

DR6 (SL4) KRM 대기확산모델의 수행능력 Performance of KRM Dispersion Modelling System

김용준

기상청 기상연구소 예보연구실

1. 서론

컴퓨터가 일반화됨에 따라 대기질 관리 및 연구 분야에서 수치모델 이용이 보편화되고 있다. 현재 사용되는 대기오염 수치모델의 종류는 매우 다양하며, 구동에 필요한 전산시스템의 규모도 다양하다. 연구용 및 대형 모델들은 활용 분야가 넓고 신뢰도가 높은 반면 대형 전산시스템과 고도의 전문 인력을 요구한다. 그러나, 국내 대부분의 대기질 관련 기관의 사용 가능한 전산시스템과 담당 인력을 고려할 때 대형 모델의 사용이 일반화되기에는 한계가 있다.

본 연구는 발전소, 공장, 지방자치단체 등 국내의 대기질 관리기관의 가용 전산기가 개인용 컴퓨터(PC)인 점을 고려하여, 개인용 컴퓨터만으로도 구동이 가능한 대기오염 확산모델을 개발하였다. 또한, 대기질 관리기관이 대기오염모델과 컴퓨터 전문가의 확보가 어려운 점을 고려하여 대기오염 관리에 대한 기본 지식과 Windows 활용 기본 기술만을 소유한 담당자도 시스템을 쉽게 사용할 수 있도록 GUI(Graphical User Interface) 모델링 시스템을 개발하였다.

개발한 KRM 대기확산 모델링시스템을 단순지형과 복잡지형에서의 이상자료에 대해 시험 모의하여 검증하였고, Tamar Valley(TAS, Australia)의 제련소와 Mae Mo(Thailand)의 발전소의 집중관측자료를 이용하여 실제 적용시험하였다.

2. KRM 대기확산모델

2.1. KRM 대기확산모델 개요

KRM 대기확산모델(Korea Meteorological Administration - CSIRO Division of Atmospheric Research - CAMM, Monash University Dispersion Model)은 배출된 대기오염물질의 각 입자 또는 puff의 이동을 추적하여 오염도를 산출하는 Lagrangian 확산모델이다. CSIRO Division of Atmospheric Research, Australia 운영모델인 LADM(Lagrangian Atmospheric Dispersion Model; Hurley & Physick, 1991, 1993a, 1993b, 1997; Hurley & Manins, 1995; Physick 1996; Physick et al., 1994)을 기본 모델로 개발되었다. LADM의 대기오염모델 중 Particle scheme과 Part Puff scheme을 PC 환경과 GUI의 모델링시스템 환경에 적합하도록 수정하였고, Skewed Puff scheme을 본 연구에서 개발, 첨가하였다. 그래서, KRM 대기확산모델에는 다음의 3 scheme이 포함되어 있다.

① Particle scheme

배출원에서 배출되는 오염물질을 다량의 입자 형태로 표현하며, 각 입자의 이동을 3차원 평균 풍속과 난류향으로 계산한다. 난류향의 연직 성분은 대기가 불안정한 경우에는 homogeneous turbulence parameterization으로, 안정한 경우에는 inhomogeneous turbulence parameterization으로 계산하며, 수평 성분은 Gaussian turbulence parameterization으로 계산한다. 각 receptor에서의 오염농도 $C(x, y, z)$ 는 아래 식 1과 같이 receptor를 중심으로 한 box 내(크기 = $\Delta x \Delta y \Delta z$)에 존재하는 각 입자에 의한 효과를 합하여 산출한다.

$$C(x, y, z) = \sum_n \frac{q_n}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (\text{식 1})$$

여기에서,

q_n : mass of particle n

이다.

Particle scheme은 각 입자의 위치를 평균풍과 난류향을 사용하여 비교적 정확하게 추정하므로 산출

된 오염농도의 신뢰도는 상대적으로 높다고 할 수 있지만 배출 입자수가 많아지면 난류항과 위치 산출에 계산시간이 많이 소요되고 모델 수행에 필요한 기억용량의 크기가 급증한다.

② Part Puff scheme

오염물질을 소량의 puff 형태로 배출한다. 각 puff의 수평방향 이동은 수평방향 평균 풍속으로 하며, 연직방향 이동은 Particle scheme과 같이 평균풍속과 난류항으로 계산한다. receptor에서의 오염농도 $C(x, y, z)$ 는

$$C(x, y, z) = \sum_n \frac{q_n}{2\pi\sigma_y^2 \Delta z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (\text{식 2})$$

여기에서,

σ_y : standard deviation of horizontal variation of puff's movement

r : distance between receptor and puff's center

이다. 위 식 2에서 알 수 있듯이, puff의 수평 방향 확산은 Gaussian PDF (probability density function)을 가정한다.

적분시간당 배출하는 puff의 수를 Particle scheme 배출 입자수의 1/10 - 1/100 정도만 하여도 되므로 계산시간과 기억용량을 줄일 수 있다. 그러나 각 puff의 영향권내 ($r < 3 \sigma_y$ 로 함) 수평방향 난류의 변동을 고려할 수 없는 면이 있다.

③ Skewed Puff scheme

배출원에서 적분시간 동안 단지 1개의 puff를 배출하며, 이 puff는 3차원 평균을 따라 움직인다고 가정한다. 시간에 따른 각 puff의 수평방향 확산은 위의 Part Puff scheme과 같이 Gaussian PDF 확산식 (식 2 참고)을 사용하며, 연직방향 확산은 아래 식 3의 skewed puff PDF 확산식 P_z 를 사용한다.

$$P_z = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{N=-n}^n \frac{1}{t} \frac{a_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{\left(\frac{z'}{t} - w_i\right)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (\text{식 3})$$

여기에서,

$$z' = c_j z - z_s + 2 N H,$$

$$c_j = -1/+1,$$

z : height of receptor

z_s : height of puff's center

a_i : area coverage of updrafts/downdrafts

w_i : updrafts/downdrafts velocity

i : standard deviation of updrafts/downdrafts velocity

n : no. of reflections at ground/mixed-layer height

H : mixed-layer height

t : travel time

이다. receptor에서의 오염농도 $C(x, y, z)$ 는

$$C(x, y, z) = \sum_n \frac{q_n}{2\pi\sigma_y^2 \Delta z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) * P_z \quad (\text{식 4})$$

이다.

Skewed Puff scheme은 puff의 수가 적고 난류항을 계산하지 않으므로 계산시간과 기억용량을 현저하게 줄인다.

2.2. KRM 대기확산모델의 활용 범위

KRM 대기확산모델은 4차원의 대기오염농도 $C(x, y, z, t)$ 를 산출하며, 수용모델(receptor model)이므로 임의의 관측점의 오염농도 변화를 산출한다. 또한, Lagrangian 모델이므로 각 입자 또는 puff의 시공간적 위치를 추적할 수 있다.

KRM 대기확산모델은 점 오염원, 면 오염원, 상자형 오염원과 buoyant 및 non buoyant 선형 오염원 등 다양한 오염원에서 배출되는 비반응 오염물질의 확산을 모의할 수 있다. 현재는 화학반응과정과 건조/습윤 침적 과정이 포함되어 있지 않지만 화학반응/침적 모듈을 추가할 수 있다.

3. KRM 대기확산모델의 수행능력 검증

3.1. 이상 사례 시험모의

본 연구에서 개발한 Skewed Puff scheme의 수행 능력과 신뢰도를 검증하기 위해 이미 검증되었고 Hurley & Physick, 1991, 1993a, 1993b; Physick et al., 1994) 현재 많은 지역에서 활용되고 있는 LADM의 Particle scheme 및 Part Puff scheme 결과와 비교하였다(Physick et al., 1991; Hurley and Manins, 1994, 1995; Physick and Manins, 1994 등).

단순지형에서 $U=5\text{m/s}$, $w^*=2\text{m/s}$, $H=1000\text{m}$ 인 대류사례를 가정하여 비차원화된 배출원의 높이 H_s/H 가 각각 0.065, 0.24, 0.49, 0.8, 0.99인 경우에 대해 CWIC (CrossWind Integrated Concentration)을 비교하였다. 그림 1은 $H_s/H=0.24$ 경우의 결과로, 세 scheme의 CWIC 간 차이를 발견할 수 없었다. 이 결과는 수조실험 및 다른 연구 결과(Luhar & Britter, 1989; Luhar & Sawford, 1996)와 잘 일치하였다.

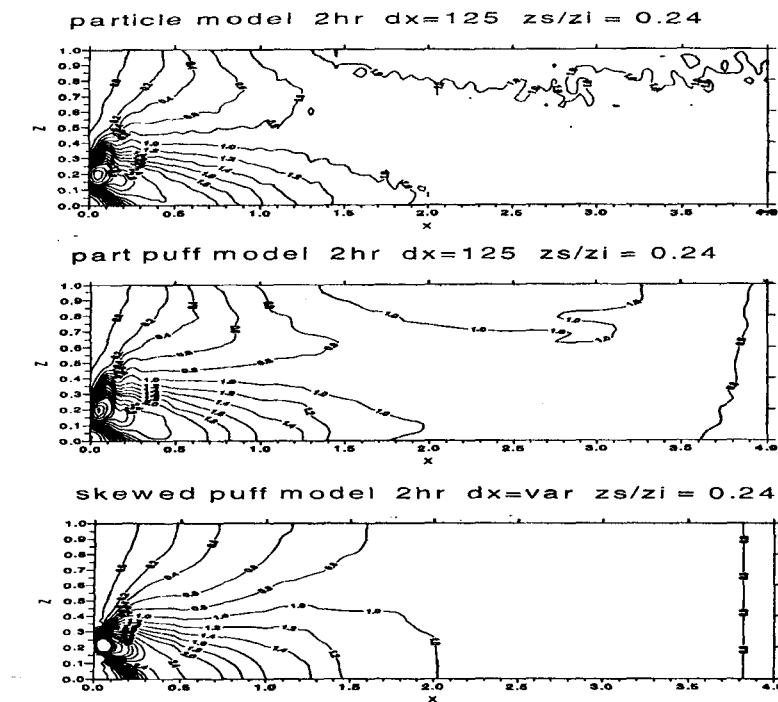


Fig. 1. Comparisons of CWICs in flat terrain($U=5\text{m/s}$, $w^*=2\text{m/s}$, $H_s/H=0.24$).

복잡지형에서의 수행능력을 검증하기 위해 Perth(West Australia)의 언덕지역에서 시험모의하였다. 산 능선 250m 높이의 인위적인 공장 굴뚝에서 배출된 오염물질의 확산을 24시간 모의하였다. LADM 기상모델로 모의된 겨울철의 실제 기상자료를 사용하였으며, 언덕 위 굴뚝에서 배출된 오염물질은 언덕 아래쪽으로 확산되었다. 세 scheme의 GLC (ground level concentraton)은 유사한 분포를 보였다. 대류 경우에 최대 오염농도 값도 10% 범위내에 존재하였다. Skewed Puff scheme의 최고 농도가 나타난 지점도 다른 두 scheme 결과와 비교하여 큰 차이를 발견할 수 없었다. 대기가 안정한 경우에는 GLC 및 최고농도 지점이 차이를 보였는데 이것은 Gaussian PDF 확산식에 의한 것으로 추정되었다.

3.2. 실제 사례 적용모의

Tamar Valley(TAS, Australia)의 제련소에서 배출된 HF의 확산을 모의하여 관측값 및 AUSPUFF (Ross et al., 1995) 모델 결과와 비교하였다. 8개의 점오염원과 6개의 buoyant line source에서 일정한 HF가 배출되며, AUSMET에 의해 산출된 기상자료를 사용하여 24시간 동안 모의하였다. 8개의 주변 지점에서 24시간 평균 농도와 비교할 때 지점에 따라 세 scheme 및 AUSPUFF 간 다른 정확도를 보였으며, 뚜렷한 경향을 볼 수가 없었다. 6시간 평균 관측자료와 비교하여 대류 경우에는 우수한 결과를 보였으나 안정한 경우에, 특히 puff scheme 들이 Particle scheme보다 큰 오차를 보였다. 이것은 Gaussian PDF 확산식이 안정한 경우의 모의에 문제가 있음을 보이는 한 예이다.

Mae Mo(Thailand)의 발전소에서 배출된 이산화황의 확산을 모의하였다. 4개 점오염원에서 일별로 일정한 농도로 배출되는 이산화황을 AUSMET 모델로 모의한 기상자료를 사용하여 43시간 모의하였다. 12개 지점에서 관측된 매시간 평균 오염도와 비교하여 농도의 변화 경향은 잘 모의하였다. 그러나 극값은 정확하게 산출되지 않았는데, 이것은 배출원 자료 및 기상자료의 신뢰도와 관련이 있는 것으로 추정되었다.

그림 2는 KRM 모델의 세 scheme 간 계산시간을 비교하였다. 266 Mhz CPU의 notebook PC를 이용한 43시간 모의에 소요된 시간이다. 전 지역의 GLC 산출과 12개 관측점에서만 산출할 때를 비교하여, Particle scheme은 계산시간의 감소가 이루어지지 않았으며 Part Puff scheme은 1/3의 감소가 있었다. Skewed Puff scheme은 단지 2분만이 소요되어 receptor 개수가 작을 때 매우 빠르게 모의함을 보였다.

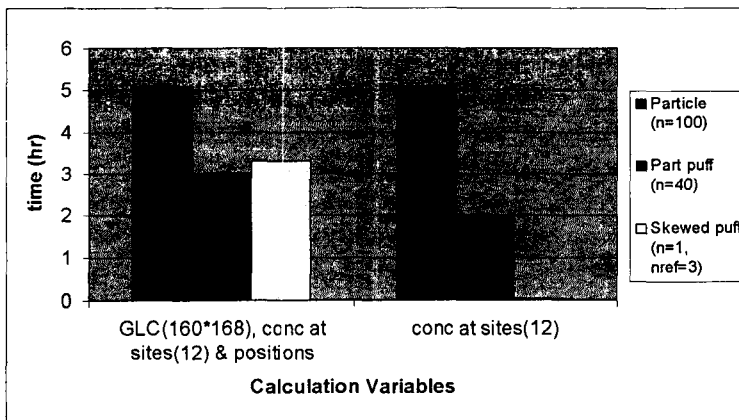


Fig. 2. Comparisons of computing time for Mae Mo case. (Simulation Period = 43 hours, dt = 60 sec, CPU = 266Mhz).

4. 향후 계획

KRM 대기확산모델의 적용 범위와 신뢰도, 빠른 계산능력, 간편한 GUI 모델링시스템 등을 고려할 때, 활용도는 매우 높다. 또한, 사용자 요구에 따라 GUI 모델링시스템을 최적화할 수 있다. 그러나 지속적인 개선과 더 많은 사례를 모의하여 결과의 신뢰도를 향상시켜야 하며, 통합모델링시스템으로 발전시키기

위해 기상모델, 배출원 모델, 영향 모델, 정책모델 등과 통합하는 작업이 필요하다.

감사

본 연구의 연구 시설과 자료, 조언을 한 CSIRO Division of Atmospheric Research, Australia의 Dr. P. Manins, Dr. P. Hurley, Dr. A. Luhar와 CAMM, Monash University, Australia의 Dr. G. Ross, Mr. A. Lewis, G. Koutsenko 에게 감사한다. 이 연구는 한국과학재단의 해외 Post-Doc 연수 지원으로 이루어졌다.

참 고 문 헌

- Hurley, P. J., and P. Manins, 1995: Plume rise and enhanced dispersion in LADM. CSIRO Division of Atmospheric Research ECRU Technical Note No. 14.
- _____, and _____, 1994: Air quality modelling in complex terrain-Gladstone. *Clean Air '94: proceedings of the Clean Air Society of Australia and New Zealand 12th International Conference & 6th Regional Conference of the IUAPPA*, Perth. 179-188.
- _____, and _____, 1995: Meteorological modelling on high ozone days in Perth, Western Australia. *J. of Applied Meteo.*, 34, 1643-1652.
- _____, and W. L. Physick, 1991: A Lagrangian particle model of fumigation by breakdown of the nocturnal inversion. *Atmos. Environ.*, 25A, 1313-1325.
- _____, and _____, 1993a: A skewed, homogeneous, Lagrangian particle model for convective conditions, *Atmos. Environ.*, 27A, 619-624.
- _____, and _____, 1993b: Lagrangian particle modelling of buoyant point sources-Plume rise and entrainment in convective conditions. *Atmos. Environ.*, 27A, 1579-1584.
- _____, and _____, 1997: LADM_P03-Version 03 of LADM's particle model. CSIRO Division of Atmospheric Research ECRU Technical Note No. 11.
- Luhar, A. K., and R. E. Britter, 1989: A random walk model for dispersion in inhomogeneous turbulence in a convective boundary layer. *Atmos. Environ.*, 24, 1911-1924.
- _____, and B. L. Sawford, 1996: An examination of existing shoreline fumigation models and formulation of an improved model. *Atmos. Environ.*, 30, 609-620.
- Physick, B., 1996: LADM_P02-Version 02 of LADM's particle model. CSIRO Division of Atmospheric Research ECRU Technical Note No. 10.
- _____, and P. C. Manins, 1994: Application of the air quality model LADM for regional planning purposes. *Air pollution II - Vol II. Pollution Control and Monitoring*. Edited by J. M. Baldasano, C. A. Breddia, H. Power, P. Zanetti. CMP Southampton, UK, 27-34.
- _____, A. Noonan, P. J. Hurley, J. L. McGregor, and D. J. Abbs, 1993: The Lagrangian Atmospheric Dispersion Model. CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper No. 24.
- _____, A. Noonan, P. Manins, P. J. Hurley, and H. Malfroy, 1991: Application of coupled prognostic windfield and Lagrangian dispersion models for air quality purposes in a region of coastal terrain. *Air Pollution Modelling and its Application IX*. Edited by H. van Dop and G. Kallos, Plenum Press, New York, 1992, 725-729.
- Ross, D. G., A. Lewis, and G. Koutsenko, 1995: AUSMET (NUATMOS) Meteorological Model User's Manual. Center for Applied Mathematical Modelling, Monash University Report No 3/95.