

복잡지형에서의 대기순환모델에 관한 연구

윤 준용^{*1}, 이 성철^{*2}, 흥 민선^{*3}

A Study on the Development of Air Pollution Model Applicable to the Complex Terrain

J. Y. Yoon, S. C. Yi and M. S. Hong

The objective of this paper is to develop a computational model for the prediction of the pollutant spread from a mass source over a complex terrain. The model comprises a two-dimensional, steady state flow model and a concentration model which employs the results of the computed flow field. The computational model is applied to predict the spread of pollutants for Sanbon city, and the two cases have been compared with the results of SF₆ trace experiments.

Key Words : k- ω 난류모델(k- ω Turbulence Model), 대기오염 모델링(Air Pollution Modelling), SF₆ 추적자 실험(SF₆ Trace Experiments), 유한해석법(Finite Analytic Method)

1. 서론

미국등 선진국에서는 심각한 대기오염 물질들의 이동, 확산, 침전현상등을 규명하기위하여 대기오염모델링을 통한 연구가 꾸준히 진행되고있다. 대형 공해배출 공장이나 이들이 밀집된 지역이 주변환경에 미치는 영향등을 정확히 예측하기 위하여 정확한 대기오염모델링의 개발은 필수 불가결하다. 미국 아르곤연구소에서는 최근 울산시의 용역을 받아 울산지역의 대기오염 실태를 이러한 모델링을 사용하는 시뮬레이션을 통하여 환경영향평가를 수행한 바 있으며, 보다 정확한 모델링을 개발하고자 많은 연구를 계속하고 있다. 미국 아르곤연구소의 대기오염모델을 살펴보면 네가지 지표면 경계조건을 주도록

설계되어 있는데, 초원이나 허허벌판을 묘사한 지역, 호수지역, 삼림지역, 그리고 건물이 빽빽히 들어선 지역등에 각기 다른 지표경계조건을 주도록 설계되어 있다. 우리나라의 경우 이러한 연구는 초보단계에 있다고 볼 수 있다. 주로 Gaussian 모델이 환경영향평가를 위하여 사용되고 있으나 이는 평탄한 지역에서만 사용하게끔 설계되어 있어서 산악지형이 많은 우리나라의 경우 적용에 한계가 있다. 또한 산악지형과 같은 형상이 복잡한 지역에서 발생하는 유동박리현상이나 와류등의 영향은 전혀 고려할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 복잡지형에 적용할 수 있는 모델에 대한 연구가 이 인영등(1995)에 의하여 수행된 바 있는데, 미국 콜로라도 서부지역 Brush Creek 계곡에서 유동모델과 복사전달모델을 연계하여 유동해석을 수행하였다. 여기서 사용된 유동모델을 살펴보면 2차원 비정상 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하였으며, 복잡지형을 Cartesian 직교좌표계를 사용하여 해를 구하였다. 이를 위하여 복잡지형의 곡

^{*1} 정회원, 한양대학교 공학대학 기계공학과

^{*2} 한양대학교 공과대학 화학공학과

^{*3} 아주대학교 공과대학 환경공학과

면은 계단식의 직교격자로 대체되었으며 난류모델링은 고려되지 못하였다.

Bringfelt (1984)는 Phoenix code를 사용하여 굴뚝이 있는 공장건물 주위의 유동장과 농도장을 해석하였는데, 연기가시화 실험과 Gaussian Dispersion 공식에 의한 결과와의 정성적 비교를 하였다. Eldin (1985)은 준 3차원 정상유동 모델과 3차원 농도모델을 사용하여 오염물질 배출원을 갖는 긴 직육면체 근처에서의 유동장과 농도장을 계산하였다. 직교좌표계를 이용한 유한차분법 (F.D.M)을 이용하였으며, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 유동장을 해석하였지만 실험결과에 대한 비교는 이루어지지 않았다.

대기유동의 경우 오염물질 측정에 관한 실험 자료를 얻기는 용이하지 않다. 풍향이나 풍속이 위치에 따라서 시시각각 변할 뿐만 아니라 고도 변화에 따른 풍향이나 풍속 또한 균일한 분포를 갖지 못한다. 오염물질의 농도를 측정할 때도 고도변화를 고려한 측정은 거의 불가능하다. 수 백미터 상공의 오염물질을 측정하기 위한 설비가 어렵기 때문이다. 따라서 대부분의 실험은 지표면에서 수행되고 있으며, 그나마 측정시점의 풍향이나 풍속은 고려되고 있지 않은 실정이다. 또한 기상청에서 제공하는 기상자료도 측정시간에 측정지점에서의 고도에 따른 풍속이나 풍향자료를 제공할 수 없을 뿐만 아니라 있다하더라도 그 자료의 신뢰성에 의심이 가는 실정이다. 이와 같이 고도에 따른 신뢰성있는 기상자료 및 오염물질 측정자료를 얻는 것이 어려우므로 대기오염 모델링은 3차원적으로 해석하기에는 아직 이른 것으로 판단되고, 또한 실험자료와의 정량적인 비교보다는 정성적인 비교할 수밖에 없으리라 사료된다.

본 연구에서는 최근 급속한 발전을 거듭하고 있는 난류모델링과 임의의 복잡지형의 형상경계 문제를 해결할 수 있는 일반 비직교 경계고정좌표계를 이용하여 유동장과 농도장을 해석하였다. 확산보다는 대류의 영향이 크다고 가정하여 2차원 해석을 하였고 SF₆를 이용한 추적자 실험의 결과와 정성적 비교를 하였다.

2. 본론

2.1 가정

본 연구를 통하여 설정된 가정은 다음과 같다.

- 1) 대기유동은 2차원, 정상상태, 비압축성 유동으로 가정한다.
- 2) 수평방향의 농도분포는 확산에 의한 영향을 무시한다. 즉, 대류 (Convection) 의 영향이 확산에 의한 것보다 크다고 가정한다.
- 3) 고도에 따른 풍속의 분포는 균일하다고 보고, 지표로부터 경계층 두께는 250m 로 한다.
- 4) 입자의 속도는 바람의 속도와 같고, 오염물질의 비중은 공기와 같다.

2.2 연구 모델 선정

본 연구에서 선정한 지역은 Fig. 1에 나타난 산본지역이며, 계산영역은 지표에서 상공 1km 로 하고, 추적자 실험시의 바람의 방향에 따라



(a) case1 : A - mass source point
B - SF₆ 측정 위치



(b) case2 : A - mass source point
B - SF₆ 측정 위치

Fig. 1 산본 지구의 1 : 50000 지형도

영역을 선정하여 1 : 50000의 지형도를 바탕으로 case1과 case2에 대한 2차원 계산영역을 선정하였다.

2.3 지배방정식

수치해석을 위한 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \\ - \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $Re = \rho U_0 H / \mu$ 이다.

본 연구에서는 Wilcox(1988)가 제안한 $k-\omega$ 모델을 사용하였다. 이는 와점성 계수(ν_t)를 기존의 $k-\epsilon$ 모델과 달리 난류 운동에너지와 진동수 차원을 갖는 비소산율(specific dissipation rate) ω 와 관련지어 수식화 하였다. Wilcox에 따르면, ω 는 난류 에너지 소산율 ϵ 에 대한 난류 운동 에너지 k 의 비로써 난류의 특성 시간 크기(characteristic time scale)의 역수로써 간주되어질 수 있다고 하였다. 따라서, ω 는 단위 에너지당 난류 에너지 소산율로서 나타내지며, 이러한 $k-\omega$ 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re} + \sigma^* \nu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ - \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \omega k \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{1}{Re} + \sigma \nu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ - \frac{\gamma \omega}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 k 및 $\omega (= \epsilon / \beta^*)$ 는 모두 무차원화된 값을 나타낸다. 그리고 와점성계수 ν_t 는 식(5)와

같이 나타낼 수 있다.

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \tag{5}$$

유한 검사 체적 안에서 부유하는 SF₆입자의 보존법칙을 적용하면, 일반화된 농도 방정식이 세워질 수 있다. C는 부피에 기준한 농도로서 유체의 부피당 SF₆의 부피로 정의되며, Γ_s 는 와확산계수, \vec{u}_p 는 부유하는 입자의 속도벡터이다. 이를 미소 검사 체적에 적용하여 미분 방정식 형태로 바꾸면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{u}_p) = \nabla \cdot (\Gamma_s \nabla C) \tag{6}$$

식(6)으로부터 비압축성 유체이고 입자의 크기와 모양이 균일하다고 가정하면, 일반적인 비정상 3차원 농도방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u}_p \cdot \nabla C = \nabla \cdot (\Gamma_s \nabla C) \tag{7}$$

또한 입자의 속도는 바람의 속도와 같고, 비중은 공기와 같다는 가정하에서 직교 좌표계로 쓰면 식(8)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_s \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \tag{8}$$

농도방정식에서의 Γ_s 는 eddy diffusivity를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_s = \beta \nu_t \tag{9}$$

여기서, β 는 turbulent schmidt number(σ_c)의 역수로 보통 그 범위는 0.5에서 1.0사이의 값이 널리 이용되고 있다. Celik and Rodi (1991)는 $\sigma_c = 0.5$ 를 추천하고 있고, Umeyama (1992)는 $\sigma_c = 1.0$ 을 추천하고 있다. 본 연구에서는 Umeyama가 추천한 값을 이용하였다.

2.4 경계조건

대기유동현상의 특성상 국부적인 속도 분포를 미리 예측하기가 어렵고, 유동 자체가 변화가 심한 유동이므로 입구와 출구 조건에 몇가지 가정을 하였다. 즉 대기층의 밀도분포로 인한 성

층효과와 Coriolis 힘의 영향, 습도와 온도변화 등은 무시하고, 입구에서는 평판상의 난류유동과 같은 속도분포로 가정하였다.

대기경계층의 높이는 기후의 여러인자와 더불어 지면의 거칠기 조건에 의해 결정된다. 본 연구에서는 각부분마다 변화하는 지면조건을 사용하는 것이 더욱더 계산의 정확성을 떨어뜨리고, 계산의 복잡성을 더하므로 지면거칠기가 전 영역에서 동일하다고 가정하였다. 대부분의 영역이 논밭과 산으로 되어있으므로, 대기경계층의 높이를 250m로 가정하였다.

이 경계층에서는 난류 경계층의 속도 분포로써 7승근 법칙에 근거한 속도 분포를 주었고, 경계층 외부에서는 일정속도 $U_o(=5m/s)$ 를 주었다.(Fig. 2)

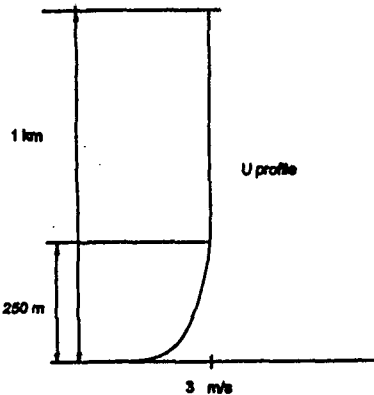


Fig. 2 case1의 대기 경계층과 입구경계 속도분포

계산영역의 정확한 입구경계조건은 계산결과 의 신뢰성에 매우 중요한 영향을 끼치므로 입구에서의 속도(u,v)와 k, ω 의 분포는 평판위에서의 유동을 충분히 발달한 난류유동이라 가정하여 수렴한 결과를 이용하였다.

공기의 물성치는 지면에서 값과 1km상공의 값을 산술평균한 값을 쓴다.

$$\rho = 1.1705 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.77325 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$$

$$Re = \frac{\rho U_o H}{\mu} = 3.3 \times 10^8 \quad (H=1km)$$

평판유동해석시 초기입구조건은 다음과 같고

$$U = U_o \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/n} \quad (n=7) \quad , \quad V=0$$

출구에서는 Neumann조건을 사용하였으며, 지면에서는 점착조건을 주었다.

지표면에서 mass injection이 있는 점은 물리적으로 Source 점, 즉 특이점이된다. 따라서 이 지점의 처리가 매우 어려우며, 특히 이 부분의 난류량은 정의하기가 매우 어렵게 되어있다. 본 연구에서는 Wilcox (1991)의 기술을 사용하고 있으며, 그에 대한 타당성은 여러 관련논문에 발표된 바 있다. 즉, 표면에서의 normal flow velocity인 v_ω 에 대하여 무차원 속도를 정의하고, ω 는 이 속도성분에 영향을 받는 다음과 같은 모델링을 사용한다.

$$v_\omega^+ = v_\omega / u_\tau$$

$$\omega = \frac{u_\tau^2}{\nu} S_B \text{ at } y = 0$$

$$S_B = \frac{20}{v_\omega^+(1+5v_\omega^+)}$$

계산영역의 윗부분, 즉 대기 상층부에서는 Nuemann조건을 사용하였다.

3. 수치계산 기법

수치계산 방법은 Patel and Yoon (1995, 1996)이 사용한 방법을 적용하였다. 이 방법은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 일반화된 비직교 곡선좌표계로 수학적 완전변환(full transformation)하여 푼다. 운동량방정식과 난류 운동에너지의 수송방정식 등은 유한해석법(Finite Analytic Method, FAM)을 이용하여 이산화시킨다. 이 때, 압력과 속도의 연결은 SIMPLER 알고리즘을 사용한 연속방정식을 통해 이루어진다.

4. 계산 결과 및 고찰

4.1 Case1 계산결과

Case1은 추적자 실험⁽¹⁾의 측정치와의 비교를 위한 수치계산 결과이다. Fig.1(a)의 지형도에 계산영역으로 삼은 지역을 나타내고 있다. 이것은 실험에서 SF₆의 source의 위치(A)와 SF₆의 측정위치(B), 바람의 방향을 고려한 계산영역이다.

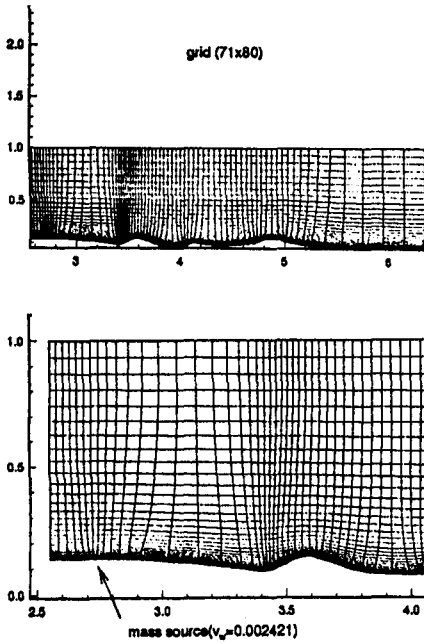


Fig. 3 case1의 계산영역과 격자분포

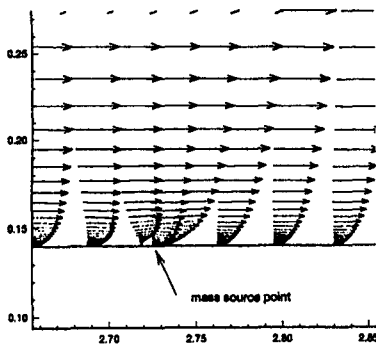


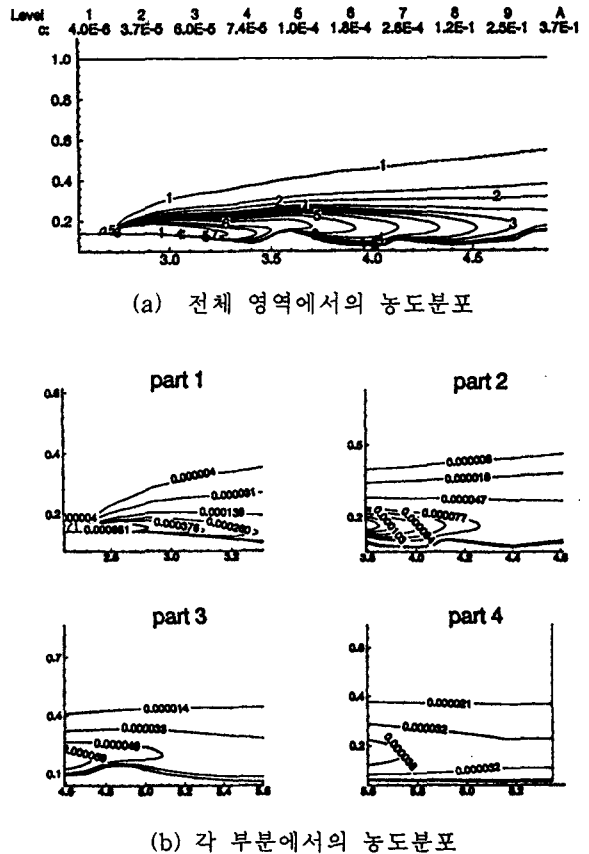
Fig. 4 mass source 부분의 속도분포 (case1)

Fig. 3에서는 계산영역에서의 격자와 mass source의 위치를 보여주고 있다. 사용된 격자수는 71×80 개다. Mass source부분에서는 초기에 생길 수 있는 오차를 줄이기 위해 격자를 밀집시켜 주었다. Case1의 입구경계 속도분포는 경계층을 250m, 평균속도는 3m/s로 주었으며, 평판 위에서 난류유동해석을 통해 얻은 충분히 발달된 k 와 ω 분포값을 입구 경계조건으로 주었다. Fig. 4에서는 Mass source부분에서의 속도장을 보여주고 있다. 실제 같은시간 기상

청의 풍속과 풍향을 고려한 결과 평균 3m/s의 바람이 분다고 가정하면 $Re=1.905 \times 10^8$ 이다. 이때 mass source가 위치한 부분은 그림과 같다. 실험에서의 SF₆의 유출량은 15.3 kg/hr이고, 앞에서 source인 유체와 공기의 밀도가 같다고 가정하였으므로 밀도는 1.17 kg/m^3 이다.

Source가 있는 검사체적이 5m (2차원) 이므로 유출속도는 $7.262 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 이다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 유출속도가 매우 작아 유동장에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. Fig. 5는 case1의 SF₆ 농도분포를 나타낸 것이다.

Source에서의 유출속도가 너무 작아서 source 주위에서는 비교적 높은 농도분포를 나타내고 있다. 실험에서 SF₆가 검출된 지점에서는 약 $2.94 \times 10^{-3}\%$ 의 농도값 (지상 1.5m 기준)이 계산되었다.



(a) 전체 영역에서의 농도분포

part 1

part 2

part 3

part 4

(b) 각 부분에서의 농도분포

Fig. 5 case1의 농도분포

하지만 실험에서는 source로부터 1.24km떨어진 두 측정위치에서 1430ppt와 2880ppt가 측정되었다. 실제 추적자 실험은 일정한 양의 SF₆를 일정시간 방출한 뒤에 자동차를 타고 source 주위의 도로를 운전하면서 이 SF₆가 검출된 장소와 그 곳의 농도를 측정하는 것이다. 단지 두 곳에서만 측정값이 존재하였고 그 양도 상당히 미미한 값이었다. 그러나 source에서의 농도값이 측정되지 않았기에 source에서의 값에 대한 상대적 값을 알 수 없었고 계산결과와의 정량적 비교도 불가능하였다. 좀 더 많은 곳에서의 값을 측정하였다면, 즉 source로부터의 거리에 비례하여 측정값이 존재하였다면, 정량적인 비교가 가능하였으리라는 아쉬움이 남는다.

4.2 Case2 계산결과

Case 2는 두 번째 실험의 측정값과의 비교를 위해 수치계산한 결과이다. 두 번째 실험영역은 Fig.1(b)에 나타나 있다. 여기서는 그날의 실제 측정된 풍속을 고려하기 위해 입구경계의 속도분포를 Fig. 6과 같이 주었다. 실제 측정된 풍속은 변화가 아주 심한 분포를 가지고 있어서 입구경계의 속도분포로 쓰기 위해 그림과 같이 근사적인 값으로 변환해서 사용하였다. Case 2에서도 난류량들의 경계조건은 실측자료가 존재하지 않으므로 k 와 ω 값은 평판유동해석에서 얻은 값을 사용하였다.

Fig. 7에서는 계산영역의 격자분포를 나타내고 있다. 사용된 격자수는 101×80개이고 역시 case 1과 같은 방법으로 격자를 형성하였다. Fig.1(b)에서 보는 바와 같이 이부분의 지형은 도심지역으로 고도가 거의 균일하여 마치 평판과 같은 지형을 보여준다. 실제 건물의 밀집지역이므로 건물에 의한 영향으로 유동장이 변화하겠지만, 여기서는 이러한 영향은 고려되지 않았다. Fig. 8은 mass source가 있는 지역에서의 유동장을 나타낸 것이다, 여기서 속도벡터의 변화가 거의 없는 것은 두 번째 실험의 source 유량이 22.13 kg/hr이므로 검사체적(5.7m)을 고려할 때 유출속도가 9.21×10^{-4} m/s밖에 되지 않기 때문이다.

Fig. 9에서는 case2의 SF₆ 농도분포를 나타낸 것으로 하류로 가면서 농도분포가 거의 변하지

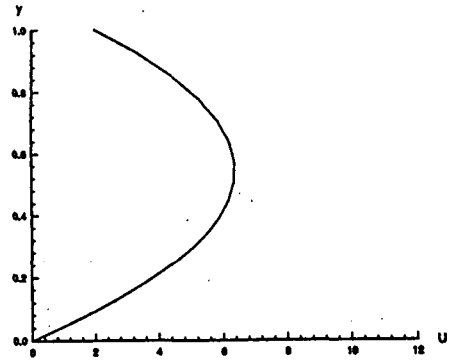


Fig. 6 case2의 입구경계 속도분포

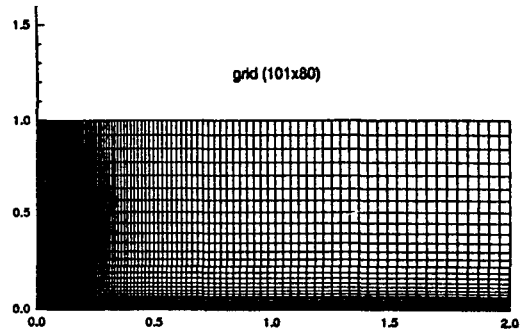


Fig. 7 case2의 계산영역과 격자분포

않고 있다. 추적자 실험 결과 source로부터 약 1km떨어진 두지점에서 SF₆가 검출되었다. 각각의 검출량이 2800ppt와 5200ppt이었고, 유출지점에서는 9760ppt이 검출되었다. 그러나 source에서의 농도값이 9760ppt로 검출되었다는 사실은 이해하기 힘든 점으로, 많은 시간이 경과한 후 SF₆가 거의 남지않은 상태에서 측정된 값이 아닌가하는 의심이 든다. 이 때 source에서 1km떨어진 지점의 계산된 값은 2.247×10^{-4} % (지상 1.5m기준)로 나타나 어느정도 신빙성이 있어 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 산본지역의 지형을 바탕으로 오염물질의 mass source가 있는 두가지 경우에 대해서 속도장과 농도장을 수치해석하고, 이 결과를 SF₆를 이용한 추적자 실험의 측정치와 비

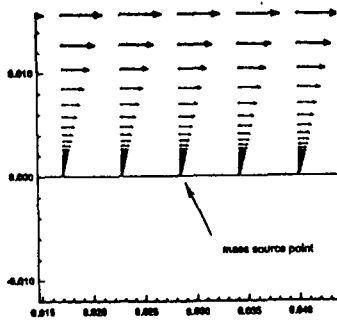
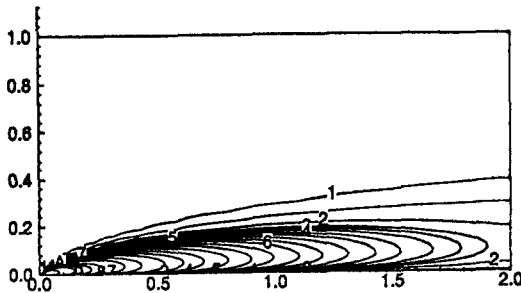
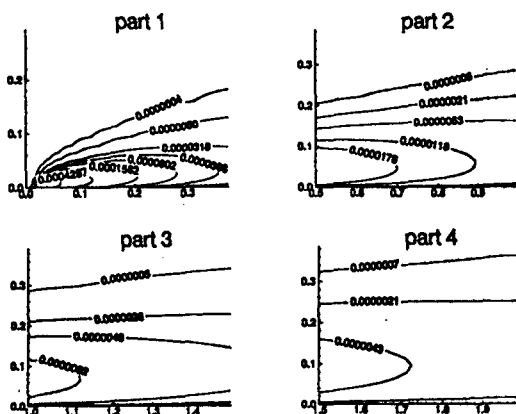


Fig. 8 mass source 부분의 속도분포 (case2)

Level c: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A
 4E-7 3E-6 4E-6 5E-6 6E-6 8E-6 1E-5 2E-5 3E-5 6E-5



(a) 전체 영역에서의 농도분포



(b) 각 부분에서의 농도분포

Fig. 9 case2의 농도분포

교해 보았다. 근본적으로 대기유동장은 매우 불규칙하고 변화의 요인이 되는 인자도 많은 관계로 상당히 근사화 된 경계조건을 줄 수 밖에

없었으며, 계산영역의 지형 또한 도심에서의 밀집된 건물 등을 고려하기가 어려웠다. 또한 실측자료의 측정값에도 신뢰성이 결여된 이유로 실측치와 계산결과는 많은 오차를 보이고 있다.

앞으로 오염물질 즉 부유물질과 공기의 밀도차, 지형지물 등에 의한 유동장의 변화 등을 고려해 주고, 3차원 유동해석을 통하여 대기유동장 분포를 예측한다면 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다. 그러나 대기 기상조건 of 정확한 실측자료와 신뢰성있는 오염물질의 측정 자료의 확보가 선행되어야 할 것이다. 본 연구의 case1, case2에서 보았듯이 large scale 인 영역에서 대략적인 유동장 분포와 농도장 분포를 구할 수 있었고, 이러한 결과를 잘 분석하면 오염물질을 배출하는 사업장의 입지선정에 중요한 자료로 이용될 수 있으리라 생각된다

6. 후기

본 연구의 두 번째, 세 번째 저자는 한국 과학재단이 지원한 목적기초 지원사업(특정연구과제: 95-0502-09-01-3)의 도움에 감사를 표하는 바입니다.

참고문헌

- [1] Bringfelt B. (1984), "Phoenics-Simulations of Plume Spread in The Lee of A Building and Comparisons with Smoke Experiments and Gaussian Dispersion Formulae," Meteorologiska Avdelningen for skningssektionen (Mf).
- [2] Celik, I. and Rodi, W. (1991), "Modeling Sediment-Transport Capacity for Open Channel Flow," J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 117, No. 2, pp. 191-204.
- [3] M. A. Serag-Eldin(1985), "The Spread of Pollutants Emitted from Long and Large Obstacles in Atmosphere", CAIRO SCIENTIFIC CENTER Technical Report 009.

- [4] Lee, I. Y., Park, H. M. and Oh, J. H. (1995), "Numerical Simulation of Nocturnal Drainage Flow Properties in a Rugged Canyon", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 72, pp.305-21.
- [5] Patel, V. C., Yoon, J. Y. (1995), "Application of Turbulence Models to Separated Flow over Rough Surfaces", *J. Fluids Engineering*, ASME, Vol. 117, No. 2, pp. 234-241.
- [6] Umeyama (1992), "Vertical Distribution of Suspended Sediment in Uniform Open Channel Flow", *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 118, pp. 936-1441.
- [7] Wilcox, D. C. (1988), "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models", *AIAA J.*, Vol. 26, No. 11, pp. 1299-1310.
- [8] Wilcox, D. C. (1991), "Progress in Hypersonic Turbulence Model", AIAA-91-1785, AIAA 2nd Fluid Dynamics.
- [9] Yoon, J. Y., Patel, V. C. (1996), "Numerical Model of Turbulent Flow over Sand Dune", *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 122, No. 1, pp. 10-18.