

固-氣相 毒性오염물질 短期 대기확산에 관한 數値解析의 研究 :
化學種, 온도, 상대속도

A Numerical Study on the Short-term Dispersion of Toxic Gaseous
and Solid Pollutant in an Open Atmosphere :
Chemical Species, Temperature, Relative Velocity

나혜령*·이은주*·장동순*·서영태**
H. R. Na·E. J. Lee·D. S. Jang·Y. T. Seo

ABSTRACT

A series of parametric calculations have been performed in order to investigate the short-term and short-range plume and puff behavior of toxic gaseous and solid pollutant dispersion in an open atmosphere. The simulation is made by the use of the computer program developed by this laboratory, in which a control-volume based finite-difference method is used together with the SIMPLEC algorithm for the resolution of the pressure-velocity coupling appeared in Navier-Stokes equation. The Reynolds stresses are solved by the standard two-equation $k-\epsilon$ model modified for buoyancy together with the RNG(Renormalization Group) $k-\epsilon$ model.

The major parameters considered in this calculation are pollutant gas density and temperature, the relative velocity of pollutants to that of the surrounding atmospheric air, and particulate size and density together with the height released. The flow field is typically characterized by the formation of a strong recirculation region for the case of the low density gases such as CH_4 and air due to the strong buoyancy, while the flow is simply declining pattern toward the downstream ground for the case of heavy molecule like the CH_2Cl_2 and CCl_4 , even for the high temperature, 200°C . The effect of gas temperature and velocity on the flow field together with the particle trajectory are presented and discussed in detail. In general, the results are physically acceptable and consistent.

* 충남대학교 환경공학과 전산열유체실험실

** 해군사관학교 교수부 기계공학과

1. 서론

난류 경계층내에서의 固-液相 그리고 氣相 오염 물질의 확산은 지표면에 의한 기계적인 마찰과 열적 부력에 의해 야기되는 복잡한 난류현상으로 이러한 확산 현상에 대한 기구 규명과 定量化는 대기 오염물질 확산에 따른 환경영향평가, 化生放戰, 工場지대의 산업 안전 문제등 다양한 관점에서 매우 중요한 사안이다.

지표면에 영향을 받는 이러한 난류 경계층 즉, 대류층에서의 오염 물질 확산에 대한 예측은 장기간의 확산일 경우에는 보통 Gaussian 형태의 모델이 유용한 도구로써 사용되어 왔다. 이러한 Gaussian 모델은 그 사용 빈도와 모델의 다양성¹⁾(즉, industrial complex, reactive pollutant, mobil source, complex terrain 등)에도 불구하고 'homogeneous turbulence', 일정한 풍하방향의 속도, 粒度 20 μm 이하 등 여러 制約을 가진다. 이것은 'Fickian diffusion' 식으로 주어지는 확산식이 Gaussian 형태의 解로 유도되는 과정에서 이루어지는 불가피한 가정에 기인한다.

이러한 가정에 근거한 Gaussian 모델은 사용의 便利함과 그 실용성에도 不拘하고 단거리 짧은 시간, 좁은 영역에서의 확산에 대한 작용에는 제약을 가지며 이에 따라 理論的 방법이나 수치해석적 方法이 상호보완의 방법으로 필수 불가결하게 요구된다. 이러한 背景下에서 이미 발표된 논문²⁾에서 Fig. 1에 나타낸 높이 400m \times 풍하거리 200m의 대류 경계 영역에 대한 수치 해석을 수행하여 그 일차적인 결과를 제시하였다. 사용된 수치 해석 알고리즘은 그림에 나타난 2차원 난류 경계층 영역에서의 固-氣相 오염물질 확산에 따른 유동 문제의 解를 구하기 위한 것이다. 사용한 수치해석 알고리즘은 검사 체적에 기초한 유한차분방법을 擇하였으며 운동량 방정식에 나타나는 압력과 속도의 연계 문제는 Patankar의 SIMPLE 알고리즘³⁾ 또는 SIMPLE의 한 변형인 SIMPLC 알고리즘⁴⁾을 이용하였다. 난류 모델은 熱的 부력이 고려된 補正 k- ϵ 모델⁵⁾과 본 논문에서는 그 결과를 직접적으로 제시하지 않았지만 최근에 널리 사용되고 있는 RNG k- ϵ 모델⁶⁾을 비교를 위해 사용하였다⁷⁾.

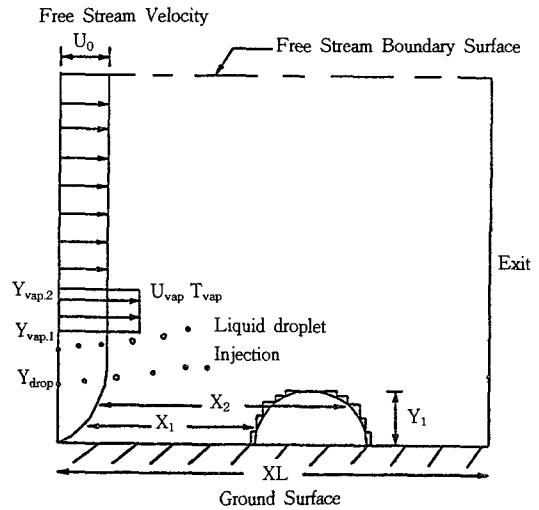


Fig. 1 Schematic diagram of computational domain

본 연구에서 提示하는 결과와의 연결을 위해 앞에서 이미 발표한 논문²⁾에서 사용한 제반변수에 대한 조건을 표준 조건으로 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Hypothetical standard condition employed in this calculation

Free stream	Velocity	2m/s
	Temperature profile	400m height : 20°C Surface : 30°C
Toxic gas pollutant	Inlet velocity	5m/s
	Inlet temperature	100°C
Particulate	Particle density	1000kg/m ³
	Particle diameters	1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μm

지난번 논문²⁾에서 사용한 主要 數值 解析 變數는 기상 조건에서는 free-stream velocity와 대기의 안정, 불안정, 중립 상태에 따른 高度에 따른 수직 온도 분포이며 한편 확산물질에 관계되는 변수는 오염물질의 주입 속도, 온도 등을 고려하였고 固相 粒子의 變數로는 粒子의 크기 및 주입 위치 등을 고려하였다. 사용한 변수는 Table 2에 要約해서 나타내었다.

본 연구에서는 이등²⁾의 결과에 대한 계속적인 연구로서 기상오염물질의 밀도를 空氣, NH₃, CH₂Cl₂, CCl₄ 4종류로 설정하여 온도 및 상대풍

Table 2 Calculation parameters employed

Meteorological condition	Free stream velocity(2m/s, 5m/s) Atmospheric stability : stable, neutral, unstable
Toxic gas pollutant	Injection velocity : 2m/s, 5m/s Injection temperature : 50°C, 100°C, 200°C
Particulate	Particle diameters (1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μm) Particle density : 1000kg/m ³ Initial points : 1.5m, 10m, 15m

속도에 대한 변수를 수행하였다. 한편 분산입자의 밀도는 비중이 0.5, 1.0, 2.0의 경우로 가정하였으며 分散高度는 이등²⁾의 연구와 같은 위치를 설정하였다. 분산입자의 비중을 0.5, 1.0, 2.0으로 선택한 이유는 이러한 값들이 문헌에 많이 나타나는 값들이기 때문이다. 한편 plume과 puff의 경우를 모두 고려하여 수치해석을 시도하였으나 puff의 경우는 조직적인 연구보다는 프로그램 개발에 따른 一次的인 응용에 관점을 두었다. 기타 프로그램 개발 과정에서 필요한 수치해석 알고리즘, 난류모델, 분진확산 모델 등 본 내용을 보충하는 자세한 것은 다른 문헌⁷⁾에 제시될 예정이다.

2. 수학적 모델 및 해법

2차원 x-y 좌표계에서의 난류유동 및 입자의 궤적을 계산하기 위해서는 氣相과 固相의 문제를 각각 풀어야 한다. 난류 氣相은 Eulerian 방법을, 固相의 입자궤적에 대한 추적은 Lagrangian 방법을 각각 擇하였다. 기상에 대한 지배방정식은 定常상태를 가정할 때에 일반속도변수 ϕ 에 대해 아래식(1)으로 주어진다.

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_{\phi} \nabla \phi) + S_{\phi} \dots \dots \dots (1)$$

식(1)에서 Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 각 종속변수에 해당되는 확산계수와 생성항을 나타낸다. 본 논문에서는 난류모델을 위해서 two-equation, k-ε 모델을 주로 사용하였다. 지배방정식에 관련된 제반사항을 Table 3에 정리하였다. 수직속도 v의 生成項에서 마지막 항($\rho_0 - \rho$)g는 부력을 나타내며 ρ_0 는 大氣의 산술평균 온도, T_0 에서의 밀도를 나타낸다. 본 연구에서 T_0 는 vapor와 주변대기 온도의 평균 값을 취하였다. 이에 대한 유도 과정을 나타내면 다음과 같다.

만일 ρ , T는 부력을 가지고 있는 기체의 밀도

Table 3 Turbulent diffusion and source term expressions for ϕ

Variable	Name	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
u	horizontal velocity	μ	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$
v	vertical velocity	μ	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - (\rho - \rho_0)g$
k	turbulent kinetic energy	$\frac{\mu}{\sigma_k}$	$P_k + G_k - \rho \epsilon$
ε	dissipation rate of k	$\frac{\mu}{\sigma_{\epsilon}}$	$C_1(P_k + C_3 G_k) \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}$
T	temperature	$\frac{\mu}{\sigma_T}$	-
f	mixture fraction	$\frac{\mu}{\sigma_f}$	-

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

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

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

와 온도이고 ρ_0 와 T_0 는 주위 공기의 밀도와 온도라고 하자. 이때 作用하는 外力은 중력에 의한 body force와 주위 압력에 의한 surface force이다.

$$\Sigma F_{ext} = ma = (\rho dV)a \dots \dots \dots (2)$$

그러므로

$$\rho dVa = pdA - (p + dp)dA - \rho g dV = -dp dA - \rho g dV$$

$$\rho a = \frac{-dp dA}{dV} - \rho g$$

$$a = \frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} - g \dots \dots \dots (3)$$

윗 식에서 높이 (z)에 따른 압력 변화는 공기 정역학적 압력 분포가 경계층으로 가정되는 기체 덩어리 내부에 적용된다고 가정하면,

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_0 g \dots \dots \dots (4)$$

그러므로 식(4)을 식(3)에 대입하면,

$$a = - \frac{1}{\rho} (-\rho_0 g) - g = \frac{\rho_0 g}{\rho} - g = \frac{\rho_0 g - \rho g}{\rho} = \frac{(\rho_0 - \rho)g}{\rho}$$

$$\therefore a = \frac{(\rho_0 - \rho)g}{\rho_0} \dots\dots\dots (5)$$

식(5)에 의하면 기체 덩어리 밀도 ρ 이 주위 밀도 ρ_0 보다 작아지게 되면 上昇하는 힘을 받으며 밀도 ρ 이 주위 밀도 ρ_0 보다 크면 하강하는 음의 힘을 받는다. 이러한 밀도의 변화는 분자량에 따른 변화이든 온도의 변화에 따른 변화이든 관계없이 적용할 수 있다. 만일 기체의 종류가 같은 종류로 일정하다면 식(6)에서

$$p = \rho RT \dots\dots\dots (6)$$

p 와 R 이 일정하므로,

$$\rho T = \text{const. 즉, } \rho T = \rho_0 T_0 \dots\dots\dots (7)$$

식(7)를 식(5)에 대입하면 식(5)을 온도에 관한 식으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$a = \frac{(T - T_0)g}{T_0} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 強調할 사항은 식(7)을 造成이 다른 혼합 기체의 부력을 나타내는 힘으로 쓸 수 없다는 것이다. 이것은 식(6)을 다시 아래와 같이 일반적인 체상수를 이용하여 쓰면 식(9)가 된다.

$$p = \rho \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T \dots\dots\dots (9)$$

이때 압력 p 가 거의 일정하다 하더라도 평균 분자량 \bar{M} 은 위치에 따른 조성 차이에 의해 틀러지기 때문에 조성이 다를 경우에는 식(8)과 같이 간단한 온도식이 나타나지 않으므로 식(5)의 표현식을 사용한다.

식(1)에 주어진 2차 편미분방정식의 해는 검사 체적에 기초한 유한차분방법을 통하여 아래와 같이 이산화(discretization)하였다³⁾.

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \dots\dots (10)$$

윗 식에서 P 는 현재 고려하고 있는 主 格子點을 나타내며 E, W, S, N 는 각각 동, 서, 남, 북에 위치한 주변격자점이고, 주변계수 a_E, a_W, a_S, a_N 의 物理的 意味는 주 격자점 P 에 영향을 주는 동, 서, 남, 북방향에서의 流動 및 擴散強度를 각각 나타낸다. 식(10)은 Tri-Diagonal Matrix Algorithm (TDMA)에 의해 풀였으며 이에 필요한 경계조건을 Fig. 2에 나타내었다.

固相방정식

공기중의 분진이나 액적의 운동속도나 궤적을 계산하기 위해서 통상 쓰이는 방법은 Lagrangian

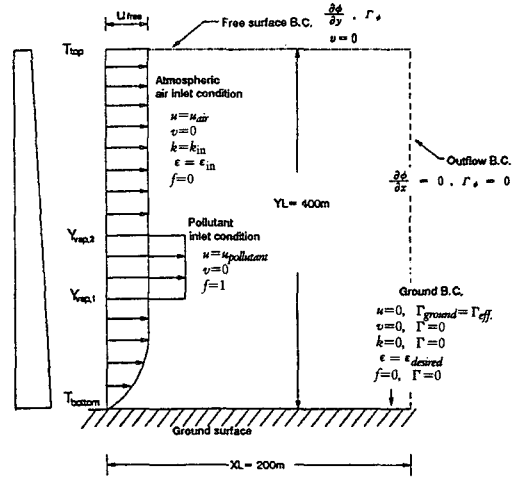


Fig. 2 Boundary conditions for various dependent variable ϕ

방법이다. 이때 입자에 작용하는 힘은 보통 입자의 밀도가 이동공기중에 비해 약 1000배 정도 클 때에는 부력, 'Basset' 힘, 'virtual mass' 힘 등은 무시되고 공기역학적인 힘과 중력만이 보통 고려된다⁸⁾. 이 두힘을 고려하였을 때에 입자에 미치는 힘은 아래와 같이 표시된다.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = C_D A_p \frac{1}{2} |\vec{v}_g - \vec{v}_p| (\vec{v}_g - \vec{v}_p) - \rho_p \vec{g} \dots\dots (11)$$

윗 식에서 하첨자 p 는 입자, g 는 기체를 각각 나타낸다. 그러므로 m_p, A_p 는 입자의 질량과 투영단면적을 나타내며 ρ_p 와 \vec{g} 는 입자의 밀도와 중력가속도를 나타낸다. 본 연구에서는 식(11)의 $x-, y-$ 속도와 그 궤적을 Euler 방법을 이용하여 계산하였다. 식(11)을 $x-, y-$ 방향의 속도성분, $u-, v-$ 속도항으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha (u_g - u_p) \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha (v_g - v_p) \dots\dots\dots (13)$$

윗 식에서는 α 는 기체와 입자의 상대속도를 포함하는 항으로서 아래 식으로 주어진다.

$$\alpha = \frac{18 \mu C_D \text{Re}}{\rho_p d^2} \dots\dots\dots (14)$$

식(14)에서 μ 와 d_p 는 각각 역학 점성계수와 입자의 직경을 나타내며 Re 는 입자의 직경과 상대속

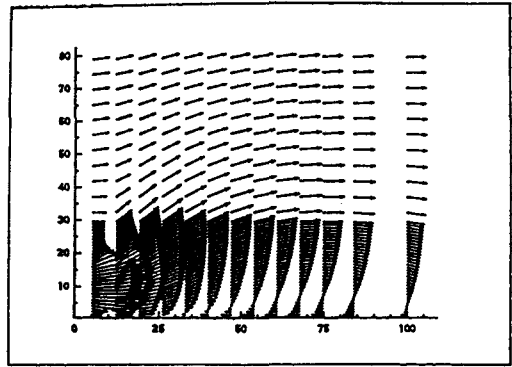
도로 表現되는 Reynolds 수이다. 식(12)와 (13)을 Euler방법에 의해 입자의 시간에 대한 위치, 속도 등을 구하였다. 이러한 과정에서 난류가 입자에 미치는 영향 등은 현단계에서는 고려치 않았다⁹⁾.

본 연구에서는 각 변수 변화에 따른 상대적인 변화와 영향력을 조사하기 위하여 일정한 표준조건을 설정한 후 변수를 하나씩 변화시켜가며 유동변화를 검토 하였다. 본 연구에서 고려한 표준조건은 Table 1에 이미 提示한 바와 같이 'free stream'의 속도 2m/s이고 독성오염물질의 초기속도가 5m/s, 온도가 100°C인 경우로 정하였으며 상층부 꼭대기 온도, $T_{top}=20^\circ\text{C}$, 지상표면에서의 온도, $T_{bottom}=30^\circ\text{C}$ 로서 기상학적으로 불안정한(unstable) 상태를 가정하였다. Fig. 3은 이러한 표준상태에 대한 계산 결과, 즉 벡터유동, 오염물질의 분포 및 입자의 궤적을 보여주는 것으로 Fig. 3(a)에서는 벡터유동을 나타냈는데, 유동의 상승하는 양상이 가시적으로 나타나고 있다²⁾.

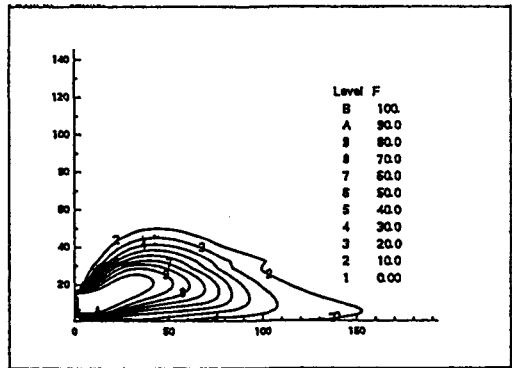
Fig. 3(b)는 위의 표준조건에 해당하는 경우의 입자궤적을 도시한 것으로서 사용한 입자의 크기는 앞에서 이미 언급한 바와 같이 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μm 의 8가지 크기이다. Fig. 3(b)에 나타나 있듯이 입자의 크기가 1, 5, 10 μm 의 경우는 거의 공기와 유사한 行動을 하며 공기 流線을 따라가는 양상을 보이거나 입자의 크기가 커질수록 중력의 효과가 두드러져서 지상으로 강하하는 양상이 뚜렷 했다. 한편 입자의 초기 확산 위치에 따라 분산하는 양상은 초기 고도에 따른 영향 이상의 큰 변화가 표준유동에서는 나타나지 않았다. Fig. 3(c)는 氣相오염물질의 농도에 해당하는 질량분율을 나타내는 것으로서 질량분율이 10% 이상 해당되는 지역은 초기 확산 위치로부터 높이 40~50m에 하류방향의 길이 150m까지로 나타났다.

3. 결과 및 토론

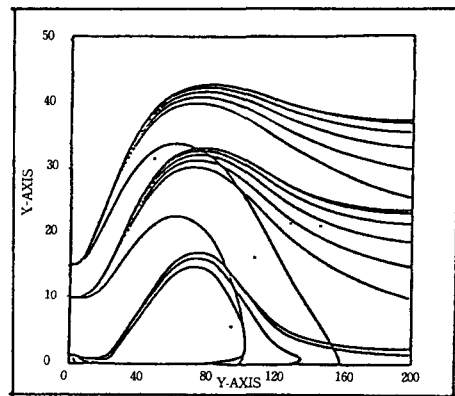
본 論文에서는 오염물질의 分子量의 변화에 의한 密度 변화량에 따른 수치해 석을 시도하였다. 밀도의 변화를 보기 위해 NH_3 , Air, CO_2 , CH_2Cl_2 를 가상 확산오염물질로서 사용하였다. Fig. 4에 위에서 언급한 4가지 물질이 표준 유동(온도 100°C, 오염물질 초기 속도 5m/s)에서의 벡터 유동장을 나타내었다. 그림에서 나타낸 바와 같이



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Calculated results for the standard case

- (a) Vector plot
- (b) Pollutant concentration profile
- (c) Particle trajectories for 8 different particle sizes and 3 injection points
 Particle sizes : 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μm
 Injection points : 1.5, 10, 15m

(a) NH₃와 (b) Air의 경우에는 상승 유동과 재순환 영역이 두드러졌으며 특히 NH₃의 경우 유동장의 변화가 심하게 나타났다. 이것은 NH₃의 밀도가 주위공기 보다 작고 온도 또한 높으므로 Table 3의 수직속도 성분이 강력한 부력항을 가지는 것에 기인한다.

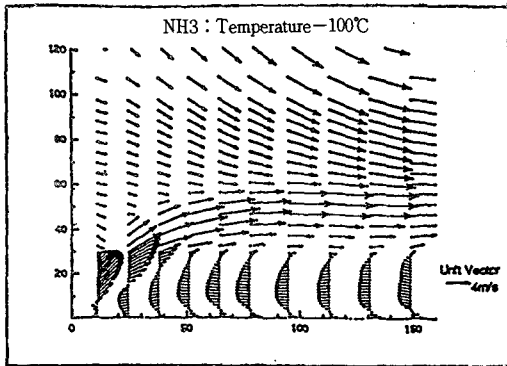
한편 Fig. 4의 (c)와 (d)의 경우는 空氣보다 밀도가 CO₂의 경우에는 1.5배, CH₂Cl₂의 경우에는 2.9배 큰 경우로서 양쪽 모두 부력이 전혀 나타나지 않고 地表面에 낮게 깔리는 양상을 보이고 있다. CO₂나 CH₂Cl₂의 경우 전혀 浮力을 나타내지 않는 것은 이들의 밀도가 100℃의 경우에도 주위 공기 밀도에 비해 많이 가볍지 않거나 아직도 무겁기 때문이다. 실제로 100℃ CO₂의 밀도를 계산해보면 이상 기체 방정식의 아래와 같은 식을 얻는다.

$$\frac{p}{\bar{R}} = \frac{\rho}{M} T = \text{const.} \dots\dots\dots (15)$$

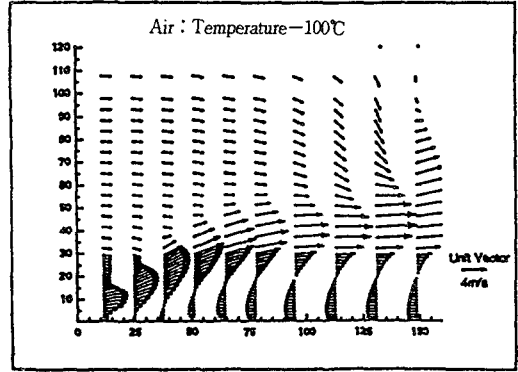
윗 식에서 p, \bar{R} , ρ, \bar{M} , T는 각각 압력, 일반 기체상수, 밀도, 분자량, 절대온도를 각각 나타낸다. 그러므로 100℃ CO₂의 밀도를 20℃ Air의 밀도와 그 비를 구하여 보면 아래와 같이 100℃ CO₂의 밀도가 공기 밀도에 비해 1.2배 크다.

$$\frac{\rho_{CO_2}}{\rho_{Air}} = \frac{T_{Air}}{T_{CO_2}} \frac{M_{CO_2}}{M_{Air}} = \frac{293}{373} \frac{44}{28.84} = 1.2 \quad (16)$$

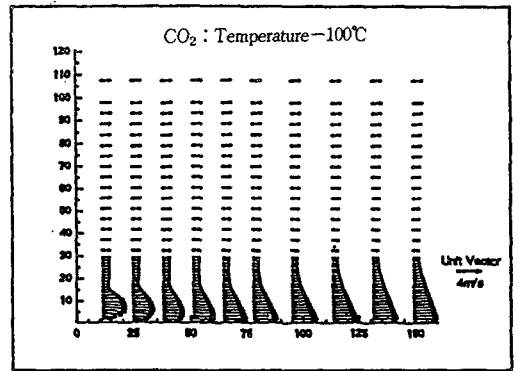
그러므로 100℃ CO₂ 기체는 공기의 밀도보다 1.2배 크므로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 부력 현상이 나타나지 않음은 豫想된 결과이다. 그러나 CH₂Cl₂ 바로 상층부의 공기는 부분적으로 가열되어 상승하는 양상이 나타나고 있다.



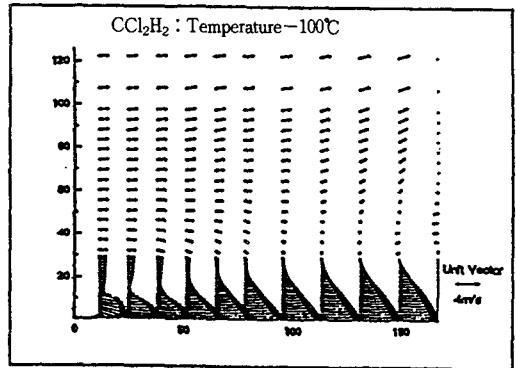
(a) NH₃



(b) Air



(c) CO₂

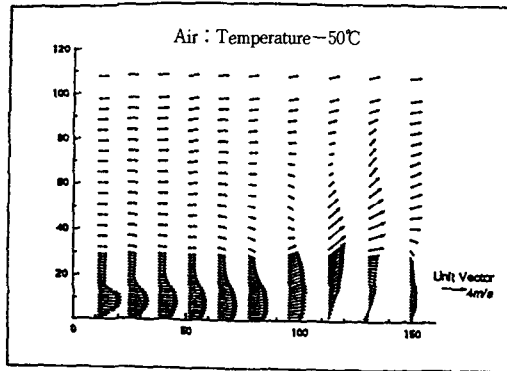


(d) CH₂Cl₂

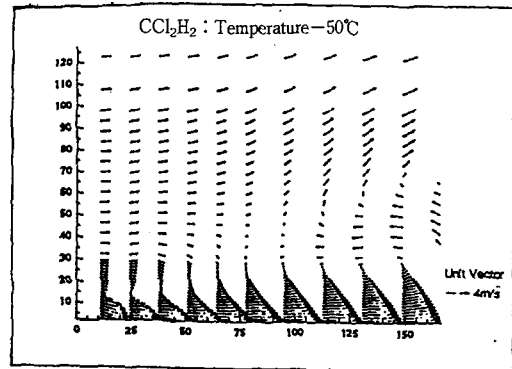
Fig. 4 Standard velocity vector plots of four dispersion simulants

다음은 온도 변화(50, 100, 200°C)에 따른 오염 물질에 대한 유동장 계산 결과를 검토한다. Fig. 5는 온도의 변화에 따른 공기의 유동장을 나타낸

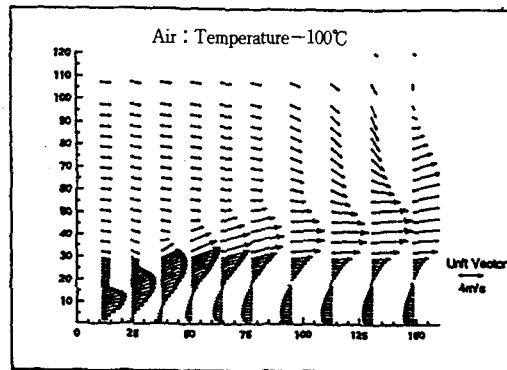
다. 이 경우는 오염물질과 주위물질이 空氣로서 분자량의 차이에 의한 밀도 변화가 배제된 경우를 나타내는 경우이다. Fig. 6은 CH_2Cl_2 의 온도 변화



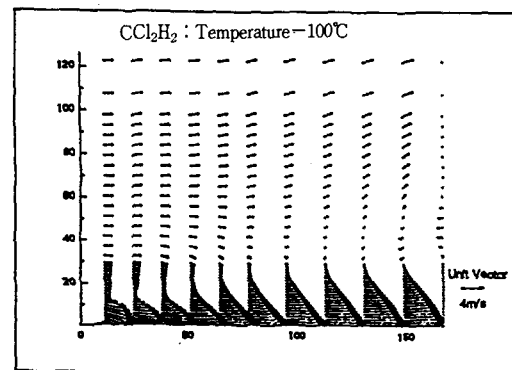
(a)



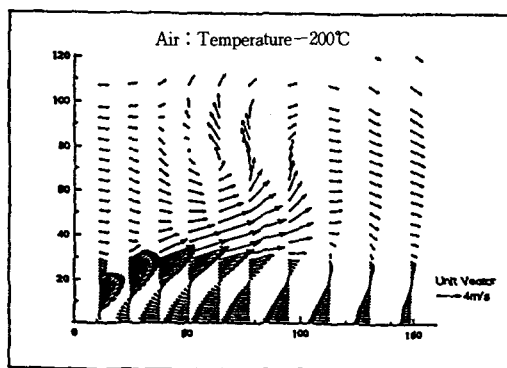
(a)



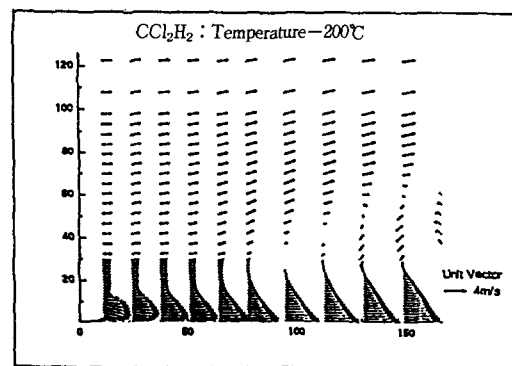
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 5 Velocity vector plots of air case.
(a) 50°C (b) 100°C (c) 200°C

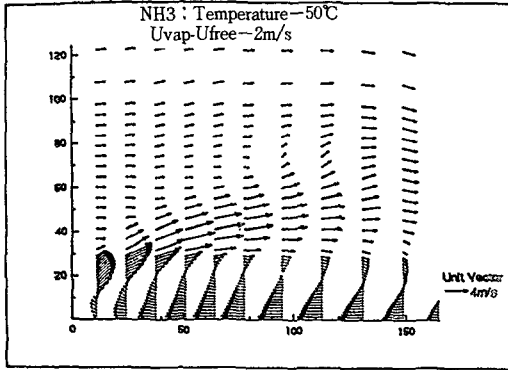
Fig. 6 Velocity vector plots of CH_2Cl_2 case.
(a) 50°C (b) 100°C (c) 200°C

에 따른 流動場 樣相을 나타낸다. 그러나 Fig. 6의 CH_2Cl_2 의 경우 온도가 200°C 높아져도 부력은 전혀 나타나지 않고 오히려 밀도가 높아짐에 따른 CH_2Cl_2 의 지표면 降下로 CH_2Cl_2 윗 부분의 空氣가 流入되는 양상을 보인다. 본 논문에서는 제시하지는 않았지만 CO_2 의 경우에는 온도가 200°C 로 높아진 경우에 CO_2 의 밀도가 주위 공기 밀도보다 약간 작아지므로 일정시간이 지난 풍하류 방향에서 CO_2 가 부력에 의해 상승하는 경향을 나타내었다. 아울러 微弱하지만 지표근처에서 재순환이 형성됨을 보였다. 다음은 'Hydrodynamic Discontinuity'를 배제한 경우 즉, 확산 오염물질과 주위 空氣와의 相對속도가 크지 않은 경우에 확산물질의 밀도와 열적 부력 效果에 의한 유동양상을 조사하였다. Fig. 7은 오염물질이 NH_3 로서 속도

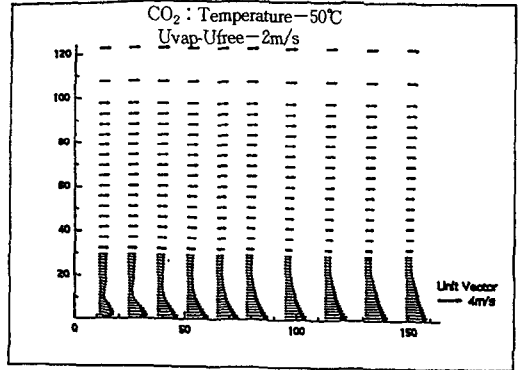
를 주위 공기의 속도와 유사하게 2m/s 로 설정한 경우로서 온도를 50°C 와 100°C 의 경우에 대한 결과이다. 이 경우는 비록 'Hydrodynamic Discontinuity' 효과는 배제되었지만 밀도도 공기에 비해 작고 온도도 높은 두가지 복합요인에 의해 오염물질 상승과 재순환 영역이 현저하게 나타났다.

Fig. 8은 분산물질원을 CO_2 로 가정한 경우로서 확산물질 분자량이 오히려 공기보다 무겁기 때문에 높은 온도에 의한 부력효과 감소가 예상되는 경우이다.

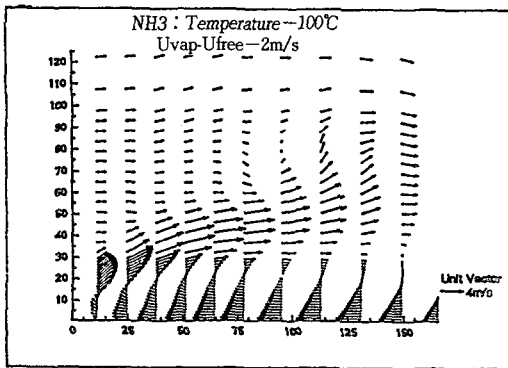
CO_2 의 경우는 앞에서 이미 언급한 바와 같이 177°C 온도가 되어야 비로소 20°C 공기와 밀도가 같아지는 것을 고려할 때 Fig. 10의 50°C 나 100°C 경우에는 부력 효과가 나타나지 않음은 當然한 결



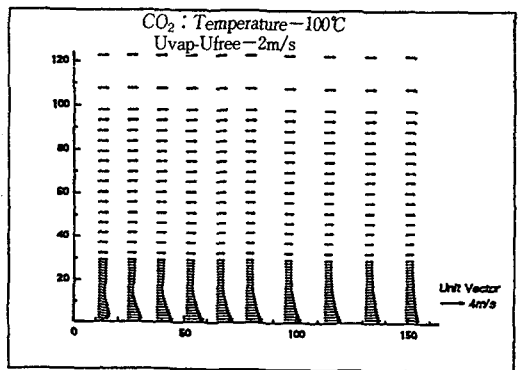
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 7 Velocity vector plots of NH_3 without inlet hydrodynamic discontinuity for $u_{\text{inlet}}=2\text{m/s}$. (a) 50°C (b) 100°C

Fig. 8 Velocity vector plots of CO_2 case without inlet hydrodynamic discontinuity for $u_{\text{inlet}}=2\text{m/s}$. (a) 50°C (b) 100°C

과로 판단된다.

앞의 Fig. 7, 8은 독성오염물질의 초기 확산속도가 2m/s로서 주위공기의 속도와 유사하게 設定함으로써 'Hydrodynamic Discontinuity'를 배제한 경우이며 주위 空氣속도를 표준유동의 오염물질속도 5m/s로 유동의 強化에 따른 부력현상의 弱화된 유동장의 결과를 제시하고자 한다. 단 여기서 언급할 사항은 주위공기, U_0 를 5m/s로 설정한다해도 주위공기의 高度에 따른 속도변화는 아래와 같은 power law 형태를 가졌기 때문에 오염물질의 속도, 5m/s와 정확하게 일치하지 않는다.

$$U = U_0 \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^n \dots\dots\dots (17)$$

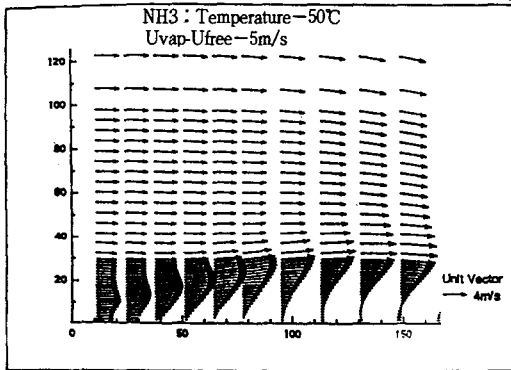
윗 식에서 하첨자 '0'는 기준상태에서 위치(Z)와 속도(U)를 각각 나타내며 n은 기상조건에 따른

수치를 나타낸다. Fig. 9는 NH₃의 온도 50°C와 100°C의 경우로서 상승현상과 재순환 영역이 보이는 하나 앞의 Fig. 7의 초기 유입속도 2m/s의 경우에 비해 현저히 弱해진 결과를 나타내고 있다. 이것은 유동강도의 증가에 따른 열적 부력효과와 상대적 감소로 풀이할 수 있으며, 열적 부력과 유동강도의 상대적인 비를 나타내는 Richardson (Ri_x)수의 定義로부터 쉽게 할 수 있다¹⁰⁾.

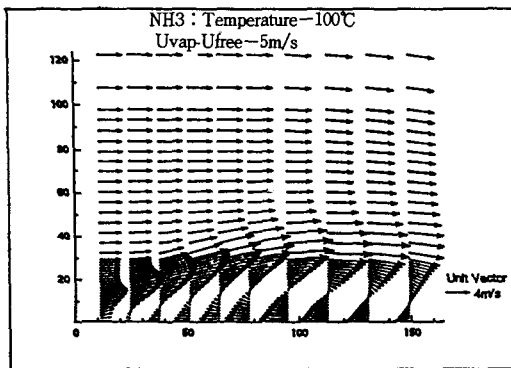
$$Ri_x = \frac{Gr_x}{Re_x^2} \dots\dots\dots (18)$$

윗 식에서 Gr_x 와 Re_x 는 각각 Local Grashof수와 Reynolds수를 나타내며 이 수들의 의미는 Grashof수는 [부력/점성력] 그리고 Reynolds수는 [관성력/점성력]의 비를 나타낸다. 그러므로

$$Ri_x = \frac{g \beta \nabla T x^3 / \nu^2}{v^2 x^2 / \nu^2} = \frac{g \beta \nabla T x^3}{v^2} \dots\dots\dots (19)$$

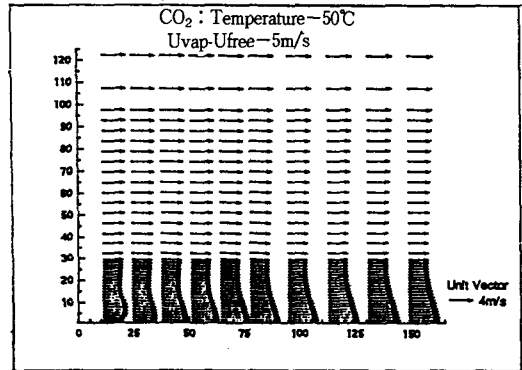


(a)

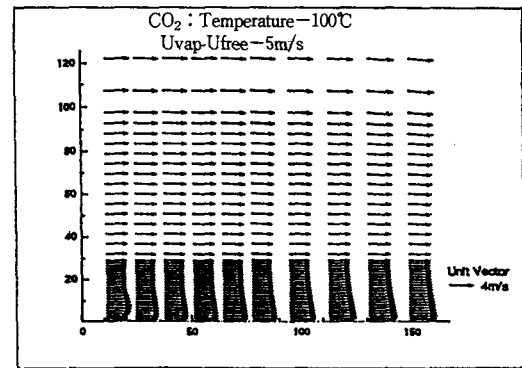


(b)

Fig. 9 Velocity vector plots of NH₃ case without inlet hydrodynamic discontinuity for $U_{inlet} = 5m/s$.
(a) 50°C (b) 100°C



(a)



(b)

Fig. 10 Velocity vector plots of CO₂ case without inlet hydrodynamic discontinuity for $U_{inlet} = 5m/s$.
(a) 50°C (b) 100°C

식(21)에서 볼 수 있듯이 유동강도 v 가 증가함에 따라 부력효과는 매우 빨리 감소됨을 알 수 있다. 보통 부력이 나타나지 않는 강제대류의 경우에 Ri_x 가 0.02 정도이고 전체 유동강도중에 자연대류 효과가 10%되는 경우에는 Ri_x 0.225 정도로 알려져 있으나¹⁰⁾ 현단계에서 구체적 Ri_x 값은 계산하지 않는다. Fig. 10은 CO₂의 경우로서 속도 5m/s로 증가한 경우에는 앞에서 記述한 부력弱化現象에 의해 거의 부력이 없는 단순한 유동형태를 나타내고 있다.

이제까지는 plume에 대한 氣相 유동장을 해석하였다. 아래에서 나타내는 그림은 固相분진의 거동에 대한 計算結果를 提示하고자 한다. 이미 언급한 바와 같이 고상분진의 주입 수직위치는 1.5, 10, 15m로 세 지점이고 분진의 크기분포 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μ m에 대해 비중이 0.5, 1, 2의 경우에 대해 조직적인 수치해석을 시도하였다.

Fig. 11의 경우는 표준공기 유동에 대해 밀도변화에 따른 세군대 주입위치에서 8가지 입도에 대한 입자해석이다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 전체적인 분진 입자해석은 전체적으로는 공기상승

유동에 의해 함께 상승하는 양상을 보여주고 있으나, 밀도가 가장 큰 Fig. 11의 (c)의 경우 즉, $\rho = 2000\text{kg/m}^3$ 의 궤적은 중력효과에 의해 지표면으로 빨리 침강하는 것으로 나타났다. 이 현상은 입자가 큰 경우에는 더욱 深化된다. 이에 대한 구체적인 것을 Fig. 12에 提示하고자 한다.

Fig. 12의 (a)는 밀도가 2000kg/m^3 이고 주입위치가 높이 10m인 경우에 입도가 10, 50, 100 μ m의 궤적을 나타내는 것이다. 그림에서 보듯이 10 μ m의 경우에는 상승기체를 따라 25m정도 상승하였으나 50 μ m의 경우에는 18m정도를 나타냈다. 그러나 100 μ m의 입자는 거의 공기의 영향을 받지 않고 초기속도(例 v_0)와 중력에 의해 포물선 운동하는 물체처럼 아래식과 같은 궤적을 그린다.

$$y = y_0 - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{v_0^2} \dots\dots\dots (22)$$

Fig. 12의 (b)는 입자의 크기 100 μ m 경우 밀도를 500, 1000, 2000 kg/m^3 으로 변화시킨 경우로서 입자는 초기에는 침강하다가 재상승하는 유동양상을 나타내고 있다. 이러한 재상승의 원인중의 하나는 이 영역의 유동이 재순환하여 상승하는 것에 기인

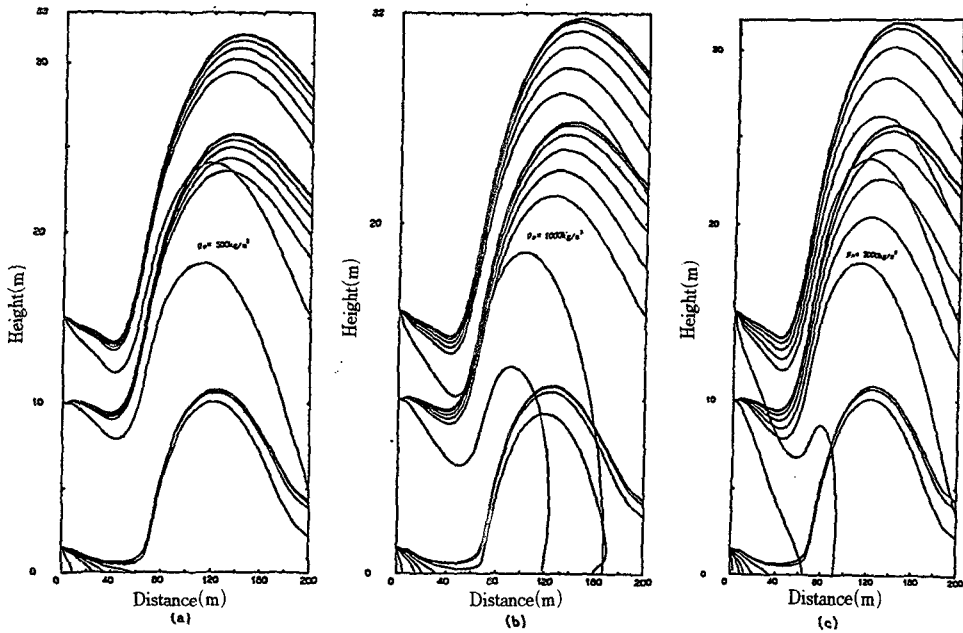


Fig. 11 Partial trajectory plots for 3 injection locations(1,5,10,15m) and 8 particle sizes(1,5,10,20,30,40,50,100 μ m). (a) 500 kg/m^3 (b) 1000 kg/m^3 (c) 2000 kg/m^3

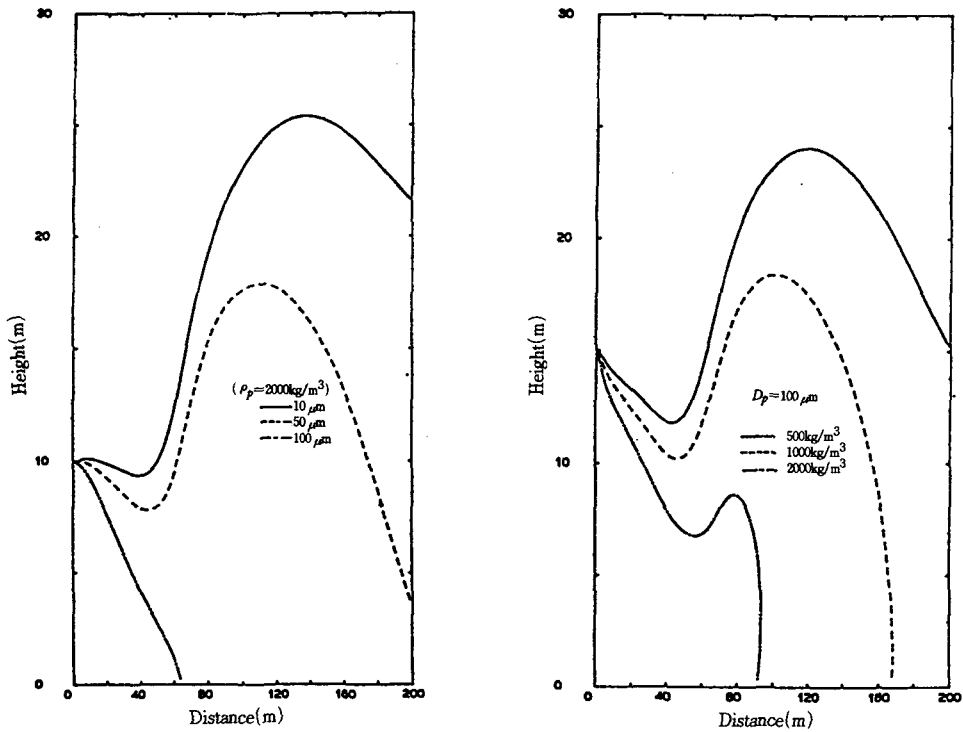


Fig. 12 (a) Partical trajectory plots of the particle sizes of 10, 50, 100 μm with density $2000\text{kg}/\text{m}^3$
 (b) Partical trajectory plots of the size of 100 μm with density of 500, 1000, $2000\text{kg}/\text{m}^3$

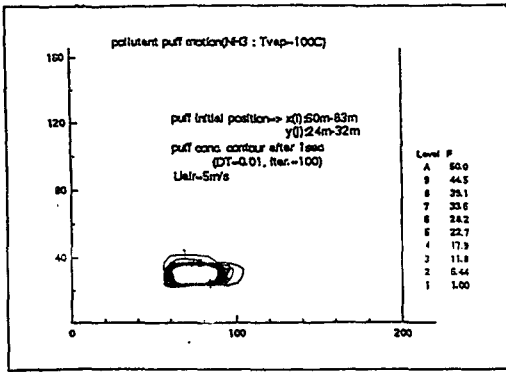
한다. Fig. 12에서 볼때 입자의 입도와 밀도가 증가할수록 중력침강에 의한 영향이 두드러짐을 알 수 있다. 마지막으로 汚染源의 형태가 'puff'의 경우에 대한 결과를 提示하고자 한다. Fig. 13은 주위 대기속도 5m/s이고 100°C NH₃ 'puff'에 대한 결과이다. Puff의 초기위치를 풍하방향 60-83m에 있고 고도는 24-32m 위치를 상정했다. 시간에 따른 puff의 확산과 풍하방향으로의 이동 양상을 가시적으로 나타내고 있다. 앞서서도 언급했지만 puff의 거동은 비정상유동에 대한 해로 나타나며 본 논문에서는 예비연구의 성격의 결과를 나타내었다. 기타 자세한 것은 다른 문헌에 제시할 예정이다⁷⁾.

4. 결 론

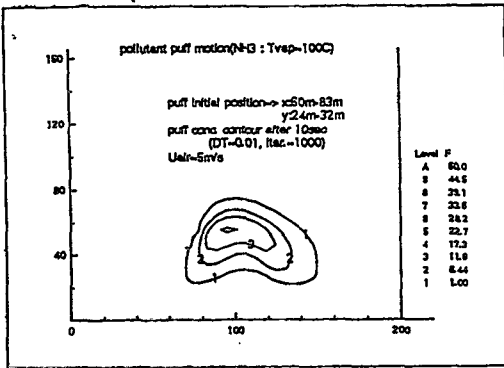
수치해석적 방법을 이용하여 독성 固-氣相 오염

물질의 난류 경계층내에서 단기 대기확산 舉動을 주요 變數에 대해 조사하였다.

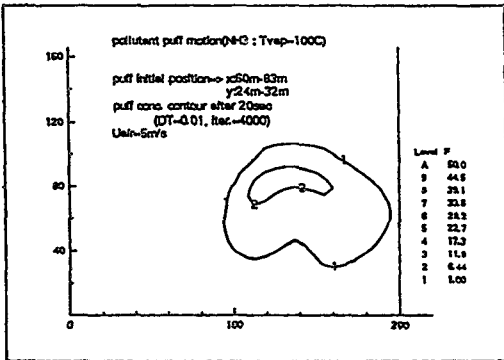
본 연구에서 밀도 변화를 위한 가상 오염 물질로서 분자량이 다른 NH₃, Air, CO₂, CH₂Cl₂ 등을 사용하였으며, 각 물질에 따른 온도 변화는 50, 100, 200°C를 고려하였다. 기타 오염 물질과 주위 대기의 초기 속도 구배 등에 따른 영향 등을 검토하였다. 이 計算 結果에 의하면 오염 물질의 밀도는 온도와 相關關係를 이루며 오염 물질의 확산 영향에 至大한 영향을 미치는 것으로 나타났다. CH₂Cl₂와 같이 밀도가 공기보다 무거운 경우에 온도가 200°C로 증가하여도 오염 물질이 부력을 가지지 않고 지면으로 낮게 침강하는 양상을 나타냈다. 한편 분산 固相 粒子는 1차년도에 고려한 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100 μm 의 8가지 변화외에 밀도 변화를 500, 1000, $2000\text{kg}/\text{m}^3$ 에 대해 각각 計算하였다. 기타 2차원 수치 평면상에 순간적인 'puff' 발생源에 대한 거동 양상을 時間의 함수로



(a)



(b)



(c)

Fig. 13 NH₃ pollutant puff motion atmospheric air speed 5m/s. (a) 1sec. (b) 10sec. (c) 20sec.

서 적절하게 수치모사하여 그 결과를 나타내었다. 'puff' 수치모사 결과 중 주목할만한 것은 풍속이 2~3m/s로 미약할때 puff의 거동은 풍속에 거의 영

향을 받지 않고 열적 부력에 의해 수직 상승하는 양상을 보였다.

NOMENCLATURE

f : mass fraction,

$$\frac{\text{mass of pollutant}}{\text{mass of pollutant + mass of air}}$$

Grashof number :
$$\frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2}$$
,

[dimensionless]

$\vec{\nabla}$: del, $\left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k \right)$

p : average pressure, [N/m²]

\bar{R} : universal gas constant, 8.3[kJ/kg·mole]

Re : Reynolds number, $\frac{\rho v D}{\mu}$, [dimensionless]

Ri : Richardson number, $\frac{Gr}{Re^2}$, [dimensionless]

S_ϕ : 단위시간당, 단위체적당 종속변수의 생성
 량, (volumetric source per unit time)

T : average temperature, [K]

u : x방향 속도 성분, [m/s]

v : y방향 속도 성분, [m/s]

U_a : 공기의 속도, [m/s]

Γ_ϕ : 확산계수, [kg/m·s]

ϵ : 난류운동에너지소산율 [J/kg·s]

k : 단위질량당 난류운동에너지,

$$\frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2), \text{ [J/kg]}$$

c_μ : 난류 상수, 0.09

μ_t : 난류점성계수, $\mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\epsilon}$, [kg/m·s]

ν : 동점성계수(kinematic viscosity), [m²/s]

ρ : 유체의 밀도, [kg/m³]

ρ_a : 공기의 밀도, [kg/m³]

ρ_w : 물의 밀도, [kg/m³]

ϕ : dependant variable (specific quantity),
 [Quantity/kg]

Subscripts

N : North

S : South

E : East

W : West

본 연구는 국방과학연구소 화학생물학전 작용제의 대기확산에 관한 컴퓨터 모델개발 및 現場 실험에 관한 연구(ADD 92-3-3)의 일환으로 수행되었으며 그 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) EPA, Guidline on Air Quality Models (revised), U.S Environmental Protection Agency, EPA-450/2-78-027R, 1986.
- 2) 이선경, 송은영, 장동순, 固-氣相 有害物質 大氣 확산에 관한 數值 해석, 한국산업안전학회지, 제9권 제1호, 1994.
- 3) Patankar, S. V., Numwrical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- 4) Van Doormaal, J.P. and G.D. Raithby, Enhancements of the SIMPLE Method for predicting incompressible fluid flows, Numerical Heat Transfer, Vol. 7, pp. 147~163, 1984.
- 5) Launder, B.E. and D.B. Spalding, Mathematical Models of Turbulence, Academic Press, New York, 1972.
- 6) Dipankar C., S.E. Kim, W.S. Flannery, Calculation of Turbulent separated Flows Using a Renormalization Group Based $k-\epsilon$ Turbulence Model, ASME Fluids Engr. Conf., 1993.
- 7) 나혜령, 전산유체공학을 이용한 環境/에너지 시스템 高度設計研究 : 연돌배출물질 대기 확산, 싸이클론 연소로, 싸이클론형 전기집진기, 충남대학교 환경공학과 석사학위논문, 1996.2 예정.
- 8) Smoot, L.D. and D.T. Pratt, Pulverized-coal Combustion and Gasification-theory and Applications for Continuous Flow Processes, Plenum Press, 1984.
- 9) Jang, D.S., Single and Two-phase Reacting Flow Prediction-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, L. A, 1987.
- 10) Thomas, L. C., Heat Transfer Ch. 9 Convection Heat Transfer : Practical Analysis-Natural Convection, Prentice-Hill International, Inc., London, p. 577, 1992.