

# 유동장 수치해석이 포함된 퍼프모델을 이용한 오염물질의 확산 해석

정영래<sup>\*1</sup>, 박원규<sup>\*2</sup>, 박옥현<sup>\*3</sup>

## Pollutant Dispersion Analysis Using the Gaussian Puff Model with the Numerical Flowfield Information

Y. R. Jung, W. G. Park, and O. H. Park

The computations of the flowfield and pollutant dispersion over a flat plate and the Russian hills of various slopes are described. The Gaussian plume and the puff model have been used to calculate concentration of pollutant. The Reynolds-averaged unsteady incompressible Navier-Stokes equation with low Reynolds  $\kappa-\epsilon$  model has been used to calculate the flowfield. The flow data of a flat plate and the Russian hills from Navier-Stokes equation solutions has been used as the input data for the puff model. The computational results of flowfield agree well with experimental results of both a flat plate and Russian hills. The concentration prediction by the Gaussian plume model and the Gaussian puff model also agrees fairly well with experiments.

**Key Words** : 오염물질확산(Pollutant Dispersion), 가우시안 플룸모델(Gaussian Plume Model), 가우시안 퍼프모델(Gaussian Puff Model), 비압축성 나비에-스톡스방정식(Incompressible Navier-Stokes Equation), 러시아언덕(Russian Hill)

### 1. 서 론

선진국에서는 오래전부터 환경문제의 심각성을 인식하여 오염물질의 배출을 규제할 수 있는 법안을 마련해놓고 있는 실정이다. 국내에서도 대기오염물질을 방출하는 시설물에 대한 심각성을 인식하면서 환경오염 유발 시설물에 대한 집단적 거부와 같은 민원을 발생시키고 있다.

따라서 이와 같은 환경오염 유발 시설의 건설을 위해서는 이러한 시설물을 건설하기 이전에 오염원이 주변환경에 미치는 영향을 파악하는 것이 필수적일 것이다. 대기오염 저감과 오염현상의 원인규명을 통한 규제대책 수립 등 대기환경관리를 위해서는 대기중 오염물질 확산에 대한 신뢰성 있는 예측자료가 필요하며, 이를 위해서는 무엇보다도 오염물질의 운송매체인 유동장에 대한 정확한 정보, 그리고 목적에 잘 부합되는 대기오염 확산모델이 필요하다.

대기오염 확산예측을 위한 연구에는 크게 풍동실험과 같은 물리적 모델과 해석/수치 모델과 같은 수학적 모델로 나눌 수 있다. 풍동실험은 Gong[1]과 Arya 등[2]에 의해 수행되

\*1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*2 정회원, 부산대학교 기계공학과

\*3 부산대학교 환경공학과

있으나 축소모델의 사용으로 인해 오염물질의 이동과 확산을 관찰할 수 있는 장점은 있으나 실제 크기로 확대 해석하는 과정에서 정성적 의미 이상을 기대하기는 힘든 실정이다. 수학적 모델중에서 확산방정식을 수치적으로 계산하는 연구는 Castro[3], 김현구[4], 박근[5] 등에 의해 언덕주위에 대한 구배확산이론이 계산되어졌으며 컴퓨터와 수치기법의 발달로 인해 2차원 복잡지형에 대한 확산현상은 예측가능하지만 3차원 확산현상에 대해서는 수평방향 확산계수 ( $K_y$ ) 결정이 난해하여 3차원 복잡지형에 대한 확산해석이 어렵다. 한편, 확산방정식을 풀지 않고 해석적인 방법을 사용하는 대기확산모델은 광범위한 분야에서 적용목적에 따라 많은 모델들이 개발되어있다. 특히 평탄지형에 대한 대기오염 확산모델로 가장 널리 사용되는 가우시안 플룸(Gaussian plume)모델은 간단하면서도 비교적 잘 예측하는 특징이 있지만 비정상상태 거동을 예측할 수 없고 산지와 같은 복잡한 지형에도 적용이 불가능하다. 그러나 산지와 같은 복잡지형에서 방사능 물질이나 오염물질의 누출사고가 발생하는 경우에, 사고발생이후의 풍향이나 풍속 등에 의한 비정상적인 오염물질의 확산상태를 정확히 예측하여 주민대피나 오염물의 확산방지대책을 수립해야 한다. 따라서 복잡지형에 대한 오염원의 비정상상태 거동해석이 필수적인데, 비정상상태 거동해석을 위해서는 복잡지형에 대한 비정상상태 유동장 정보를 이용하여 확산현상을 예측할 수 있는 대기확산모델의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 비정상상태 거동을 해석할 수 있는 퍼프(Gaussian puff)모델을 사용하였으며 선행된 유동장의 수치해석결과를 입력데이터로 사용하도록 하였다. 퍼프모델의 타당성 검증을 위해 평탄지형에 대한 해석을 수행하여 가우시안 플룸(Gaussian plume)모델의 결과와 비교하였으며 언덕지형에 대해 퍼프모델을 적용하여 오염물의 농도를 계산하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 방법

### 2.1 유동장 계산

비정상 상태 비압축성 점성 유동의 지배 방정식은 나비에-스톡스 방정식으로서, 이를 무차원화한 후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{E} - \hat{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{F} - \hat{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{G} - \hat{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서  $\hat{q}$ 은 유동벡터이며,  $\hat{E}$ ,  $\hat{F}$ ,  $\hat{G}$ 는 대류항을 의미하며,  $\hat{E}_v$ ,  $\hat{F}_v$ ,  $\hat{G}_v$ 는 점성항을 의미한다. 식(1)의 해를 구하기 위해 시간반복진행법(Iterative time marching)을 사용하였다. 계산에 사용된 시간 간격은 스펙트럼 반경을 계산하여 매시간 계산하였으며, 각 시간 단계에서의 반복계산은 5회로 하였다. 자세한 수치기법에 대해서는 참고문헌[6]에서 기술되었다. 본 연구에서 계산된 레이놀즈수는  $3 \times 10^4$  정도로 비교적 낮은 레이놀즈수이므로 난류모델은 Chien의 저 레이놀즈수  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였으며 난류모델에 관한 자세한 수치적 기법은 참고문헌[5]에서 기술되었다.

### 2.2 대기오염 확산모델

#### 2.2.1 가우시안 플룸(Gaussian plume) 모델

플룸모델은 배출된 오염물질의 농도 분포가 가우스분포를 이룬다고 가정한 정상상태 모델로서 기본식은 다음과 같다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)$$

여기서, C는 좌표가 x, y, z인 지점에서의 오염물질의 농도( $\text{kg m}^{-3}$ ), x는 배출원으로부터 평균 풍향방향의 거리(m), y는 x축에서 직각방향인 수평방향의 거리(m), z는 지면으로부터의 고도(m), Q는 배출원으로부터의 오염물질 배출량( $\text{kg sec}^{-1}$ ), H는 배출원의 유효고도(m),  $\bar{u}$ 는 평균수평풍속( $\text{m sec}^{-1}$ ),  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 y축과 z축상의 연

기의 확산폭(m)이다. 플룸모델은 필요에 따라서 지면반사와 혼합층 상부에서의 반사를 간단히 포함시킬 수 있다.

본 연구에서는 Pasquill-Gifford가 제안한 대기 안정도 범주중에서 중립대기에 해당하는 등급 D를 적용하였으며 플룸모델의 정확도를 좌우하는 중요한 요소인 플룸의 확산폭  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 Pasquill-Gifford와 Brookhaven의 방법을 사용하였다[7]. 먼저, Pasquill-Gifford에 의한  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 평탄지형(조도 $\approx$ 0.03m)에서의 확산실험결과로부터 유도된 것으로 가장 많이 사용되며 다음식으로 계산된다.

$$\sigma_y(x) = \frac{k_1 x}{[1 + (x/k_2)]^{k_3}} \quad (3)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{k_4 x}{[1 + (x/k_2)]^{k_5}} \quad (4)$$

여기서, 상수들의 값은 다음과 같다.

대기안정도 등급	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
D	0.0787	707	0.135	0.0475	0.465

다음으로 Brookhaven에 의한  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 거친 지형(조도 $\approx$ 1m)의 지상(108m)에서 수 km까지 실험결과에서 유도된 식으로 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_j = a_j x^{b_j} \quad (j = y \text{ or } z) \quad (5)$$

여기서 a와 b는 Pasquill 대기안정도 등급에서 중립대기인 D에 해당하는 돌풍등급 C에서 결정된다.

돌풍등급	$\sigma_y$		$\sigma_z$	
	a	b	a	b
C	0.32	0.78	0.22	0.78

### 2.2.2 퍼프(Gaussian puff)모델

퍼프모델은 연속적으로 배출되는 오염물질을, 임의 시간 간격동안 배출되는 오염물질의 질량을 가진 퍼프(Puff)의 연속적인 생성으로 근사화하여 매 시간 간격마다 생성된 퍼프를 이

동, 확산시켜 농도를 계산한 후, 전체 퍼프의 농도를 종합하는 모델이다. 1개의 퍼프가 가지는 농도분포를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$C(x, y, z) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y \sigma_z} \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (6)$$

여기서, C는 좌표가 x, y, z인 지점에서의 오염물질의 농도(kg m<sup>-3</sup>), x는 배출원으로부터 평균 풍향방향의 거리(m), y는 x축에서 직각방향인 수평방향의 거리(m), z는 지면으로부터의 고도(m), M은 퍼프 1개가 갖는 질량(Q · Δt, kg), Q는 배출원으로부터의 오염물질 배출량(kg sec<sup>-1</sup>), H는 배출원의 유효고도(m),  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 는 y축과 z축상의 연기의 확산폭(m)이며,  $\sigma_z$ 는  $\sigma_y$ 로 대체된다. 퍼프의 중심점은 국부점의 시간과 속도에 따라 이동하게 되는데, 필요한 속도장은 3차원 유동장 수치결과를 이용하게 된다. 또한 가우시안 플룸모델의 식(2)와 퍼프모델의 식(6)을 비교해볼 때, 플룸모델에서 평균수평풍속  $\bar{u}$ 항이 퍼프모델에서 또하나의  $\sigma_y$ 항으로 대체되었음을 볼 수 있다. 이것은 풍속의 영향이 퍼프의 밀도로서 제어된다는 것을 의미하며 아주 느린 풍속에서도 퍼프모델이 유용하다는 것을 알 수 있다. 퍼프모델에서는 확산되는 거리를 나타내는  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 의 결정이 가장 중요한데, Δt동안 성장하는 σ는 가상거리(Virtual distance) 개념을 이용하여 다음과 같은 과정으로 결정된다.

1. 시간 t에서의  $\sigma_y(t)$ 와  $\sigma_z(t)$ 를 만족하는 가상의 수평거리  $d_y$ 와 수직거리  $d_z$ 를 계산한다.

$$d_y = [\sigma_y(t)/a_y]^{1/b_y} \quad (7)$$

$$d_z = [\sigma_z(t)/a_z]^{1/b_z} \quad (8)$$

2. Δt시간 동안 퍼프의 하류방향 이동거리 Δd를 계산한다.
3. t + Δt 시간의  $\sigma_y(t + \Delta t)$ 와  $\sigma_z(t + \Delta t)$ 를

계산한다.

$$\sigma_y(t + \Delta t) = a_y(d_y + \Delta d)^{b_y} \quad (9)$$

$$\sigma_z(t + \Delta t) = a_z(d_z + \Delta d)^{b_z} \quad (10)$$

Fig. 1은 퍼프 생성과 이동, 확산과정을 나타낸 그림이다. 퍼프 A는 임의의 시간  $t_1$ , 퍼프 B는  $t_2$ , 퍼프 C는  $t_3$  시간에 각각 생성되었으며, 각 퍼프는 이동하면서 확산되어 각 시간에 해당되는 위치에서 원반경에 해당하는 농도분포를 가지게 된다. 오염물질의 농도는 생성된 전체 퍼프의 농도를 합하여 구할 수 있다.

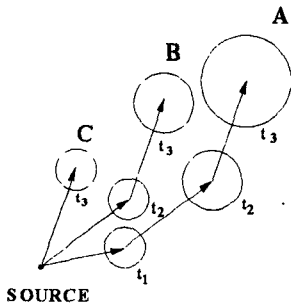


Fig.1 Schematic of puff diffusion.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동장 계산

유동장 계산은 대기오염 확산모델의 입력 데이터로 사용하기 위해 평판과 Russian hill에 대해 수행하였다. Russian hill은 Fig.2와 같은 축대칭 언덕으로 형상비(언덕 높이에 대한 언덕 총길이의 절반의 비)에 따라 구분되게 되는데, 본 연구는 그 형상비가 5, 8인 경우를 택하여 그 이름을 Hill-5, Hill-8로 나타내기로 하였다. 언덕의 형상식은 아래와 같다.

$$x = \frac{1}{2} \xi \left[ 1 + \frac{a^2}{\xi^2 + m^2(a^2 - \xi^2)} \right] \quad (11)$$

$$z = \frac{1}{2} m \sqrt{a^2 - \xi^2} \left[ 1 - \frac{a^2}{\xi^2 + m^2(a^2 - \xi^2)} \right]$$

여기서  $|\xi| \leq a$ ,  $m = n + \sqrt{n^2 + 1}$ ,  $n = \frac{H}{a}$  을 의

미하며 H는 언덕의 높이이고, a는 언덕의 절반 길이이며, n은 언덕의 평균기울기로서 위에서 정의한 형상비이기도 하다.

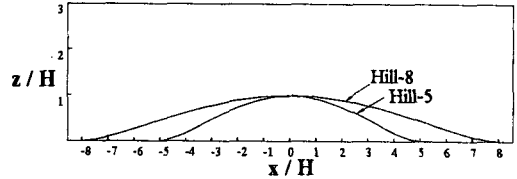


Fig.2 Topographic profiles of the Russian hills.

격자계는 수렴증진과 오차발생을 줄이기 위해서는 경계에 수직인 격자계가 바람직하나, 이 경우에는 여러 가지 물성치의 수직분포를 나타내기 위해서 수치보간법을 사용하여야 하며 이는 여러 물성치의 정확한 정량적 비교를 어렵게 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대수적인 방법으로 격자계를 구성하였으며, 저 레이놀즈수 난류모델의 요구사항에 맞도록 난류저층(Viscous sublayer)에 많은 격자를 배치하도록 경계면으로 충분히 격자를 밀집시켰다. Fig.3은 평판주위와 Russian hill중에서 Hill-5 주위에 생성시킨 격자계로서  $120 \times 31 \times 80$ 이고 Fig.3(c)에 밀집된 격자를 나타내었다. 유동계산을 위한 경계조건으로 상류 유입경계에서는 아래와 같은 조건을 부가하였다.

$$U = \begin{cases} U_\infty \left( \frac{y}{\delta} \right)^a & y \leq \delta \\ U_\infty & y > \delta \end{cases}$$

$$V = 0$$

$$k = \begin{cases} C_\mu^{-1/2} u_*^2 (1 - y/\delta)^2 & y < 0.9\delta \\ k_\infty & y > 0.9\delta \end{cases}$$

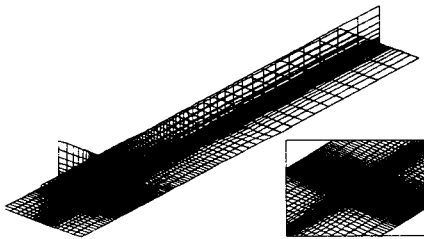
$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{xy}$$

여기서, 경계층 두께인  $\delta$ 와 지수  $a$ 는 ANSI (American National Standards Institute)에서 개활지에 해당하는 등급 C에서 주어진 값인, 275m와 1/7을 사용하였고  $\kappa$ 는 von Karman상수이고,  $u_*$ 는 표면에서의 마찰속도를 의미한다.

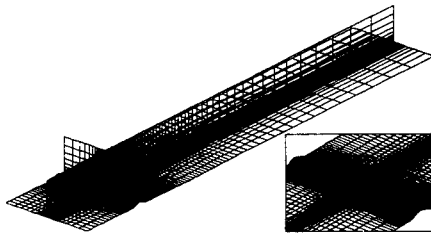
$k$ 와  $\epsilon$ 의 입구조건은 경계층 두께인  $\delta$ 에서 연속적인 난류에너지 분포를 갖도록  $y$ 에 대한 2차의 함수를 추가하였다. 지표면에서는 점착조건

(No-slip condition) 및  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ , 그외의 경계에서는 Neumann조건을 부가하였다.

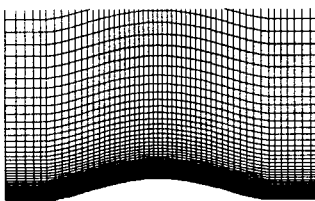
유동계산용 코드의 정확성 검증을 위해 평판에 대한 유동계산을 수행하여 Raupach와 Legg[8]에 의해 수행된 결과와 비교하였으며 Russian Hill에 대한 유동은 Arya[2]의 실험결과와 비교하였다. Fig.4는 평판에 대한 평균속도 분포로서 계산결과가 실험값과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있고 Fig.5, Fig.6은 각각 Hill-5, Hill-8의 언덕 각 위치에서의 속도분포로서 Arya의 실험[2]과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 이 속도분포를 보면 언덕정상으로부터 유동이 접근함에 따라 유속은 증가하며, 언덕의 후류에서는 점차 감속됨을 볼 수가 있다. Fig.7은 Hill-5, Hill-8에 대해 언덕후방에서의 속도벡터를 나타낸 것으로 언덕의 후방에서 유동박리가 발생하지 않았음을 알 수 있다.



(a) Flat plate



(b) Russian Hill-5



(c) Enlarged grid system around the Hill-5

Fig.3 Grid system for calculation of flow field about flat plate and Hill-5.

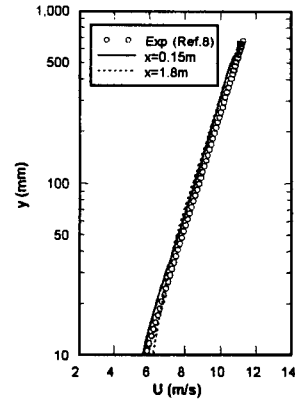
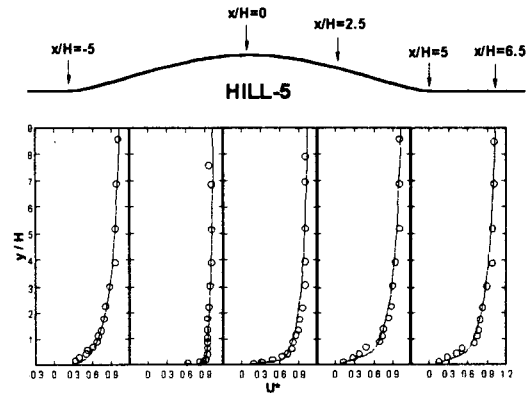
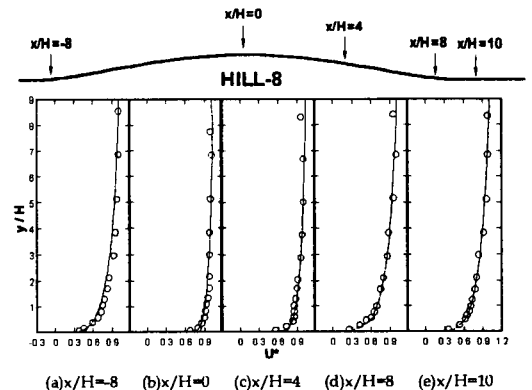


Fig.4 Mean velocity profile over the flat plate



(a)  $x/H = -5$  (b)  $x/H = 0$  (c)  $x/H = 2.5$  (d)  $x/H = 5$  (e)  $x/H = 6.5$   
 Fig.5 Comparison of measured and predicted mean velocity profile over the Hill-5.  
 (  $\circ \circ$  : Experiment [Ref.2], — : Present )



(a)  $x/H = -8$  (b)  $x/H = 0$  (c)  $x/H = 4$  (d)  $x/H = 8$  (e)  $x/H = 10$   
 Fig.6 Comparison of measured and predicted mean velocity profile over the Hill-8.  
 (  $\circ \circ$  : Experiment [Ref.2], — : Present )

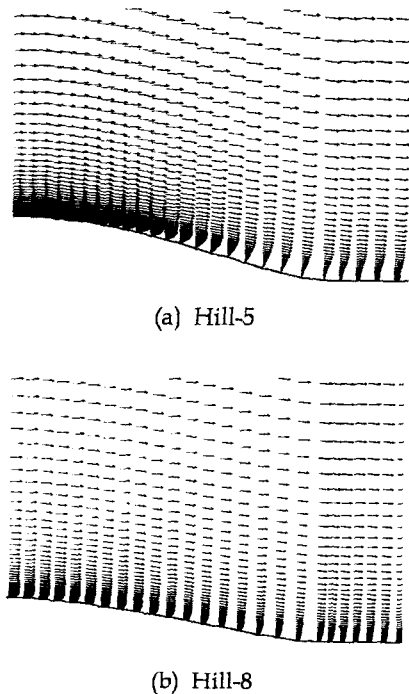


Fig.7 Velocity vectors at the leeward corner of each hill

### 3.2 대기오염확산 모델링

대기오염 확산모델은 가우시안 플룸모델과 퍼프모델을 사용하였다. 가우시안 플룸모델은 계산이 간단하고 결과가 잘 맞는다는 장점이 있지만 평탄지형에만 사용이 국한되는 단점이 있다. 따라서 우리나라와 같은 산지지형이나 복잡지형에는 적용이 곤란하다. 그에 비해 퍼프모델은 계산이 다소 복잡하고 유동장 정보를 필요로 하지만 정상상태뿐만 아니라 비정상상태 농도장 계산이 가능하며 유동의 속도가 아주 느린 유동장에서의 농도장 계산이 가능하다. 먼저 가우시안 플룸모델을 평지에서의 오염원 확산에 적용하였다. 그리고 평탄지형에서의 유동장을 계산한 후, 유동정보를 이용하여 평탄지형에서의 농도장을 계산하였다. Fig.8은 평탄지형에서 오염원을 기준으로 하류방향으로 이동하면서 지표면 농도를 나타낸 그림으로 자유유동속도  $U=4\text{m/s}$ 이며, 오염원 강도  $Q=3040\text{cm}^3\text{min}^{-1}$ 일 때이다. 가우시안 플룸모델을 사용하여 계산된 오염원 농도는 실험결과[9]와 아주 잘 일치함을 알 수 있고 퍼프모델을 이용하여 계산된 농도는 실험결과[9]나 가우시안 플룸모델에 비해 다소 차이는 있지

만 최대 농도값과 최대농도값의 발생 위치는 비교적 잘 예측함을 알 수 있다.

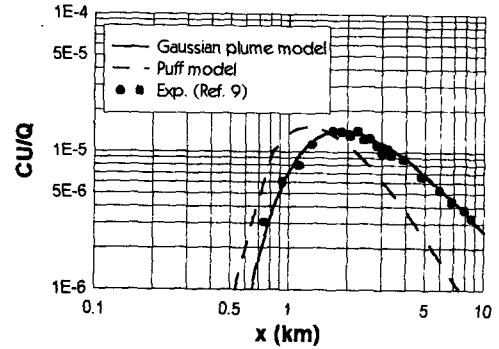
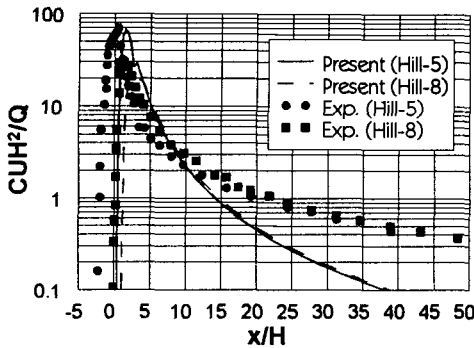
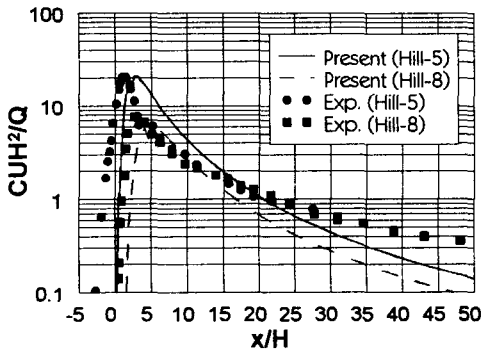


Fig.8 Computed concentration on the flat plate compared with experimental data

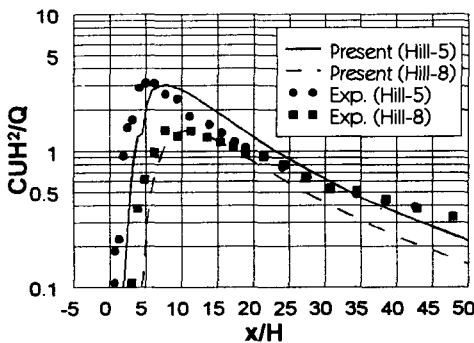
평지에서의 퍼프모델을 계산하여 퍼프모델의 검증 을 한 후, Russian Hill에서의 오염원의 농도장을 계산하였다. Fig.9에서 Hill-5와 Hill-8에 대해 오염원의 방출위치  $H_s$ 를 언덕높이  $H$ 의  $0.25H$ 와  $0.5H$ , 그리고  $1.0H$ 의 경우에 대해 퍼프모델을 적용하여 지표면 농도를 계산하고 실험결과[2]와 비교하였다.  $H_s=1.0H$ 인 Fig.9(c)에서는 Hill-5와 Hill-8 모두 농도예측이 비교적 잘 일치함을 알 수 있고, Fig.9(a)와 Fig.9(b)의  $H_s=0.5H$ 와  $0.25H$ 에서는 하류쪽에서의 농도를 실험값보다 낮게 예측하였는데 이것은 퍼프모델에서는 오염원에서 방출된 퍼프가 주위 유동에 의해 하류방향으로 이동되기 때문에 퍼프가 확산되면서 지면에 의해 절단되는 부분이 생기게 되고 이러한 절단부분은 농도 계산에서 제외되며 오염원의 방출위치가 낮을수록 퍼프가 하류방향으로 진행하면서 지면에 의해 절단되는 부분이 많아지기 때문이다. 그러나 환경오염예측에서는 최대농도의 발생위치와 그 위치에서의 농도세기가 특히 중요한데 본 연구의 결과는 최대농도치의 크기와 위치는 매우 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig.10은 Hill-5와 Hill-8의 대칭면에 대해 오염원의 방출위치가 언덕높이( $H$ )의  $0.25H$ ,  $0.5H$ ,  $1.0H$ 에서의 등농도선도를 나타낸 그림이며, Fig.11은 오염원의 방출위치가 각각  $0.25H$ ,  $0.5H$ ,  $1.0H$ 의 경우에 대해 지표면에서의 농도와 오염원의 방출 위치로부터 각각 언덕높이( $H$ )의  $1H$ ,  $5H$ ,  $10H$ ,  $20H$ ,  $30H$ 에 해당하는 하류에서의 단면에 대한 등농도선도를 나타낸 것이다.



(a)  $H_s=0.25H$



(b)  $H_s=0.5H$



(c)  $H_s=1.0H$

Fig.9 Normalized ground level concentrations of Hill-5 and Hill-8

대칭면에서의 농도분포를 통해 오염원의 방출위치가 낮을수록 오염원의 최대농도위치가 상류쪽에 위치함을 알 수 있으며, 각 단면에 대한 농도분포를 통해 Hill-5는  $H_s=0.25H$ 와  $H_s=0.5H$ 의 농도분포가 유사한 반면  $H_s=1.0H$ 에서는 다소 다른 경향을 보임을 알 수 있고, Hill-5보다 언덕경사가 완만한

Hill-8는  $H_s=0.5H$ 와  $H_s=1.0H$ 에서 유사한 농도분포를 보임을 알 수 있다. 본 연구에서는 유동이 정상상태이고 오염원의 확산이 비정상상태로 계산하였으나 비정상상태의 유동을 계산하고 매시간 비정상상태의 오염원 확산을 계산하는 것도 프로그램의 수정없이 가능하다.

### 5. 결 론

평지와 Russian hill에 대해 가우시안 플룸모델과 퍼프모델을 사용하여 점오염원에 의한 오염물의 확산모델링을 수행하였다. 가우시안 플룸모델을 평지에서의 지면농도 계산에 적용한 결과 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻었으며, 동일조건에 대해 퍼프모델을 적용하여 퍼프모델이 농도의 최대값과 최대발생위치를 비교적 잘 예측함을 알 수 있었다. 퍼프모델을 사용하기 위한 유동장은 Navier-Stokes방정식과 low Reynolds  $\kappa-\epsilon$  난류모델을 사용하여 계산하였다. 퍼프모델에 대한 타당성을 검증한 후 퍼프모델을 Russian hill의 오염물 확산모델링에 적용하여 실험결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 비정상상태 Navier-Stokes방정식에서 일정시간마다 유동장을 계산한 후 퍼프모델을 적용하면 우리나라와 같이 언덕이 많은 지형에 대한 오염원의 대기 확산을 시간의 진행에 따라 모델링할 수 있으며, 일정시간에 해당하는 농도분포를 예측할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구과제(총괄과제명:“복잡한 지형에서의 대기확산에 관한 연구”, 96-0601-03-01-2)의 제3세부과제(세부과제명:“복잡한 지형 주위의 유동해석 및 대기확산 평가를 위한 수치모델 개발”)로 수행되었으며 한국과학재단의 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

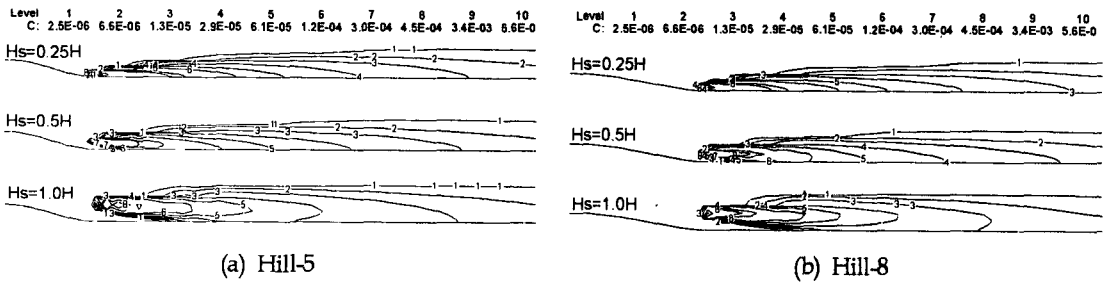


Fig.10 Concentration contours for each source elevation at the symmetric plane

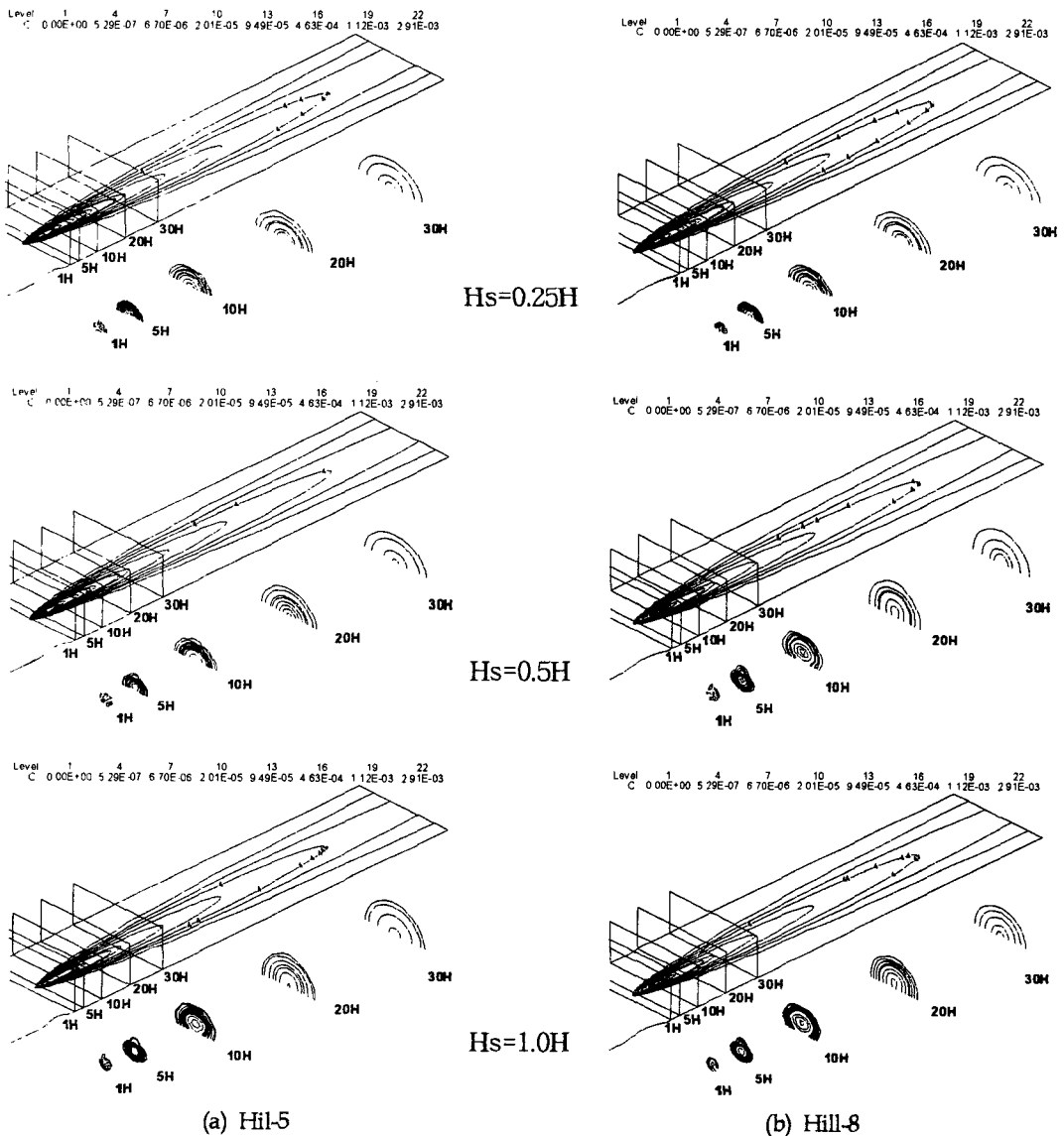


Fig.11 Concentration contours for each source elevation at the ground and several cross-sectional plane



- [1] Gong, W., "A Wind Tunnel Study of Turbulent Dispersion over Two- and Three-Dimensional Gentle Hills from Upwind Point Sources in Neutral Flow", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 54, pp.211-230, 1991
- [2] Arya, S. P. S., Capuano, M. E., Fagen, L. C., "Some Fluid Modeling Studies of Flow and Dispersion over Two-Dimensional Low Hills", *Atmospheric Environment*, Vol. 21, No. 4, pp.753-764, 1987
- [3] Castro, I. P. and Apsley, D. D., "Flow and Dispersion over Topography : A Comparison Between Numerical and Laboratory Data for Two-Dimensional Flows", *Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 6, pp.839-850, 1997
- [4] 김현구, 이정목, "산지 내 오염 물질 확산의 2차원 수치해석", *한국대기보전학회지*, 제13권, 제5호, pp.383-396, 1997
- [5] 박근, 박원규, 박옥현, "2차원 중형 언덕 주위의 유동 및 확산 거동에 관한 수치해석적 연구", *한국풍공학회 춘계학술발표회 논문집*, 1998
- [6] 정영래, 박원규, 하성도, "측풍영향을 고려한 고속전철 주위의 3차원 난류유동 해석", *한국전산유체공학회지*, 제1권, 제1호, pp.71-80, 1996
- [7] Zannetti, P., "Air Pollution Modeling : theories, computational methods, and available software," *Computational Mechanics Publications*, 1990
- [7] Robert, P. T. and Fryer-Taylor, R. E. J., "Wind Tunnel Studies of Roughness Effects in Gas Dispersion", *Atmospheric Environment*, Vol. 28, No. 11, pp.1861-1870, 1994
- [8] Raupach, M. R. and Legg, B. J., "Turbulent Dispersion from an Elevated Line Source: Measurement of Wind-Concentration Moments and Budgets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 136, pp.111-137, 1983
- [9] Lawson, Jr, R. E., Snyder, W. H, and Thompson, R. S., "Estimation of Maximum Surface Concentrations from Sources near Complex Terrain in Neutral Flow", *Atmospheric Environment*, Vol. 23, No. 2, pp.321-331, 1989
- [10] Zannetti, P., "An Improved Puff Algorithm for Plume Dispersion Simulation", *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 20, No. 10, pp.1203-1211, 1981
- [11] Verver, G. H. L. and De Leeuw, F. A. A. M., "An Operational Puff Dispersion Model," *Atmospheric Environment*, Vol. 26A, No. 17, pp 3179-3193, 1992