

1), ( )2  
1)† • 2 • 1) • 1)

- Abstract -

Prediction of Worker's Exposure in a Uniform Freestream

Yu-Jin Jung1)† • Hwan-Tae Kim2) • Hyun-Chul Ha1) • Tae-Hyeung Kim1)  
Department of Environmental Engineering, Changwon National University1)  
Hyundai Motor Company2)

In industrial field, there are several operations where a horizontal unidirectional airflow is used to control airborne contaminants. When a worker is immersed in a uniform freestream, a recirculating airflow can be created downstream of the worker by the phenomenon of boundary layer separation. If the contaminant source and the breathing zone are within this near-wake region, high exposure may occur. The investigation for the effect of contaminant source location on worker exposure was performed by using CFD(Computational Fluid Dynamics). The airflow field was numerically calculated by assuming a steady flow and using the standard k- turbulence model. As the results were compared with experimental data, the applicability of CFD was successfully verified. Subsequently, the breathing zone concentrations of the worker were predicted and compared with experimental data. The effects of contaminant density and turbulence intensity of freestream on worker exposure were evaluated.

**Key Words** : Computational Fluid Dynamics, Ventilation, Numerical simulation, k- turbulence model

**Nomenclature**

- G :
- H :
- I : (turbulence intensity)
- X :
- i, j, k :
- p :
- u : X
- v : Y
- w : Z
- k :
- :
- :
- ij :
- μ : (dynamic viscosity)
- μt : (turbulent viscosity)
- μeff : (effective viscosity)
- : (kinetic viscosity)

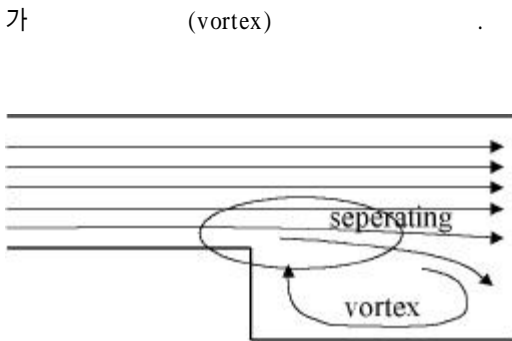
: 2000 9 5 , : 2000 10 16  
† :  
(Tel) 055- 279- 7945, E-mail) push-up@hanmail.net

(Computational Fluid Dynamics : CFD)

(horizontal unidirectional airflow) 가 (Dunnett, 1994 ; Robinson et al., 1996 ; Riffat et al., 1997 ; Varley, 1997 ; Kulmala, 1997) CFD

(downstream) (recirculating region) (boundary layer separation)

Figure 1



CFD

(Kulmala, 1996)

CFD

( , , , 가

가

가

Figure 1. Boundary layer separation phenomenon

, 가 (wake region)

가

(Kim and 1.

Flynn, 1991),

가

가

Ljungqvist, 1995).

(Flynn and

Figure 2

$L \times H \times W = 4.2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$

가 1.52m,

가 0.38m

0.85m

(

가

가

)

(wake region)

가

CFD- ACE(CFD Research

Co., 2000)

Kulmala(Kulmala, 1995)

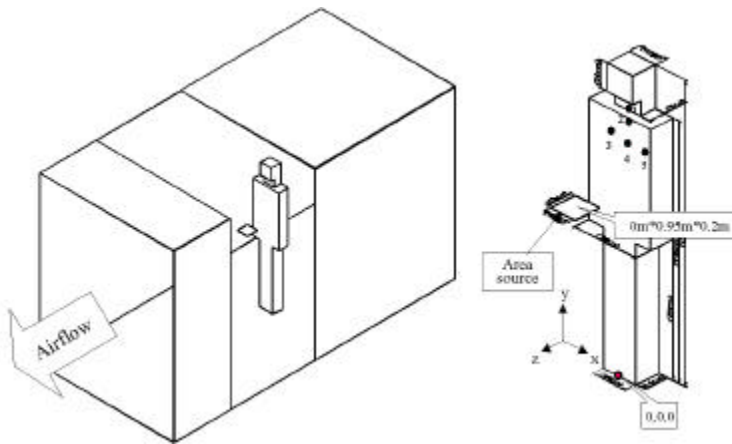


Figure 2. Computational mannequin in a wind tunnel

20cm (Re = × )  
 (area source) SF6 ,  
 SF6 , SF6He  
 (neutrally buoyant), SF6 (Governing equation)

2. 
$$-\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

Navier- Stokes 
$$(2)가$$

(eddy) 
$$-\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Newtonian Fluid 
$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Spalding 1974 Launder 
$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

가 Navier- Stokes (3) (2) (4) Navier- Stokes Equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} \quad (4)$$

, 3

(reynolds stress)

(turbulent eddy viscosity)

length) (characteristic velocity)

(μ t)

가

1974 Launder Spalding

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t = \mu + C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

(k)

( )

(k)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \epsilon \quad (9)$$

( )

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) - C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon_2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

$$G \quad (11)$$

$$G = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

Table 1

Table 1. Values of the constants in the k- model.

Cμ	C 1	C 2	k
0.09	1.44	1.92	1.0
			1.3

3)

(1) (Inlet)

(fixed velocity).

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right\} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$(5) \quad (6)$$

$$- \overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$(6) \quad (5),$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (7)$$

난류강도에 대한 오염물질 농도변화를 평가하기 위해 입구 경계면에서의 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)는 다음 식에 의해 결정하였다.

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) = \frac{3}{2} (IU_o)^2 \quad (12)$$

여기서, I는 난류 강도(turbulence intensity)이다.

입구 경계면에서의 난류 소산율(dissipation rate)은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{0.03H} \quad (13)$$

여기서, H는 입구 경계면의 수리학적 직경, 즉 입구의 높이이다.

#### (2) 출구(Outlet) 경계조건

자유 표면(free surface)에 있어 미지의 종속변수들을 정확하게 결정하기는 매우 어려운 일이다. 따라서 이러한 미지 변수들의 변화량을 무시할 수 있는 조건(fixed pressure)을 줌으로써 경계면에서의 물성치 변화는 고려하지 않았다.

단, 자유 표면에 대해 Fixed pressure 조건을 적용하기 위해서는 자유 표면이 유입구나 배기구와 같은 유체 유동이 심한 영역으로부터 충분한 거리 D를 두고 주어져야 한다. 유체 유동이 심한 영역의 면적을 A라 한다면, 자유 경계면까지는 다음의 식을 만족할 수 있는 거리만큼 떨어져야 한다(Kulmala, 1997).

$$D = 5A^{1/2} \quad (14)$$

#### 4) 수치해석 방법

본 연구에서는 표준 k- $\epsilon$  난류모델을 이용하였고, 상용 전산유체 소프트웨어인 CFD-ACE를 이용하여 수치해석을 실시하였다. CFD-ACE는 이산화 방법으로 유한체적법(finite-volume method)을 사용하고 있다. 상류 차분 도식(upwind differencing scheme)과 엇갈림 격자계(staggered grids)를 이용하였고 압력장을 구하기 위해 SIMPLE-C(Semi-Implicit

Method Pressure-Linked Equations Consistent)알고리즘을 사용하였다. 벽면과 고체 표면에서의 전단응력은 벽함수(wall function)를 이용하여 구하였다. 제어체적의 형성에 사용된 격자수는 x, y 및 z방향으로 각각 41×20×29 개이고, 수치해석에 필요한 기본 방정식이 비선형이므로 반복에 의한 해의 수렴이 필요하다. 반복계산시 종속변수들의 수렴정도를 점검하기 위하여 잉여치(residual : R), R값을 체크하면서 잉여치값이 10<sup>-3</sup>이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다.

### III. 수치해석 결과

#### 1. 와류 발생지역(Wake region) 유속분포 예측 결과

Figure 3과 Figure 4는 마네킨을 옆에서 바라보았을 때와 위에서 바라보았을 때의 유동장과 마네킨으로부터 0.2m, 0.5m, 0.8m 떨어진 지점의 유속 분포를 Kulmala(Kulmala, 1995)에 의해 예측된 수치해석치와 비교한 결과이다.

Figure 3을 보면 마네킨의 어깨와 허리 사이에 역기류가 발생하여 마네킨쪽으로 향하는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 작업자가 손에 작업물체를 들고 작업시에 작업물체가 오염물질 발생원이고 재순환 영역 내부에 위치한다면 작업자는 이러한 역기류에 의해 오염물질에 노출될 수 있다는 것을 짐작할 수 있다. 더불어 역기류가 호흡구 위치에서 발산하고 있는 형태이므로 오염물질의 농도가 호흡구보다는 어깨 부위가 더 높을 것으로 예상된다.

본 연구에서 사용된 CFD-ACE의 예측치(실선)와 Kulmala의 FLUENT 예측치(점선)가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 CFD-ACE의 예측 성능이 비교적 정확함을 알 수 있다.

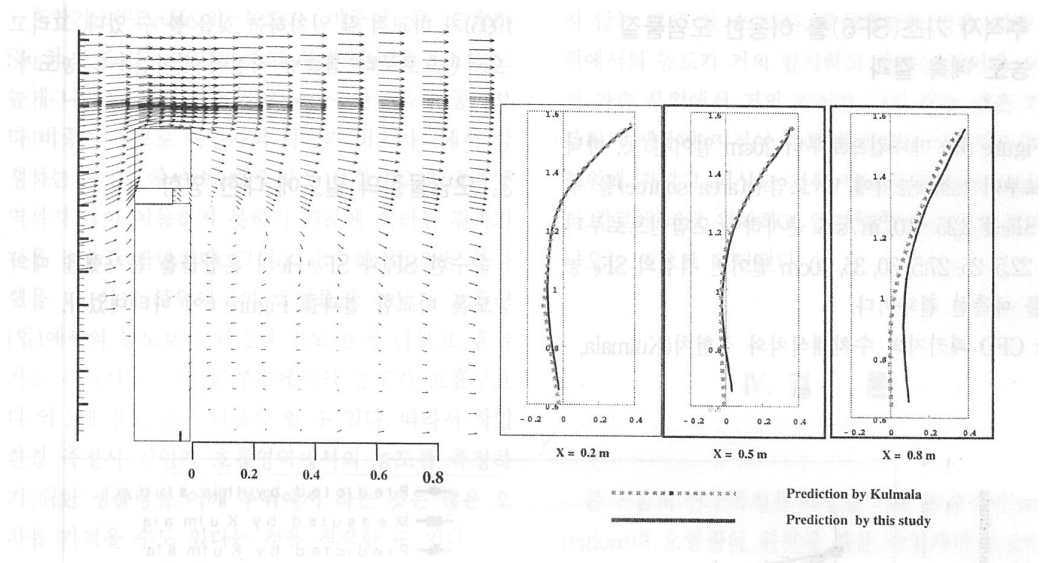


Figure 3. Side view of velocity vector (left) and velocity comparison at  $X=0.2$ ,  $0.5$  and  $0.8\text{m}$  (right)

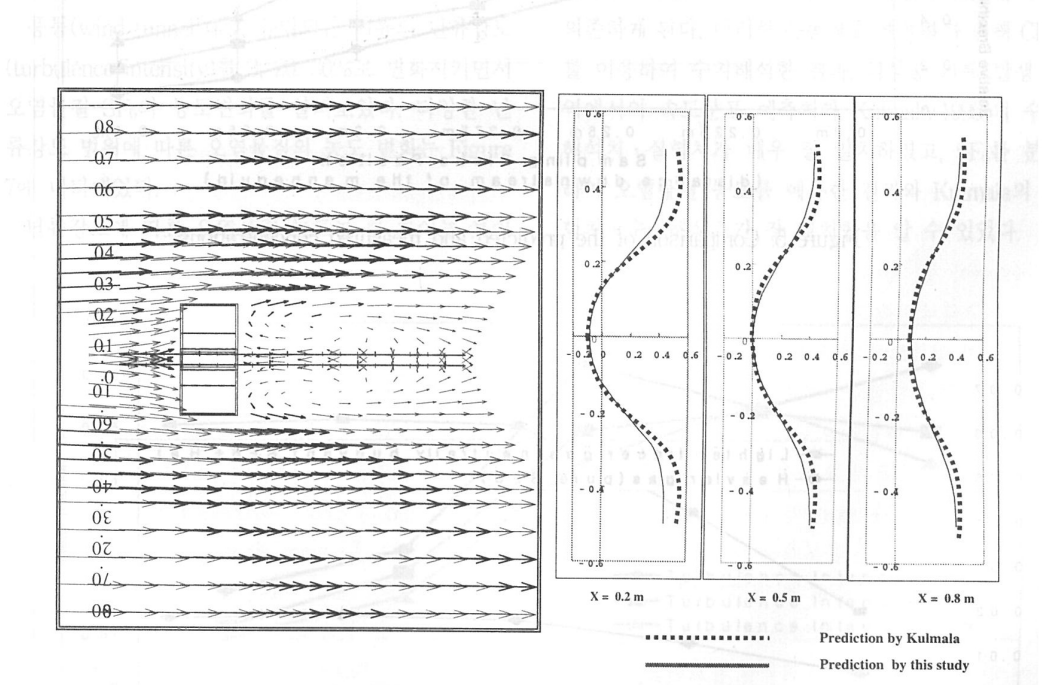


Figure 4. Plane view of velocity vector (left) and velocity comparison at  $X=0.2$ ,  $0.5$  and  $0.8\text{m}$  (right)

2. 가 (SF6) 1995)가 가

Figure 5 20cm ,  
1.2m (area source) 3.  
SF6  $2.25 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$   
20, 22.5, 25, 27.5, 30, 35, 40cm SF6 SF6+He  
CFD (Kulmala, Figure 6

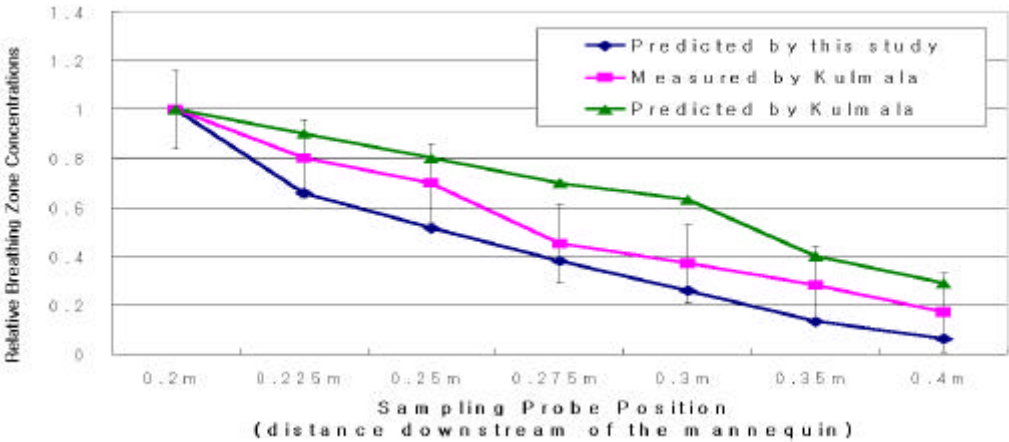


Figure 5. Comparison of the predicted and measured concentrations

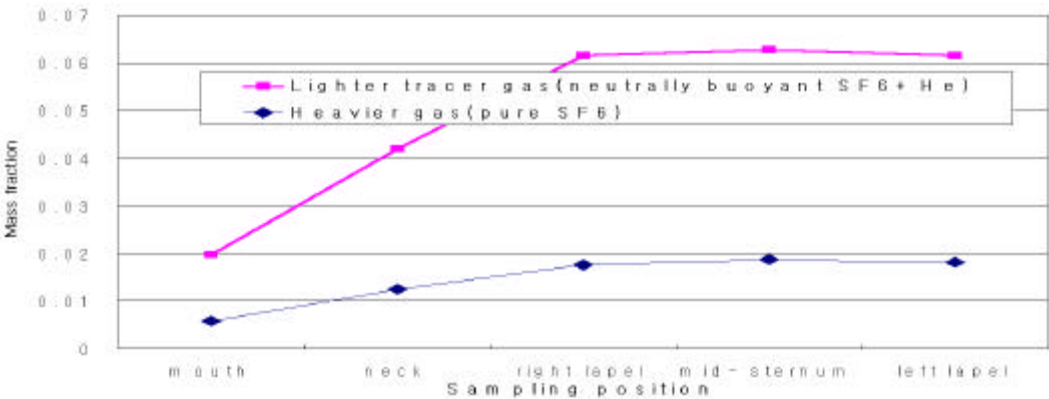


Figure 6. Comparison of the concentration of SF6 and SF6 + He

혼합가스( $\text{SF}_6+\text{He}$ )의 농도가 비중이 큰 순수한  $\text{SF}_6$ 의 농도보다 가슴과 어깨 부위에서 약 3배 정도 높게 나옴을 알 수 있다. 이는 순수한  $\text{SF}_6$ 는 공기보다 비중이 크므로 작업자의 가슴과 허리사이에서 발생하는 역기류에 동반 상승하지 못함으로써 호흡영역까지 많이 이동하지 못하기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다. 그리고 순수한  $\text{SF}_6$ 만을 분사했을 때 어깨 부위에서의 오염물질 농도가 호흡구(입)에서의 농도보다 약 2배 정도 높게 나왔고, 혼합가스 분사시에는 어깨 부위에서의 농도가 호흡구보다 약 3배 정도 높게 나옴을 알 수 있다. 따라서 작업환경 측정시 작업자 호흡영역에서의 농도를 측정하기 위한 샘플링을 어깨 부위에서 하는 것은 많은 오차를 가져올 수도 있다는 것을 짐작할 수 있다.

#### 4. 오염물질의 난류강도에 대한 영향

풍동(wind tunnel)내로 유입되는 기류의 난류강도(turbulence intensity)를 3, 20, 30%로 변화시키면서 오염물질  $\text{SF}_6$ 의 농도변화를 살펴보았다. 다양한 난류강도 범위에 따른 오염물질의 농도 변화는 Figure 7에 나타내었다.

난류강도에 따른 오염물질 농도는 큰 차이는 보이

지 않는 것을 알 수 있다. 주목할만한 것은, 가슴 부위에서의 농도가 거의 일치하고 있다는 것이다. 이렇게 가슴 부위에서 거의 차이가 나지 않는 것은 가슴 부위의 샘플링 지점이 다른 부위보다 상대적으로 오염원에 가깝고 역상승 기류 발생지역(wake region)의 경로에 바로 위치하고 있기 때문에 이러한 결과가 나오는 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 논문의 연구목적은 역상승 기류 발생지역(wake region)내 오염원의 위치에 따른 작업자의 노출수준과 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 적용 가능성을 검토하는데 있다. 작업자의 풍하지역 유동장은 매우 복잡하고 노출수준이 오염원의 위치에 크게 의존하게 된다. 이러한 유동장을 해석하기 위해 CFD를 이용하여 수치해석한 결과, 역상승 기류 발생 지역에서의 속도분포 예측치와 Kulmala(1995)의 수치해석치·실험치가 매우 잘 일치하였고,  $\text{SF}_6$ 를 분사하여 오염물질 농도를 예측한 결과와 Kulmala의 실험치·수치해석치가 잘 일치함을 알 수 있었다.

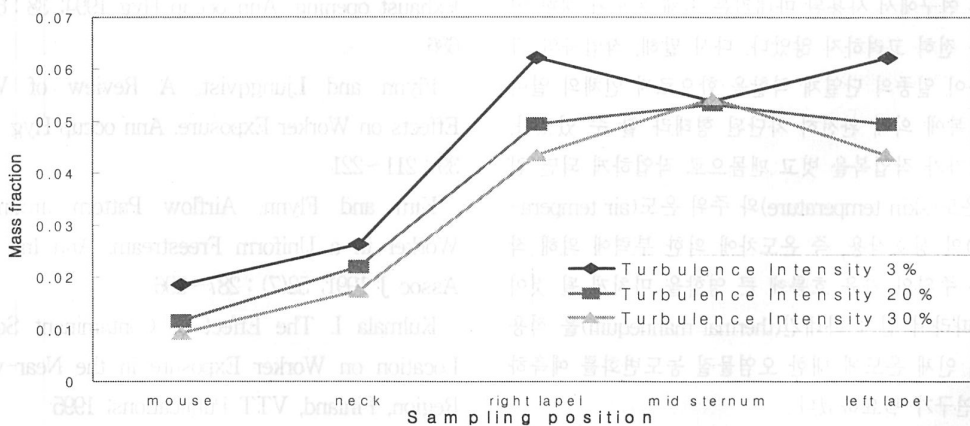


Figure 7. Comparison of the concentration according to the various range of turbulence intensity



CFD (hexahedron) (anthropometry) (tetrahedron) (unstructured grid)

가 ) 가 . SF6 He 가 가 SF6 가 3 , SF6 , 가 2 . SF6 He 가 , 3 . 가 : . ; 1997 , , . ; 1997 가 : . ; 1997 , 가 , , 가 . ; 1998

가 , Brohus H. Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms, Denmark, Aalborg University

CFD- ACE. Theory Manual, CFD Research corporation; 2000

Dunnett SJ. A Numerical Investigation into the Flow Field around a Worker Positioned by an Exhaust opening. Ann occup Hyg 1994; 38 : 663 686

Flynn and Ljungqvist. A Review of Wake Effects on Worker Exposure. Ann occup Hyg 1995; 39 : 211 221

Kim and Flynn. Airflow Pattern around a Worker in a Uniform Freestream. Ann Ind Hyg Assoc J 1991; 52(7) : 287 296

Kulmala I. The Effect of Contaminant Source Location on Worker Exposure in the Near-wake Region, Finland, VTT Publications; 1995

Kulmala I. Advanced Design of Local Ventilation Systems, Finland, VTT Publications; 1997

(structured grid)

## REFERENCES

- ; 1997
- ; 1997
- ; 1997
- ; 1998
- Brohus H. Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms, Denmark, Aalborg University
- CFD- ACE. Theory Manual, CFD Research corporation; 2000
- Dunnett SJ. A Numerical Investigation into the Flow Field around a Worker Positioned by an Exhaust opening. Ann occup Hyg 1994; 38 : 663 686
- Flynn and Ljungqvist. A Review of Wake Effects on Worker Exposure. Ann occup Hyg 1995; 39 : 211 221
- Kim and Flynn. Airflow Pattern around a Worker in a Uniform Freestream. Ann Ind Hyg Assoc J 1991; 52(7) : 287 296
- Kulmala I. The Effect of Contaminant Source Location on Worker Exposure in the Near-wake Region, Finland, VTT Publications; 1995
- Kulmala I. Advanced Design of Local Ventilation Systems, Finland, VTT Publications; 1997

Patankar SV. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp; 1980

Riffat SB and Gan G. CFD Prediction of k-factors of Duct Elbows, International Journal of Energy Research 1997; 21 : 675 681

Robinson M and Ingham DB. Recommendations for the Design of Push-pull Ventilation Systems

for Open Surface Tanks. Ann occup Hyg 1996; 40 : 693 704

Varley JO. The Effect of Turbulent Structures on Hood Design - A Review of CFD and Flow Visualization Studies, HVAC & R RESEARCH, vol. 3; 1997