論文 9-1-21

固一氣相 有害物質 大氣확산에 관한 數値해석

A Numerical Study on the Toxic Gaseous and Solid Pollutant Dispersion in an Open Atmosphere

이 선 경* · 송 은 영** · 장 동 순***
Sun-Kyong Lee · Eun-Yong Song · Dong-Soon Jang

ABSTRACT

A series of numerical calculations are performed in order to investigate the dispersion mechanism of toxic gaseous and solid pollutants in extremely short-term and short range. The calculations are carried out in an open space characterized by turbulent boundary layer. The simulation is made by the use of numerical model, in which a control-volume based finite difference method is used together with the SIMPLEC algorithm for the resolution of the pressure-velocity coupling problem. The Reynolds stresses are solved by two-equation, k-ε model modified for buoyancy. The major parameters considered in this study are temperature, velocity and injection height of toxic gases, environmental conditions such as temperature and velocity of free stream air, and topographic factor. The results are presented and discussed in detail. The flow field is commonly characterized by the formation of a strong recirculation zone due to the upward motion of the hot toxic gas and ground shear stress. The driving force of the upward motion is explained by the effect of thermal buoyancy of hot gas and the difference of inlet velocity between toxic gas and free stream.

1. 서 론

大氣와 같은 난류경계층내에서 독성 또는 오염물질의 확산은 기상학적인 면에서나, 환경공학적인 차원 또는 工場지대등에서의 産業安全의 觀點에서 매우 重要한 연구사항이다. 이러한 난류경계층에서 스칼라물질의 확산에 대한 연구는 G. I. Taylor

* 충남대학교 환경공학과 대학원
** (주)CIES(Computer Integrated Engineering System)
*** 충남대학교 환경공학과

의 선도적인 연구이래[1] 理論的, 실험적 또는 수치해석적인 면에서 많은 연구가 시행되어 왔다. 최근에 박[2]은 이러한 난류에서의 오염물질 확산에 대한 연구의 일환으로 속도와 온도로 이루어지는 '3rd order' 상관항에 대한 수치 해석적 연구를 시도하였다. 그러나 확산 미캐니즘 규명과 그에 따른 現場응용을 위해서는 앞으로 지속적인 연구가 필요하다. 그 이유는 난류에서의 물질확산이 속도, 온도, 化學種의 농도 등의 시간 평균 및 변동값들의 함수로 나타내어지며, 따라서 이들 복잡한 난류변동 상관항에 대한 모델이 필요하기 때문이다. 그러므로 이러한 문제의 우회방법으로 보통 대기확산에 대한 예측에서는 Gaussian 모델이 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 Gaussian 모델은 사용목적에 따라서 'industrial complex', 'complex terrain', 'mobile source' 등 다양하게 細分化되어 널리 적용되고 있으나[3] Gaussian 모델의 'homogeneous turbulence'등 單純化 가정 때문에 사용상의 제약을 가지게 된다. 이러한 적용이 제약을 받는 쉬운 例중 하나가 地表面 근처에서 몇초의 짧은 시간동안의 오염물질의 局部 확산에 대한 경우이다[4]. 대기오염물질의 확산에 따른 적절한 환경관리를 위해서는 물론, Gaussian 모델에 의한 몇시간에서 몇달 以上의 장기간에 걸친 분산형태도 중요하다. 그러나 화생방이나 공장지대의 유독물질 확산등의 위급한 경우에는 몇초 동안에 몇백m 이내에서의 국부 유동 양상과 오염물질의 순간 최고농도 또한, 안전관리를 위해서 파악해야 할 중요한 사항으로 간주된다[5].

이와같은 局部유동 양상에 대한 미캐니즘을 밝히기 위한 연구의 일환으로 본 논문에서는 대기경계층의 일정영역을 계산영역으로 삼았으며 수치해석은 공학적 계산에서 가장 많이 사용되고 있는 熱적 부력項이 고려된 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하였다[6]. 보통 1km 以上으로 주어지는 대기경계층의 높이는 본 計算에서는 400m로 정하였는데 이는 계산영역의 크기와 격자수와의 關係 및 높이의 함수로 나타나는 속도구배등을 고려한 것이며 風下방향은 200m까지를 계산영역으로 설정하였다. 수치해석 방법은 Patankar[7]의 검사체적에 기초한 유한차분 방법을 도입하였다. 이미 언급하였듯이 본 논문의 주요 목적은 여러 중요 확산변수에 대해 영향력을 검사하며 이에 따른 오염물질의 확산 미캐니즘을 밝히고자 하는 것이다. 고려한 주요변수는 확산 독성물질의 온도, 주입속도, 주입위치 등이며 大氣微氣象 분야에서는 'free stream' 속도 및 대기안정성에 대한 온도분포를 고려하였다. 나아가서 하류방향의 지형지물 존재 및 크기등에 따른 영향을 파악하고자 했다. 지형지물의 위치는 하류방향에 폭 80~100m 사이에 높이 10m의 건물을 설정하였다. 본 연구는 일차적인 연구로서 아래와 같이 單純化했다. 즉 분산 독성물질은 반응하지 않는 것(passive contaminant)으로 간주했으며 입자궤적의 추적을 위해서는 중력, 공기저항력 등을 고려하고 氣相난류가 입자에 미치는 영향등은 제외하였다. 입자의 크기는 1~100 μm 사이에 8개의 크기 즉, 1 μ, 5 μ, 10 μ, 20 μ, 30 μ, 40 μ, 50 μ, 100 μm를 고려하였다. 수치해석 영역에 대한 2차원 도식도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와같이 왼쪽에서 오른쪽으로 일정 'free stream' 속도 u_o를 가진 바람이 불어 오며 이때의 공기 온도조건은 기상조건에 따라 지상과 지면에서의 적절한 온도 및 그에 따른 온도의 수직분포를 가정하였다. 기상 오염물질은 변수로써 독성 氣相 'vapor'의 온도, T_{vap}를 가지며 일정 높이 영역 즉, $Y_{vap,1}$~$Y_{vap,2}$ 사이에서 분출 확산됨을 가정하였다. 한편 반응하지 않는 입자 또는 액적은 일정한 몇군데의 높이에서 點源(point source)으로 일정하게 분출됨을 가정하여 高度에 따른 유동변화가 입자에 미치는 영향등을 추적하였다.

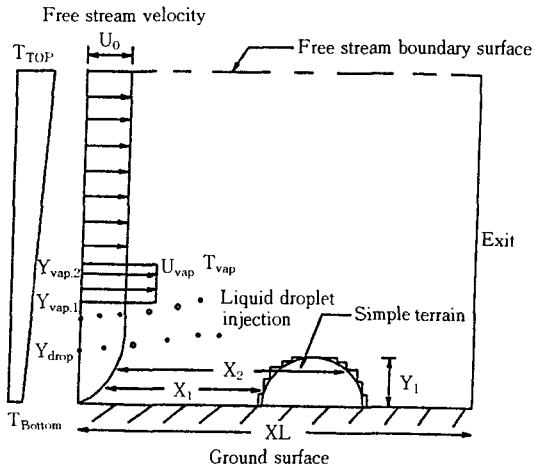


Fig. 1 Schematic diagram of liquid droplet and vapor dispersion

2. 수치해석 알고리즘 및 해법

2차원 x-y 좌표계에서의 난류유동 및 입자의 궤적을 계산하기 위해서는 氣相과 固相의 문제를 각각 풀어야 한다. 난류기상은 Eulerian 방법으로, 固相의 입자궤적에 대한 추적은 Lagrangian 방법을 각각 擇하였다. 기상에 대한 지배방정식은 定常상태를 가정할때에 일반 종속변수 Ø에 대해 아래식 (1)으로 주어진다.

특히 운동량 방정식에 있어서는 지구의 자전에 의한 전항력項은 고려되지 않았다. 이는 관심영역이 제한된 時空間上 범위에 있어 전향력의 영향이 크지 않다고 판단되었기 때문이다.

$$\nabla\cdot(\rho\vec{u}\emptyset) = \nabla\cdot(\Gamma_\emptyset\nabla\emptyset)+S_\emptyset \quad \cdots\cdots (1)$$

윗 식에서 첫째항은 유동에 관련된 항이고, 둘째는 확산, 마지막 항은 생성 또는 소멸항을 각각 의미한다. Ø는, x, y-방향의 속도성분 u, ν와 압력 p 그리고 단위질량당의 난류에너지 k와 그의 소산율 ϵ를 나타낸다. 그리고 유독가스의 확산을 定量化하기 위해 'conserved scalar'인 유독가스의 질량분율 f를 계산영역의 임의지점에서 아래와 같이 정의하였다.

$$f = \frac{\text{오염가스의 질량}}{\text{오염가스+공기의 질량}} \quad \cdots\cdots (2)$$

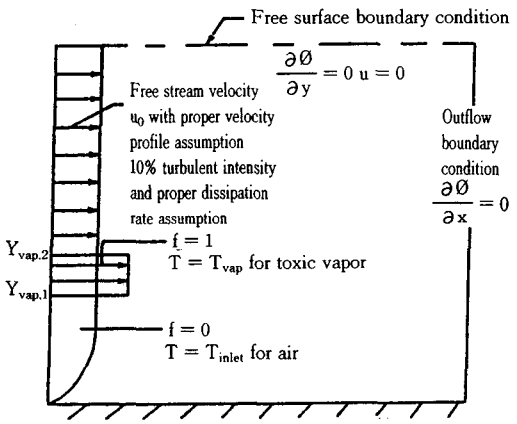
구체적으로 설명하면 유독가스가 분출되는 입구에서 오직 유독가스만 존재한다면 그 지점에서의 f = 1이며, 기타 'free stream'으로 나타내어지는 입구지역에서의 f = 0이다. 식 (1)에서 $\Gamma_\emptyset$, $S_\emptyset$는 각 종속변수에 해당되는 확산계수와 생성항을 나타낸다. 본 논문에서는 난류모델을 위해서 two-equation, k-ϵ 모델을 사용하였다. 이때의 난류점성계수 μ_t는 Prandtl-Kolmogorov 가정에 의해 아래식 (3)으로 주어지며 C_μ는 난류모델의 상수이다.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho\, k^2}{\epsilon} \quad \cdots\cdots (3)$$

지배방정식에 관련된 제반사항을 Table 1에 정리하였다. 여기서 注目할 것은 수직속도 ν의 生成項에서 첫째 項 $\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y}\right)$는 수평속도의 수직구배를 나타내는 항으로서 유체역학적에 부력이나 침강에 영향을 주는 항이고 마지막 항 $\frac{-\rho g(T_o-T)}{T}$는 熱的 부력을 나타낸다. 앞에서 T_o는 大氣의 산술평균 온도를 나타낸다. 본 연구에서 T_o는 vapor 주변 대기온도의 평균값을 취하였다. 기타 자세한 사항은 다른 문헌에 제시될 예정이다[8]. 식 (1)에 주어진 2차 편미분방정식의 해는 검사체적에 기초한 유한차분방법을 통하여 아래와 같이 이산화(discretization)하였다[7].

$$a_P\emptyset_P = a_E\emptyset_E + a_W\emptyset_W + a_N\emptyset_N + a_N\emptyset_N + a_S\emptyset_S + b \quad \cdots\cdots (4)$$

윗 식에서 P는 현재 고려하고 있는 主 格子點을 나타내며 E, W, S, W는 각각 동, 서, 남, 북에 위치한 주변 격자점이고, 주변계수 a_E, a_W, a_S, a_N의 物理的 意味는 주 격자점 P에 영향을 주는 동, 서, 남, 북방향에서의 流動 및 擴散强度를 각각 나타낸다. 식 (4)는 line-by-line Tri-Diagonal Matrix Algorithm(TDMA)에 의해 풀었으며 이에 필요한 경계조건을 Fig. 2에 나타내었다.



Ø = u, No slip boundary condition with proper wall function treatment for ground shear stress

Ø = ν, ν = 0 for impermeable condition

$\emptyset = k, \frac{\partial k}{\partial y} = 0$

Ø = ϵ, ϵ = ϵ_p at the adjacent internal grid point

Ø = T, T = T_{ground} with effective heat transfer coefficient

Ø = f, f = f_{ground} = 0 with effective mass transfer coefficient

Fig. 2 Boundary conditions for various dependent variable Ø

固相 방정식

공기중의 분진이나 액적의 운동속도나 궤적을 계산하기 위해서 통상 쓰이는 방법은 Lagrangian방법이다. 이때 입자에 작용하는 힘은 보통 입자의

밀도가 이동공기등에 비해 약 1000배 정도로 크므로 부력, 'Basset'힘, 'virtual mass'힘 등은 무시되고 공기역학적인 힘과 중력만이 보통 고려된다[9]. 이 두힘을 고려하였을 때에 입자에 미치는 힘은 아래와 같이 표시된다.

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = C_D A_p \frac{1}{2} \left|\vec{V}_g - \vec{V}_p\right| (\vec{V}_g - \vec{V}_p) - \rho_p \vec{g} \quad \cdots\cdots (5)$$

윗 식에서 하첨자 p는 입자, g는 기체를 각각 나타낸다. 그러므로 m_p, A_p는 입자의 질량과 투영단면적을 나타내며 ρ_p와 $\vec{g}$는 입자의 밀도와 중력가속도를 나타낸다. 본 연구에서는 식 (5)의 x-, y-방향의 속도와 그 궤적을 Euler 방법을 이용하여 계산하였다[8]. 식 (5)를 x-, y-방향의 속도성분, u-, v- 속도항으로 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{dU_p}{dt} = \alpha (U_g - U_p) \quad \cdots\cdots (6)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \alpha (V_g - V_p) \quad \cdots\cdots (7)$$

윗 식에서 α는 기체와 입자의 상대속도를 포함하는 항으로서 아래 식으로 주어진다.

$$\alpha = \frac{18\mu C_D}{\rho_p d_p^2} \frac{Re}{24} \quad \cdots\cdots (8)$$

식 (8)에서 μ와 d_p는 각각 역학점성계수와 입자의 직경을 나타내며 Re는 입자의 직경과 상대속도로 表現되는 Reynolds 수이다. 식 (6)과 (7)을 난류에서 시간평균을 취하면 난류변동의 상관항이 아래와 같이 나타난다.

$$\frac{dU_p}{dt} = \overline{\alpha}(\overline{U_g} - \overline{U_p}) + \overline{\alpha'(U_g' - U_p')} \quad \cdots\cdots (9)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \overline{\alpha}(\overline{V_g} - \overline{V_p}) + \overline{\alpha'(V_g' - V_p')} \quad \cdots\cdots (10)$$

식 (9), (10)에 나타난 난류변동상관항 즉 $\overline{\alpha'(U_g' - U_p')}$ 모델은 난류에서의 비선형항에 의해 생기는 난류모델에 대표적인 문제 중의 하나로서 이와 類似한 난류모델의 例는 Reynolds 전단력이나 난류에서의 반응항등을 들 수 있다. 입자궤적 계산에 나타나는 난류상관항은 본 논문에서는 생략하였으며 이에 대한 모델검토는 다른 문헌에 잘 나타나 있고 여기서는 언급하지 않는다[9].

3. 수치해석 결과 및 토론

본 연구에서는 각 변수 변화에 따른 상대적인 변화와 영향력을 조사하기 위하여 일정한 표준조건을 설정한 후 변수를 하나씩 변화시켜가며 유동변화를 검토하였다. 본 연구에서 고려한 표준조건은 'free stream'의 속도 2m/s이고 독성분산물질의 초기속도가 5m/s, 온도가 100℃인 경우로 정하였으며 상층부 꼭대기 온도, T_{top} = 20℃, 지상표면에서의 온도, T_{bottom} = 30℃로서 기상학적으로 불안정한(unstable) 상태를 가정하였다. Fig. 3은 이러한 표준상태에 대한 계산 결과 즉 벡타유동, 독성증기의 분포 및 입자의 궤적을 나타냈는데, Fig. 3(a) 벡타유동에서는 유동의 상승하는 양상이 가시적으로 잘 나타나고 있다. 그리고 風下 30~100m 사이에서 재순환 영역이 강하게 형성됨을 알 수 있다. 한편 100m 지점의 上空에서는 위로 비상하였던 유체가 하강하고 있음을 보여주는데 이는 더워진 독성기체의 냉각에 의한 하강현상으로 풀이된다. 이러한 標準상태에서 유동이 上空으로 向하는 현상은 支配方程式에서 y-방향의 속도 v에 대한 生成項(Table 1 참조)에 나타낸 바와 같이 $\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ 항이 독성기체가 분출되는 상한 경계점 즉, $y = Y_{vap,1}$에서 陽의 값을 가지는 것과 온도에 의한 부력항 $\frac{\rho g(T_0 - T)}{T} > 0$가 되는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 항 $\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ 가 陽의 값을 가지는 것은 입구에서, 독성기상물질의 속도가 'free stream'의 속도에 비해 큰 것에 기인한다. 要約하면 오염물질의 上昇은 熱的부력과 독성물질의 초기 주입속도가 주위공기의 속도보다 큰 것에 그 理由가 있다. 한편 재순환 영역의 형성에 대한 說明으로는, 지상근처에서 전단력 효과를 일차적으로 고려할 수 있고, 온도가 높은 독성물질이 위로 상승하는 운동에 따른 흡수유동 즉, 'entrainment' 현상도 실질적으로 기여한 것으로 판단된다.

Fig. 3(b)는 위의 표준조건에 해당하는 경우의 입자궤적을 도시한 것으로서 사용한 입자의 크기는 앞에서 이미 언급한 바와같이 1μ, 5μ, 10μ, 20μ, 30μ, 40μ, 50μ, 100μm의 8가지 크기이다. Fig. 3(b)에 나타나듯이 입자의 크기가 1, 5, 10μ의 경우는 거의 공기와 유사한 行動을 하며 공기

Table 1 Turbulent diffusion and source term expressions for Ø

Variable	Name	Γ_ϕ	S_ϕ
u	horizontal velocity	μ_t	$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_t\frac{\partial \nu}{\partial x}\right)-\frac{\partial p}{\partial x}$
v	vertical velocity	μ_t	$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_t\frac{\partial \nu}{\partial y}\right)-\frac{\partial p}{\partial y}\frac{\rho g(T_o-T)}{T}$
k	turbulent kinetic energy	$\frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$P_k+G_k-\rho\,\epsilon$
ϵ	disspation rate of k	$\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_1(P_k+C_3G_k)\frac{\epsilon}{k}-C_2\frac{\epsilon^2}{k}$
T	temperature	$\frac{\mu_t}{\sigma_T}$	–
f	mixture fraction	$\frac{\mu_t}{\sigma_f}$	–

$$P_k=\mu\left[2\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+2\left(\frac{\partial \nu}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial \nu}{\partial x}\right)^2\right]$$

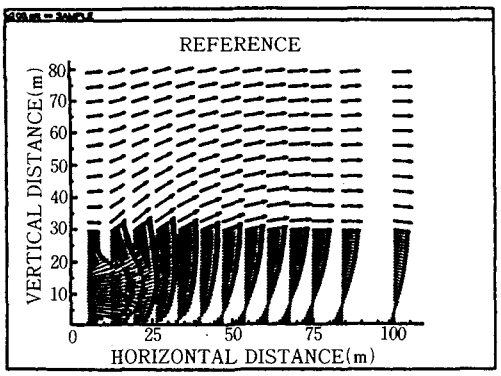
$$G_k=-\frac{\mu_t}{\sigma_T}\,g\beta\,\frac{\partial T}{\partial y}$$

Constants of turbulence model

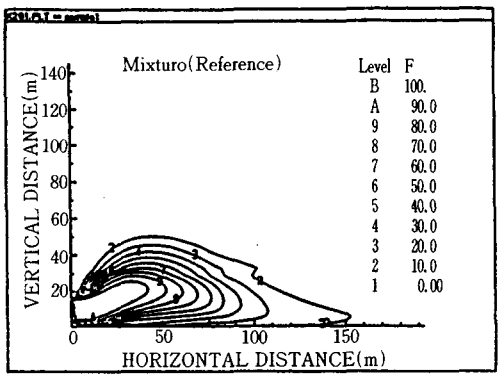
$C_1 = 1.44$
$C_2 = 1.92$
$C_3 = 0.8$
$C_\mu = 0.09$
$\sigma_k = 0.9$
$\sigma_\epsilon = 1.22$
$\sigma_T = 0.9$

流線을 따라가는 양상을 보이나 입자의 크기가 커질수록 중력의 효과가 두드러져서 지상으로 강하하는 양상이 뚜렷했다. 한편 입자의 초기 확산 위치에 따라 분산하는 양상은 초기 고도에 따른 영향 이상의 큰 변화가 표준유동에서는 나타나지 않았다. Fig. 3(c)는 독성가스의 농도에 해당하는 질량분율을 나타내는 것으로서 질량분율이 10% 이상 해당되는 지역은 초기 확산 위치로부터 높이 40~50m에 하류방향의 길이 150m까지로 나타났다. Fig. 4는 독성물질의 온도에 따른 영향을 나타내는 것으로서 T_{vap}의 온도가 50℃, 100℃, 200℃일 때의 유동을 (a), (b), (c)에 각각 나타냈다. 그림에 보인 바와같이 온도가 높아짐에 따라 재순환 강도 및 위로 상승하는 양상이 일관성 있게 나타남을 알 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4의 경우에 대한 입자의 궤적이다. 특이한 것은 Fig. 4의 (a)의 경우에 지상 1.5m에서 분사된 고형입자가 전혀 부력의 영향을 받지 않고 지표면 근처에서 평행하게 비산된 점이다. 한편 본 논문에서는 제시하지 않았지만은 기상조건을 표준상태의 불안정에서 안정 또는 중립조건으로 주위 온도를 변화시켜가며 조사하였는데 이러한 변화가 유동에 가시적인 영향을 나타내고 있지 않음을 알 수 있었다. 이것에 대한 설명은 초기 유동의 속도(즉, 독성물질 및 공기의 속도)가 크고 독성물질의 온도 또한 높기 때문에 기상의 작은 온도변화가 유동에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다.

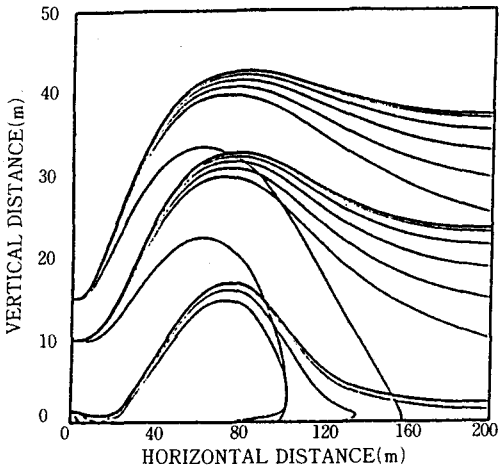
Fig. 6(a)는 독성증기의 속도가 free stream의 속도 2m에 맞춘 경우이고 Fig. 6의 (b)는 free stream의 속도를 독성물질의 초기 확산속도인 5m/s로 같게 하였을 때이다. 이 두 경우 모두 독성증기와 주위공기의 속도 差異가 작아진 경우로서 유체 역학적인 상승요인은 많이 줄어들고 열적 부력 효과만이 존재하는 경우이다. (a)의 경우에는 상승과 재순환이 나타나나 (b)의 경우에는 재순환 영역이나 위로 상승하는 양상이 거의 나타나고 있



(a)

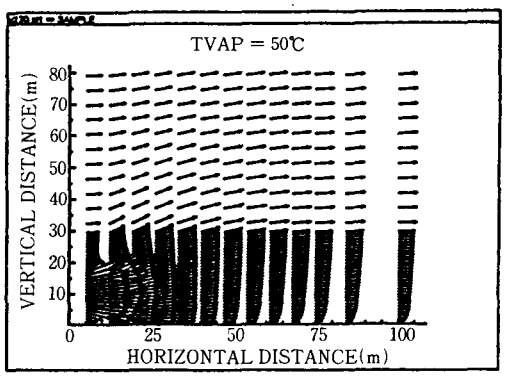


(b)

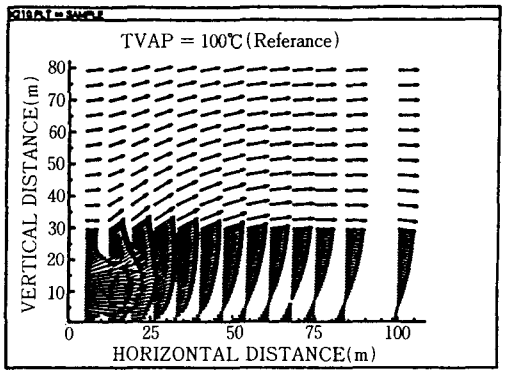


(c)

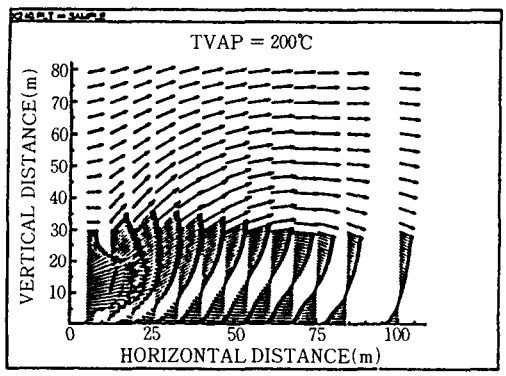
Fig. 3 Calculated result for the standard case
(a) velocity vector field
(b) mixture fraction distribution of toxic vapor
(c) particle trajectory plot



(a)

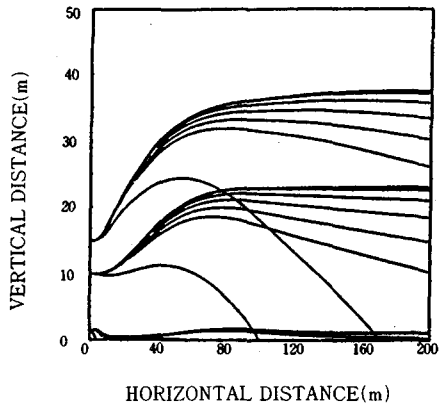


(b)

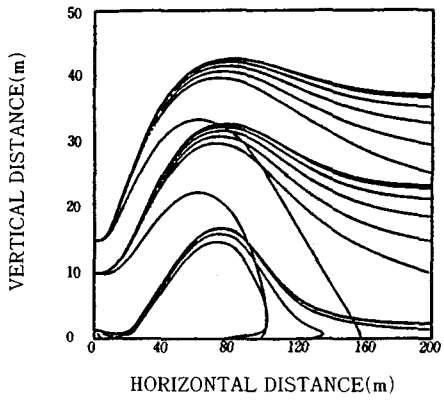


(c)

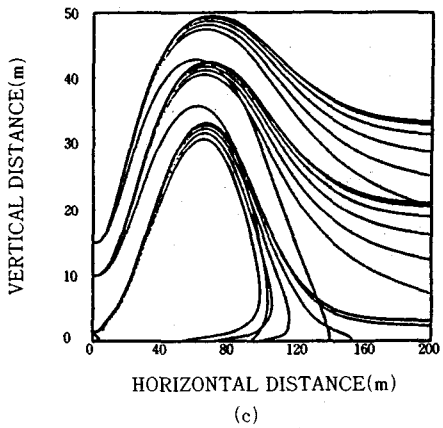
Fig. 4 Velocity vector field as a function of toxic gas temperature.
(a) T_{vap} = 50℃ (b) T_{vap} = 100℃
(c) T_{vap} = 200℃



(a)

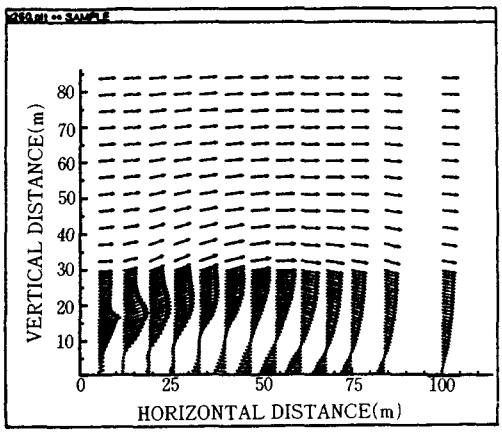


(b)

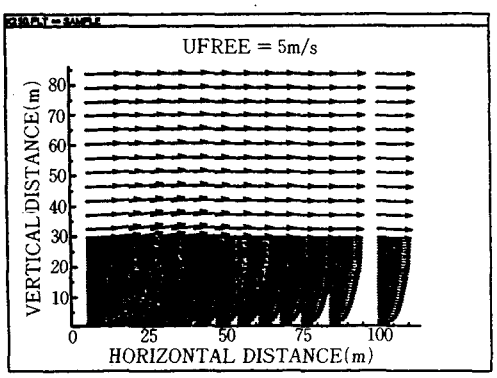


(c)

Fig. 5 Particle trajectories calculation as a function of toxic gas temperature
(a) T_{vap} = 50℃ (b) T_{vap} = 100℃
(c) T_{vap} = 200℃

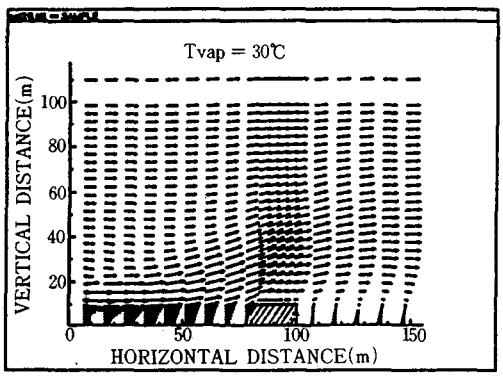


(a)

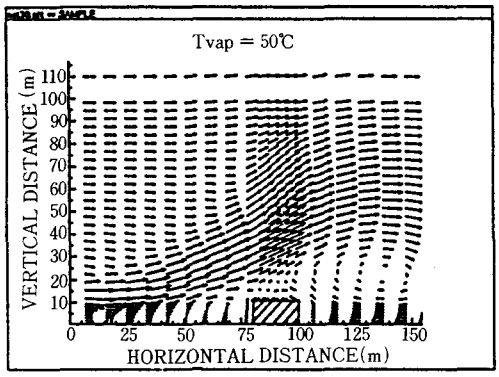


(b)

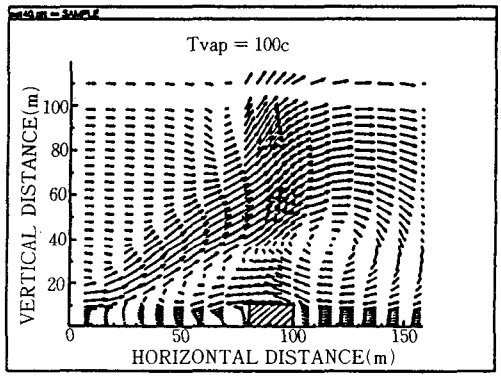
Fig. 6 Velocity vector field when
(a)U_{vap} = U_{free} (b) U_{free}= 5m/s



(a) 30℃



(b) 50℃



(c) 100℃

Fig. 7 Velocity vector field of a simple terrain as a function of temperature

지 않은 점이 注目된다. 이 두 경우에 대한 차이는 유동과 부력의 상대적인 강도차이로서 풀이된다. 특히 (b)의 경우는 유동이 强化된 데에 따른 열적 부력의 상대적인 强化현상으로 상승과 재순환이 나타나지 않는 것으로 판단된다. Fig. 7은 지형지물 존재에 따른 유동 양상을 독성기체의 온도 T_{vap} = 30, 50, 100℃에 대해 나타내는 것으로서 보통 교과서등에 나타나는 후류영역이 잘 표시되어 있으나 지형지물 윗부분의 유선이 밀집되어 있는 것은 본 연구에서 사용한 표준 k-ϵ 모델의 특성에 기인한 것으로 판단된다[10),11)].

4. 결 론

검사체적에 기초한 유한차분방법을 통하여 높이 400m, 길이 200m에 해당하는 난류경계 영역에서 독성기상/고상입자의 분산형태를 수치해석하였다. 수치해석의 변수는 기상독성 분산물질의 온도 및 속도, 기상조건(온도, free stream velocity) 및 지형지물 존재에 따른 영향 등이었다. 수치해석의 결과는 물리적 의미에 잘 맞게 나타났으며, 특히 독성기체의 상승유동은 부력 및 유체역학적인 속도구배에 의해 이루어졌으며 이러한 상승유동과 지면에 의한 전단력은 강력한 재순환 영역을 형성함을 알 수 있었다. 본 결과를 토대로 할때에 이러한 수치해석적인 방법이 국부지역에서 짧은 시간내의 독성 오염물질의 분산양상 및 농도분포를 예측할 수 있는 유용한 도구로서의 가능성을 보였다고 판단된다.

참 고 문 헌

1) Taylor, G. I, Diffusion by continuous movements, Proc. London. Math. Soc., Vol. 20, pp. 196~212, 1920.
2) Park, Hwa Choon, Numerical Analysis of Scalar Dispersion in a Turbulent Boundary Layer, Ph. D., Dept. of Mechanical Engr. KAIST, 1992.
3) EPA, Guidline on Air Quality Models(revised), U. S Environmental Protection Agency, EPA-450/2-78-027R, 1986.
4) Seinfeld, J. H., Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, A Wiley Interscience publication, Tohn Wiley & Sons, New York 1986.
5) 경남호, 에너지 기술연구소 선임연구원, private communication.
6) Henkes, R. A. W. M. (edited), Benchmark Computation and Experiment for Turbulent Natural Convection in a Square Cavity, Joint Workshop of Eurotherm & Ercoftac, Delft, The Nethelands, Mar. 25~27, 1992.
7) Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemishere Publishing Corp, 1980.
8) 이선경, 에너지/환경에 관련된 열/유체 시스템 고도수치해석 연구 : 독성물질의 대기확산, 湖沼의 전도현상, 석탄기류층 가스화 장치 충남대학교 환경공학과 석사학위논문(1995년 2월 예정)

9) Jang, Dong Soon, Single-and Two-phase Reacting Flow Predictions-Modeling of Nonequilibrium effects, Turbulent Particle Dispersion and Nitrogen Oxide Formulation in Pulverized Coal Combustion, Ph. D. Dissertation, Dept of Mechanical Engr. Louisiana State Univ. Baton Rouge, LA, 1987.
10) Park, Sang Woo, Development of curvature dependent two-equation model for prediction of two-dimensional turbulent recirculating flows, Ph. D. Thesis, Dept of Mechanical Engr., KAIST, 1986.
11) Patel, B. R., Recent Development in CFD at Fluent Inc., seminar held at U. S. Embassy Trade Center, Seoul, Korea, September 2~3, 1993.