

기체 유해물질 환기장치 설계를 위한 수치모사

A Numerical Study for the Design of Ventilation System for the gaseous Pollutants

엄 태 인*
Tae-In Ohm

ABSTRACT

A study is performed in order to design a effective ventilation equipment for the pollutants in workshop. The procedure has been used to calculate the flow in a confined rectangular space channel. A cross free stream is flowed from open space and jet stream including pollutants is injected from bottom area.

Calculation results shows a wake region which exists immediarely downstream of the jet discharge and are compared with the experimental data. Calculation data are in good agreement with experimental results. A wake plays an important role on a stagnation of the pollutants. Thus ventilation equipment has to be designed without a stagnation region which give rise to concentration stratification. In this study, calculation parameters are the position and velocity of pollutants and fresh air from cross free stream. It is concluded that more measurements of local velocities , temperatures and concentrations of the pollutants.

1. 서 론

산업현장에서 발생하는 유해물질에 의한 직업병 발생이 산업안전에서 중요한 과제로 대두된지 오래되었지만 이 분야에 대한 시설과 연구의 부족으로 인하여 현재까지 담보 상태에 있는 실정이다.

특히 유해물질이 발생하는 작업장이 소규모인 경우는 한층더 심각한 상태이다.

작업장에서 발생하는 기체 유해물질, 흙(fume), 악취, 분진 및 고열가스 등은 실내 환경을 악화시켜 근로자의 피로를 촉진시켜서 작업능률을 저하시키고 작업자의 건강을 저해하여 인력손실을 초래한다¹⁾. 또한 부식성 가스에 의해 정밀제품과 작

* 충남전문대학 산업안전과

업장내 시설물의 수명을 단축시키고 나아가 작업장 주위의 주민에게도 공해문제를 유발한다.

이런 문제를 해결하기 위해서는 환기장치가 반드시 필요하며, 이 환기장치의 중요한 역할은 외부의 신선한 공기를 공간내에 신속하고도 균일하게 분배될 수 있도록 하는 것이다. 또한 환기장치는 실내나 작업장의 사람이 통풍 공기의 유동을 감지할 정도로 혼합 속도가 강해서는 안된다. 이러한 사실은 상반되는 현상으로서 환기장치 설계의 어려움을 입증하고 있다.

현재까지 이 분야에 대한 국내의 연구는 활발히 진행되고 있지 않다. 환기장치 설계 제작 업체에서도 경험적인 설계 기준에 의해 제작하는 수준에 머무르고 있는 실정이므로 실제 필요한 용량보다 과잉 설계되어 에너지의 소비가 과다한 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 정량적인 실험과 가시화 방법에 의한 설계 인자 파악이 가장 중요하다. 그러나 현실적으로 유독한 물질에 의한 실험자의 위협과 실험 장비의 규모의 증대, 환기장치의 형태 및 유입구 변경의 난이성과 신뢰성 높은 측정 등 경제적 시간적 제약이 크다.

이러한 점을 감안하여 최근 대기 오염 물질의 집진장치 설계, 작업장내 공해물질 환기와 유해물질의 대기 확산에 컴퓨터를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾. 국외에서는 Nielsen³⁾, Holmberg et al.⁴⁾, Hjertager et al.⁵⁾, Sefcik⁶⁾ 등이 수치해석을 통하여 실내에서 등온 및 부력의 영향을 고려한 2차원 해석을 시도하였다. 특히 Hjertager et al. 팀의 연구 결과에 의하면 실험치와 상당히 잘 일치함을 알 수 있다.

그러나 환기장치에 대한 실험값의 부재와 이론적인 확산 메카니즘 규명이 부족하여 현재까지 널리 적용되지 못하고 있다⁷⁾. 그리고 흙(fume) 발생 작업장이나 석면 제조 공장 등에서는 오염물질이 단순한 기체 상태가 아니라 기체-액체 또는 기체-액체-고체 상태로 복잡한 양상을 이루고 있기 때문에 모델 개발에 어려움이 있다. 이들 난류 유동 지배방정식은 속도, 온도, 화학종 농도 등의 시간 평균값과 난류 변동값들의 함수로 표시되며, 이때 나타나는 난류 변동 상관항들은 난류에서 비선형 항에 의해서 발생하는 난류 모델의 대표적인 문제이다.

본 연구에서는 Fig. 1에 제시한 바와같이 4각형

터널에서 일정한 속도를 가진 기체 유해 물질이 분사샷트로부터 바닥에서 상부 공간내로 유입되며, 바닥 상부면에서는 낮은 속도의 자유 횡단유동이 존재할 때 유해 물질의 확산과정 분석에 3차원 수치해석 방법을 이용하고자 하였다. 향후 농도 및 온도 차이에 의한 부력항을 고려한 프로그램으로 발전시켜 국내 산업 현장내에서 유해물질이 발생하였을 때 효과적으로 배출할 수 있는 환기장치의 설계 및 환기방식에 대한 기초 설계자료로 사용하고자 한다.

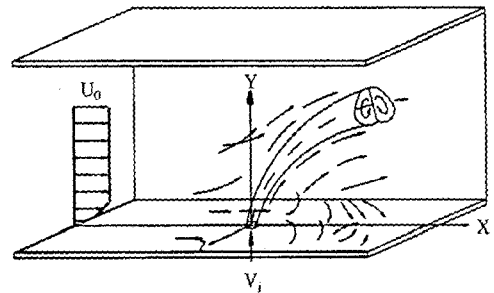


Fig. 1 Schematic diagram of the deflect jet system

2. 수치해석 모델 및 해법

3차원 x-y-z 좌표계에서 유해물질의 확산에 관한 기체의 운동을 기술하기 위해서는 운동방정식을 정상상태(steady state), 비압축성 유체, 뉴우튼 유체로 가정한다. 본 연구에서와같이 열적 부력항과 입자 유동은 무시하였을 경우 u, v, w 속도에 대한 지배방정식(Navier Stokes Equation)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{v} \bar{\phi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{w} \bar{\phi}) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial y} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} \right) + S_{\phi} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

위의 식에서 종속변수 $\bar{\phi}$ 는 속도성분 \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} 압력(\bar{p})과 단위질량당의 난류에너지(k) 및 이 에너지 소산율(ϵ)을 나타낸다. Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 $\bar{\phi}$ 에 대한 확산계수와 생성항이며 Table 1에 제시하였다. 이 표에서 G_k 는 난류에너지 생성을 나타내며, σ

Table 1 Expressions for the diffusion coefficients Γ_ϕ and source terms S_ϕ for a general dependent variable ϕ

Conservation of	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Mass	1	0	0
x-Direction Momentum	\bar{u}	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x})$
y-Direction Momentum	\bar{v}	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}) - 2\mu_{eff}(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \bar{v}) + \rho \bar{w}^2$
z-Direction Momentum	\bar{w}	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \bar{w}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff}(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + 2\bar{v})) + \mu_{eff}(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \bar{w}) - \rho \bar{w} \bar{v}$
Kinetic Energy	k	μ_{eff}/σ_k	$G_k - \rho \epsilon$
Dissipation Rate	ϵ	μ_{eff}/σ_k	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$

$$G_k = \mu_{eff} [2((\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \bar{v})^2 + (\frac{\partial \bar{v}}{\partial y})^2 + (\frac{\partial \bar{u}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y})^2 + (\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x})^2)]$$

는 난류 Prandtl수 또는 Schmidt수이다.

또한 μ_{eff} 는 유효 점성계수(effective turbulent viscosity)로서 역확점성계수 μ 와 난류점성계수 μ_t 의 합으로 표현된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \dots\dots\dots (2)$$

유동의 난류모델은 일반적인 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 위의 식(1)과 같이 표현된 2차 편미분 방정식의 해를 얻기 위해서는 검사체적에 기초한 유한차분법(control-volume based finite difference method)을 사용하여 선형 이산화 방정식을 유도하였다. 이산화 방정식은 line-by-line TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm) 방법을 사용하여 해를 구하였다.

본 연구에 사용된 격자계의 크기는 $20 \times 15 \times 15$ 이며 더 큰 격자계는 컴퓨터 계산시간의 제약 때문에 수행하지 못하였다. 격자점 사이의 임의의 합수값 보정은 Power-Law Scheme을 이용하였으며, 운동방정식에서 나타나는 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent)⁸⁾ 알고리즘을 사용하여 풀었다.

한편 프로그램에서 사용한 이산화방정식은 비선형 편미분방정식을 선형방정식으로 변환한 것이므로 반복 계산 과정에서 발산을 방지하고 수렴 성능을 극대화 하기 위한 이완화 인자(relaxation factor, λ)를 0.1-0.3 범위에서 사용하였다. 이러한 이완화 인자의 적절한 설정은 수렴 성능 및 계산의 안정성에 관계되며 특히 3차원 컴퓨터 프로그램인 본 논문에서는 매우 민감하게 작용한다.

Table 3 A summary of boundary conditions

	Upstream	Downstream	Symmetry	Jet exit	Walls
U	U_0	$\partial U/\partial x=0$	$\partial U/\partial z=0$	0	WF
V	0	$\partial V/\partial x=0$	$\partial V/\partial z=0$	V_j	WF
W	0	$\partial W/\partial x=0$	0	0	WF
k	$(2/3)u_0^2$	$\partial k/\partial x=0$	$\partial k/\partial z=0$	$(1/2)(v_j)$	WF
ϵ	$k^{3/2}/(0.16R)$	$\partial \epsilon/\partial x=0$	$\partial \epsilon/\partial z=0$	$k^{3/2}/(0.5D)$	$(C_\mu)^{3/4} k^{3/2}/(l_{ky})$

WF : Wall Function
NC : Neumann Condition

완전히 수렴할 때까지의 반복 계산횟수 2000번이다.

$$\phi = \lambda \phi_{new} + (1 - \lambda) \phi_{old} \dots\dots\dots (3)$$

본 연구에서 수치계산을 위한 경계조건은 Table 3에 제시하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 Fig. 2에 제시한 밀폐된 3차원 공간에서 공해물질의 배출을 위한 환기장치의 최적 설계를 위한 기초 연구로서 3차원 난류 유동장 해석에 중점을 두었다. 고려한 계산영역은 Fig. 1에 제시한 바와같이 전체의 크기를 유해가스가 유입되는 입구 지름으로 무차원화하여 표시하였으며, 자유유동의 방향인 x축으로는 50, 유해물질 주입 방향인 y축으로는 10이고 공간의 폭인 z축으로는 10에서 수치해석을 수행하였다.

자유 횡단유동의 입구 속도를 9.5m/s로 하고, 분사젯트의 속도는 자유 횡단유동의 2배와 4배인 경우에 대하여 검토하였다.

Fig. 3은 본 컴퓨터 프로그램의 평가를 위하여 Chang⁹⁾이 발표한 연구에서 수행한 실험값과 수치 해석의 결과를 비교한 것으로서, 입구 자유 횡단

유동의 평균속도는 U_0 이고, 분사젯트(V_j)와 횡단 유동의 속도비(V_j/U_0)는 R이며 수치해석에서 사용한 격자계의 크기는 $20 \times 15 \times 15$ 이다.

Table 2 Constants of turbulent model⁹⁾

C_1	C_2	C_μ	σ_ϵ	σ_k
1.44	1.92	0.09	1.22	0.90

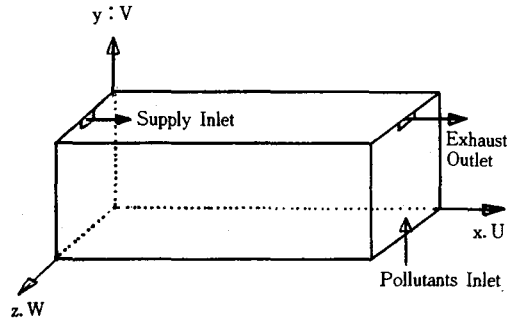


Fig. 2 Schematic of room geometry and notation

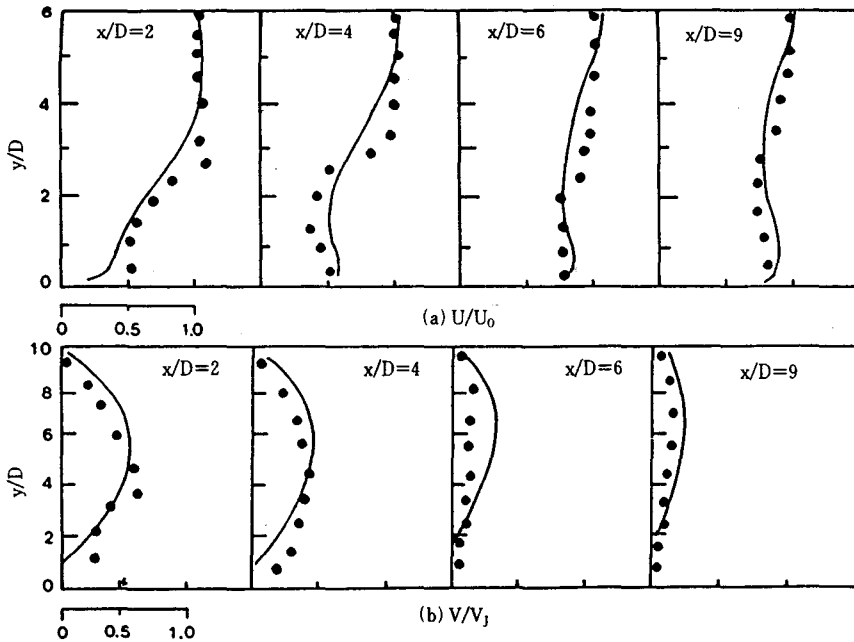


Fig. 3 Comparison of mean velocities between prediction and measurements in x-y Plane : Measurement, : Prediction

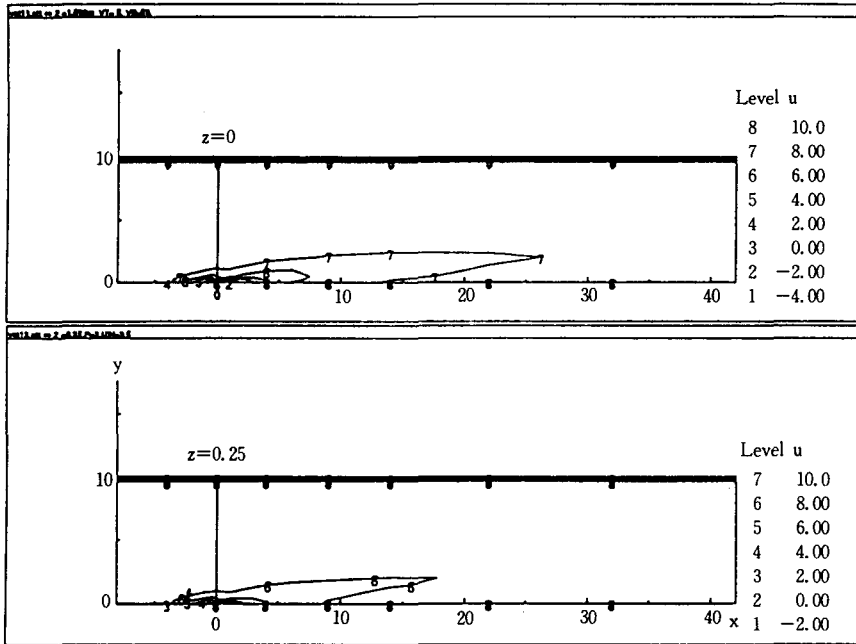


Fig. 4 x-y plane axial velocity(u) contour plots for R=2, at z=0, 0.25

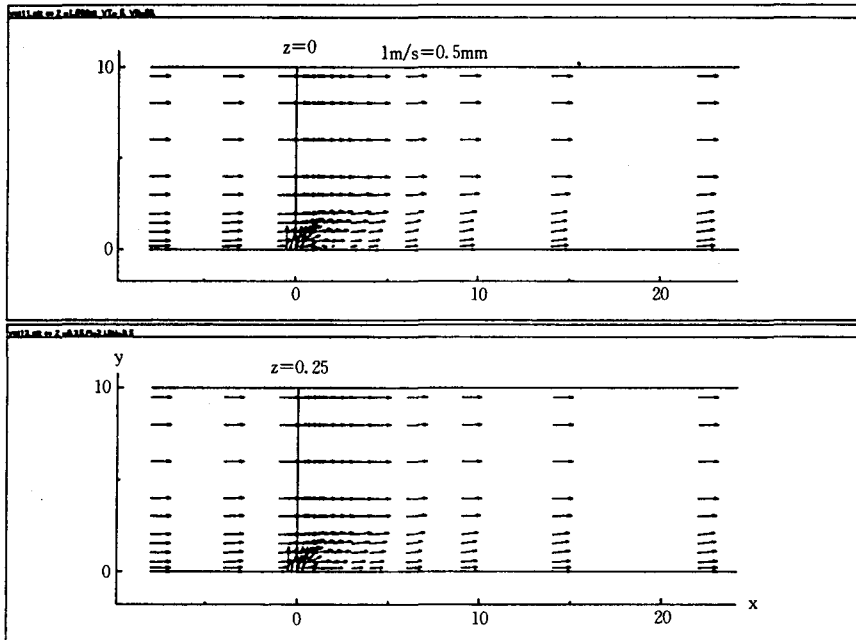


Fig. 5 x-y plane u-v vector plots for R=2, at z=0, 0.25

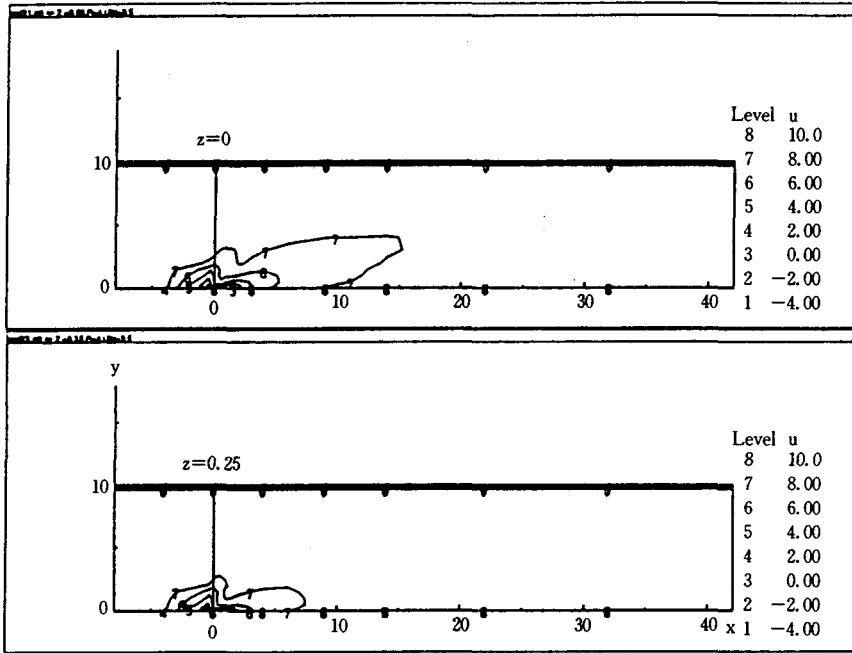


Fig. 6 x-y plane axial velocity(u) contour plots for R=4, at z=0, 0.25

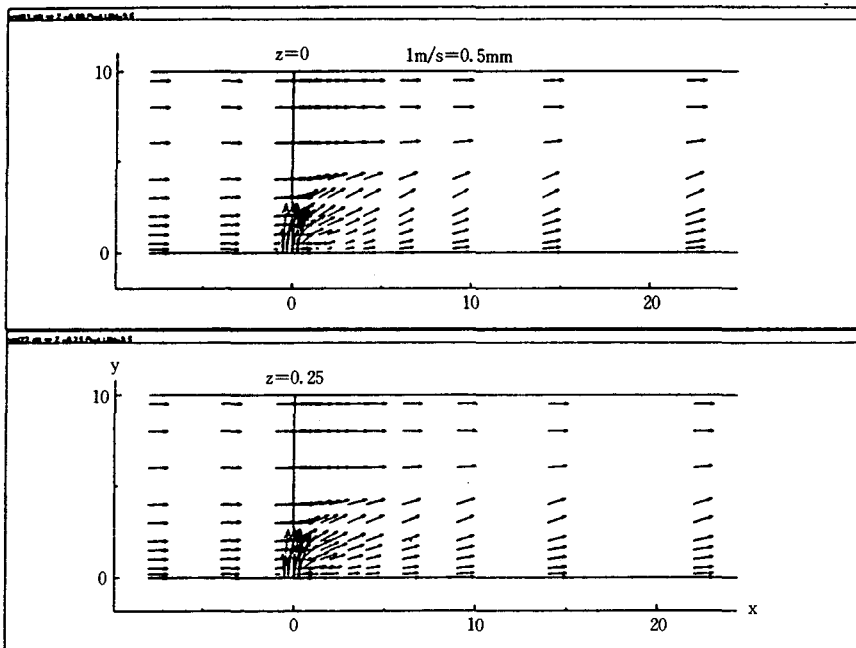


Fig. 7 x-y plane u-v vector plots for R=4, at z=0, 0.25

이 그림에서 분사젯트와 입구 횡단 유동의 속도 비 즉, $R=2$ 이고 $z=0$ 인 x - y 평면에서 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용한 실험값과 3차원 난류 유동장 수치해석 결과이다. 상부 그림은 분사젯트 노즐의 직경인 D 로 무차원화한 횡단 유동 방향으로 $x/D=2, 4, 6, 9$ 인 위치에서 x 방향 평균속도 U 와 입구 횡단 유동의 평균속도 U_0 의 비로 속도분포를 수직 높이, y/D 의 변화에 따라 나타내었다.

또한 아래 그림은 y 방향의 속도분포를 수직방향의 평균속도 V 와 분사젯트의 속도 V_j 의 비로서 y 방향의 높이에 따라 제시하였다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 x - y 평면의 x -방향 등속도선을 나타내고 있다. 이 그림에서 상부 그림은 x - y 평면의 중심축($z=0$)에서의 u -속도의 등속도선이고 하부 그림은 $z=0.25$ 인 위치의 등속도선이다. 이 그림에서 보면 $x=0$ 인 분사젯트 하류에서 약한 후류가 발생함을 관찰할 수 있다. Fig. 5는 동일한 평면에서 u - v 속도 벡터를 보여주고 있다.

Fig. 6은 분사젯트와 입구 횡단 유동의 속도비를 두배로 증가한 경우 즉, $R=4$ 인 경우의 축방향 속도(u)의 등속도선이고, Fig. 7은 $R=4$ 일때 u - v 속도 벡터를 나타내고 있다.

$R=2, R=4$ 일때 분사젯트의 Reynolds수는 각각 $1.5 \times 10^4, 3.0 \times 10^4$ 이다. 이들 그림에서 분사젯트 노즐 인접 하류와 하부 평면 사이에서 후류(wake)가 발생함을 발견할 수 있으며 LDV를 이용한 실험값과 수치해석 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 산업현장에서 발생하는 기체 유해물질 배출을 위한 환기장치 설계에 필요한 기초 연구로서, 4각형 터널의 입구에서 자유 횡단 유동이 유입되고 바닥 아래에서는 기체 유해물질이 주입되는 분사젯트가 존재할 때 이 분사젯트의 유동에 대하여 관찰하였다.

분사젯트 속도와 자유 횡단 유동 속도의 비를 변화시키며 공간내의 유동을 계산한 결과 분사젯트 입구 인접 하류와 하부 바닥면 사이에 후류(wake)가 발생함을 발견할 수 있으며, 이는 Chang⁹⁾이

LDV를 이용한 실험값과 비교적 잘 일치하고 있다. 이 후류는 유해물질을 공간내에 정체시키므로 이 현상이 발생하지 않도록 환기장치를 설계하여야 한다. 본 연구에서는 환기장치 설계인자로서 오염 물질의 발생 위치와 속도뿐만 아니라 신선한 공기의 주입구 위치와 속도비 등이 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

이들 수치해석한 결과를 이용하여 향후 Fig. 2에 제시한 밀폐된 공간내에서 유해물질이 발생할 때 신선한 공기의 주입위치 선정 및 유속 결정에 참고하고자 한다.

참 고 문 헌

- 1) 박범수, "대기오염 방지기술", 형설출판사, pp. 525-637, 1992
- 2) 이선경, 송은영, 장동순, "고-기상 유해물질 대기 확산에 관한 수치해석", 한국산업안전학회지, Vol. 9, No. 1, 1994. 3
- 3) P. Nielsen, "Predictions of Air Distribution in a Forced Ventilated Room", Inteniorens Ugeblad No. 5, 1973
- 4) R. Holmberg, M. Larsson and S. G. Sundkvist, "Calculation of Velocity Distribution in a ventilated Room", VVS, No. 5, pp. 59-66, 1975
- 5) B. H. Hjertager and B. F. Magnussen, "Numerical Prediction of Three-Dimensional Turbulent Buoyant Flow in a ventilated Room", Hemisphere Publishing Corporation, pp. 429-441, 1976
- 6) D. M. Sefcik, B. W. Webb and H. S. Heaton, "Analysis of Natural Convection in Vertically-Vented Enclosures", International Heat Mass Transfer, Vol. 34, No. 12, pp. 3037-3043, 1991
- 7) Park, Hwa Choon, "Munerical Analysis of Scalar Dispersion in a Turbulent Boundary Layer", Ph. D., Dept. of Mechanical Eng. KAIST, 1992
- 8) 엄태인, "로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 3차원 난류반응 컴퓨터 프로그램 개발", 인하대학교 박사학위 논문, 1993

엄태인

- 9) K. S. Chang, "An Experimental and Computational Investigation of Turbulent Jet Impingement in a Confined Cross Flow", Louisiana State Univ. Ph.D. Dissertation, 1989
 - 10) EPA, Guidline on Air Quality Models (revised)", U.S. Environmental protection Agency, EPA-450/2-78-027R, 1986
 - 11) Taylor, G. I., "Diffusion by continuous movements", Proc. London. Math. Soc., Vol. 20, pp. 196-212, 1920
 - 12) 장동순, 엄태인, "질소산화물 생성 저감을 위한 산업용 미분탄 연소로 수치모사", 대한 환경학회지, Vol. 16, No. 5, 1994
-