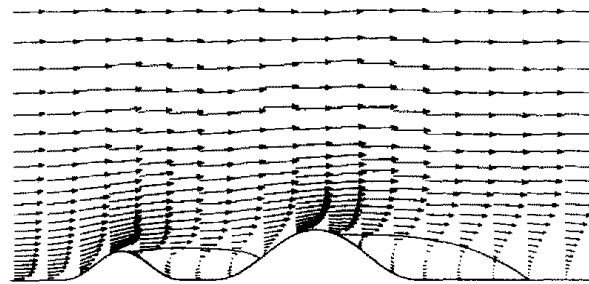


(b) Point source (Fackrell and Robins, 1982).

Fig. 1 Vertical profiles of mean concentration on the flat-floor from the elevated source (symbols, experiments; lines, computations). (b) with a correction of turbulent eddy diffusivity.



(a) S3H4-S3H7 ($k-\epsilon$ turbulence model).



(b) S5H4-S5H7 (low- Re -number model).

Fig. 2 Velocity vector plots of the numerical prediction (Kim et al., 1997) for the atmospheric wind flow over the double hills (boundaries of recirculation region are drawn with solid lines).

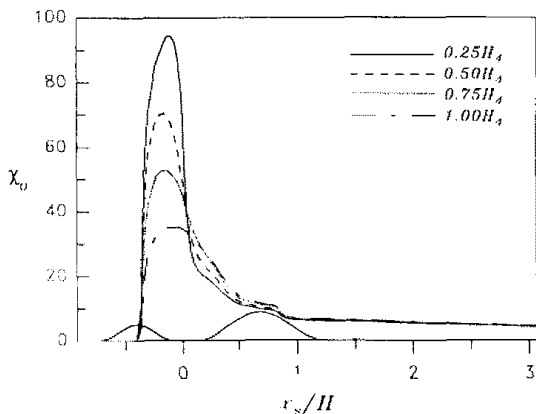


Fig. 3 Distributions of ground-level concentration over the double hill, S5H4-S5H7 from the source at upwind base.

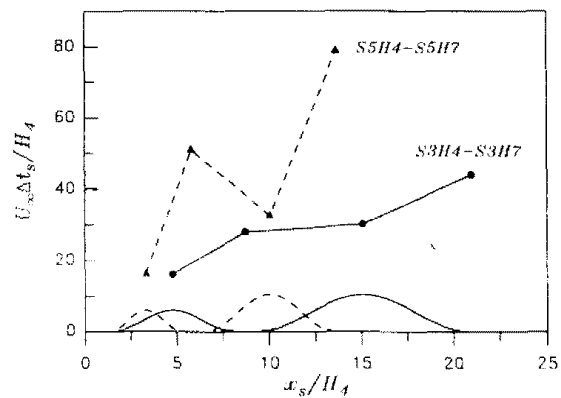


Fig. 4 Comparisons of duration time for the double hills from the temporally released source at upwind base.