

장애물의 영향에 의한 3차원 실내공간의 난류유동 및 오염물질 거동의 수치해석

정 효 민*

A Numerical Analysis of Turbulent Flow Field and Contamination Behavior in a Three Dimensional Room with Obstacle

H. M. Jeong

Key words : Numerical analysis(수치해석), Turbulent flow field(난류유동장), Contamination concentration(오염농도)

Abstract

Flow characteristics and contamination behavior in a three - dimensional room with the desk - type obstacle have been investigated numerically by the $k - \epsilon$ two equation turbulence model. The room model has one supply opening on the ceiling and two exhaust openings on the side walls. Thirty six sets of calculation have been performed for twelve contamination sources of $1 \times 10^{-4} \text{kg}_c / (\text{m}^3 \cdot \text{s})$ strength at different inlet velocities(0.1, 1, 10m/s). This study can conclude that the source points of contaminant are located near the obstacle edge of Z - axis, at which the maximum contaminant diffusion fields are occurred.

기호설명

C : 오염물질의 평균농도(kg_c / m^3)
 S_o : 오염물질의 발생량($\text{kg}_c / (\text{m}^3 \cdot \text{s})$)
 U_i : 시간평균속도
 U_{in} : 유입속도
 u_i : 변동속도
 X_i : 좌표
 ρ : 공기밀도(kg / m^3)

μ : 점성계수
 μ_t : 와 점성계수
 δ_{ij} : Kronecker Delta
 k : 난류 에너지
 ϵ : 난류에너지 소산율
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_c, C_1, C_2$: 모델정수

첨 자

i, j : 직교좌표계의 방향($i, j = 1 \sim 3$)

* 경상대학교 선박기계공학과

1. 서 론

환경오염 문제가 과거 어느때 보다 그 중요성이 급격히 대두되고 있으며, 특히 실내공간에 대한 오염물질 발생에 대한 적절한 조치는 작업환경의 쾌적성, 제품의 품질 향상등에 많은 영향을 미치고 있는 것이 사실이다. 특히, 공기중의 오염물질 영향의 최소화가 필수적인 클린룸은 현대의 최첨단 기술을 위해서는 반드시 필요한 환경이 되고 있다. 즉, 클린룸내에서 발생한 분진등의 오염물질이 잘 이동, 확산되기 위한 실내 기류 분포의 고도적인 설계 등의 문제가 중요한 과제로 남아 있다. 실제의 클린룸의 실내 기류제어를 계획할 경우 실내에 설치되고 있는 생산 설비 장치등의 기류 장애물이 유동장 및 오염물질의 확산장등에 미치는 영향을 고려하여 설계, 제작할 필요가 있다. 이러한 실내 기류 제어를 위한 기본 설계시에는 실내의 각 공간에 대한 실험치가 부가되어야 한다. 그러나, 실험치에 의존하는 것은 상당한 시간적 경제적 부담이 따르며 이에 대한 대책이 강구되어야 한다. 최근에는 계산기의 급속한 성장에 힘입어 계산시간 및 기억용량의 비약적인 발전으로 복잡한 형상을 갖는 실내유동의 해석도 가능하게 되었다.

2차원의 경우, 오명도⁽¹⁾, 심우섭⁽²⁾등의 비정상적 오염물질 입자의 거동에 관한 연구와 이재현⁽³⁾에 의한 작업대의 위치변화에 따른 유동특성에 관하여 보고하였다.

그러나, 2차원에 대한 해석만으로는 충분한 기초자료로 활용되지 못하는 것이 현실이며 보다 실제적인 문제의 적용을 위하여서는 3차원적인 해석이 강력히 요구되고 있다. 이에 대해 3차원 실내의 환기를 주목적으로한 Murakaki^(4,5)에 의한 일련의 연구에서 최적의 환기 조건을 제안하였고, 실내에 블럭 형태의 작업대가 실내 바닥면에 존재할 경우에 대한 오염전파형태에 관하여 보고⁽⁶⁾하였다. 그러나, 고도의 청정성을 요구하는 클린룸에서는 작업대의 작은 형상 변화에도 전체의 실내 유동장에는 많은 변화가 있을 것이 예견된다.

그래서, 본 연구에서는 실내공간에 설치되는 작업대의 형태로서 책상형을 가정하여 공간내의 일정 위치에 존재하였을 경우에 대한 제반적인 유동

장과 오염물질의 확산 형태를 조사한다. 즉, 공간 천정의 중앙부에서 신선한 공기가 유입하여 양쪽 벽면의 하부에서 유출되는 3차원의 실내모델에 대하여 난류 유동해석을 하고, 작업대 위에서 발생한 오염물질의 확산형상 및 농도분포에 관하여 수치계산하므로써 최적의 환경 지표를 마련하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 실내공간 모델

Fig. 1에 본계산에서 사용한 3차원 실내공간의 모델을 나타낸다. 실내공간의($X \times Y \times Z = 2.75 \times 3.5 \times 5.0m$)의 중앙부의 천정에 공기가 유입하여 양 측면 하부의 벽에서 유출하며, 실내에는 바닥으로부터 0.875m 높이에 작업대의 역할을 가정한 책상형의 장애물이 설치되어 있다. 이 장애물의 크기는 $X \times Y \times Z = 0.125 \times 1.5 \times 3.0m$ 이며, 이 장애물 위에 일정농도의 오염물질이 배출되고 있다고 가정하였다. 또한, 오염물질의 발생위치는 Fig. 1의 우측 그림의 12점의 위치($X = 0.875m$)를 가정하여 각각 조사하였다.

2.2 지배방정식

실내공간에 대한 유동은 정상상태이며 비압축성을 가정한 3차원 난류유동이며 이에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial X_j} = \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} [\mu (\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i})] - \frac{\partial}{\partial X_j} [\rho \bar{u}_i \bar{u}_j] \tag{2}$$

2.3 난류모델의 선정

난류 유동장에서는 시간평균속도가 벽 근처에 있어서는 큰 기울기를 가진다. 난류계산을 할 경우 이러한 벽 근처의 점성저층까지 포함하여 벽면까지의 상세한 계산하기 위하여 제안된 저 레이놀즈

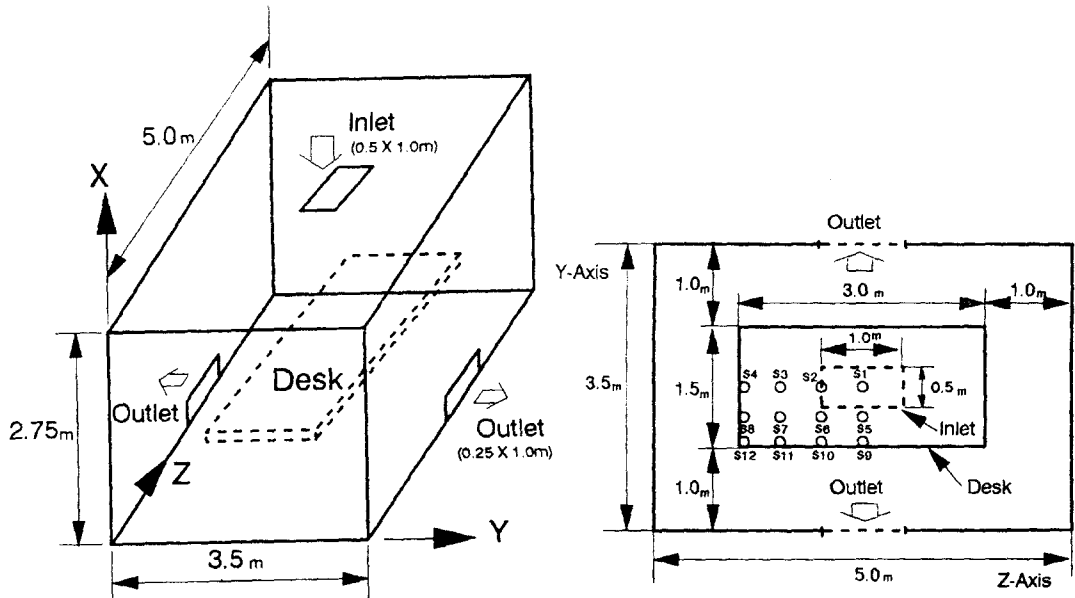


Fig. 1 The geometry considered and location of source point.

수 모델이 있다. 이 저 레이놀즈 수 모델에는 여러 연구자에 의하여 서로 다른 모델정수가 제안되고 있지만 대표적인 것으로서 Launder⁽⁷⁾⁽⁸⁾, Rodi⁽⁹⁾ 등에 의한 모델이 폭넓게 사용되고 있다. 이 저 레이놀즈 수 모델은 벽면의 경계조건으로서 $U_i = k = \epsilon = 0$ 을 대입하므로 형상이 복잡한 계산의 경우는 아주 편리한 수단으로 생각되어 질 수도 있으나 벽면 근처의 차분간격이 $y^+ (\frac{U_i Y_p}{\nu}) = 1$ 의 크기가 되도록 좁은 격자간격을 설정하지 않으면 타당한 계산치를 얻을 수 없는⁽¹⁰⁾ 큰 단점도 지니고 있다. 여기서 U_i 는 벽면마찰속도, ν 는 동점성계수, Y_p 는 벽면으로부터 첫번째 격자점까지의 거리를 나타낸다.

벽면 근처의 점성저층의 상부에서는 점성의 효과가 거의 무시될 수 있고 난류혼합이 지배적이기 때문에 잘 알려진 벽 법칙 즉, 대수속도 분포가 성립한다. 그래서, 본 연구에서는 벽면의 효과를 충분히 고려할 수 있는 벽 법칙을 이용하여 벽에서 가장 가까운 격자점에 대하여 벽함수⁽¹¹⁾⁽¹²⁾를 적용시켜 계산을 행한다. 난류모델로서는 공학적으로 그 가치가 인정되어 폭넓게 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다.

위 식의 운동량 방정식에서 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈

응력으로서 평균속도 기울기의 함수로 가정한다. 즉, Boussinesq의 와점성의 가정을 채택하여, 다음과 같이 레이놀즈 응력을 모델링한다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서, 대문자 U 는 평균속도, 소문자 u 는 변동속도 성분을 나타낸다. 또한, μ_t 는 와점성계수로서 층류의 점성계수와는 달리 물성치가 아니며 오히려 난류의 구조에 의존하는 양으로서 다음식과 같이 모델링한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

이 와점성계수는 다음식 2개의 $k-\epsilon$ 수송 방정식으로부터 구해진다.

난류에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G - \rho \epsilon \quad (5)$$

난류에너지 소산 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right]$$

$$+ C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서 난류생성항 G 는 다음과 같다.

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (7)$$

이상에서 난류의 유동장이 구해지면 다음식의 농도 방정식을 이용하여 오염물질에 대한 이동 확산을 계산할 수 있다. 즉,

농도 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j C)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_c} + \mu \right) \frac{\partial C}{\partial X_j} \right] + \rho S_o \quad (8)$$

여기서, S_o 는 계산 영역에서의 오염물질의 발생량을 나타낸다. 본 계산에서의 오염원의 강도는 $0.0001(kg_c/(m^3 \cdot s))$ 으로 하였으며, 오염원의 크기는 하나의 격자점(한 격자의 길이 = 0.125m)에서 항상 배출되고 있다고 가정하였다.

또한, 각 방정식에서 사용된 모델정수는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_c = 1.3 \quad \sigma_k = 1.0 \\ C_\mu = 0.09 \quad \sigma_\epsilon = 1.0 \quad (9)$$

2.4 경계조건 및 수치계산법

위의 지배방정식을 풀기 위하여 사용된 경계조건은 다음과 같다.

(1) 입구

$$U_n = U_{in}, U_t = 0 \\ k_{in} = 0.03 U_{in}^2 \\ \epsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / 0.005L \quad (10)$$

여기서, 첨자 t, n, in 은 입구면에 대하여 각각 접선방향, 법선방향 및 유입구를 나타내며, L 은 실내 공간의 가로 방향의 길이를 나타낸다.

(2) 출구

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0, \frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

(3) 실내벽면 및 장애물 벽면

$$U_n = 0 \\ k = \frac{U_\tau^2}{C_\mu^{1/2}} \\ \epsilon = \frac{K^{3/2} C_\mu^{3/4}}{\chi Y_p} \quad (12)$$

단, χ 는 Karman정수(0.42)이며, 벽면에 평행한 속도성분은 벽함수를 적용시켜 구하였다. 이상에서 주어진 방정식으로부터 농도 및 유동장을 계산하기 위하여 계산영역을 $24 \times 30 \times 42$ 의 엇갈린 격자계(Staggered Grid)로 하여 유한체적법(Finite Volume Method)을 채택하였으며, 대류항은 Hybrid Scheme을 사용하였고, 압력항은 SIMPLE¹³⁾ 알고리즘으로 처리하였다. 또한, 이산화된 방정식은 선순법(Line by Line Method)으로 반복계산을 하였고, 반복 계산중 해의 발산을 막고 수렴성을 향상시키기 위하여 하향이완(Under-Relaxation)계수를 사용하였고 그 계수는 속도의 경우 0.1, 압력은 0.2, 기타 난류항은 0.4로 하여 계산하였다. 또한 농도장의 해석에는 상기방법으로 이미 구한 속도장을 초기조건으로 하여 계산하였다. 난류 유동장 계산에서의 초기조건은 총류로 가정한 계산결과를 이용하였다. 이때의 해의 수렴성의 판정에 관해서는 입구의 운동량 및 유량으로 무차원화 한 각 방향의 운동량 방정식 및 연속의 식의 오차가 1% 미만일 때를 수렴 기준 조건으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유동장 특성

본 연구에서는 유입속도의 크기 변화에 대한 실내 유동장의 현상을 조사하기 위하여 유입속도의 크기를 $U_{in} = 0.1, 1, 10m/s$ 의 3종류로 하여 해석하였다.

Fig. 2에는 X축, Y축 공간 길이의 중심선상을 대표로 하여 Z축에 따른 속도크기를 표시한 것이다. 그림의 종축의 무차원 속도 U 는 3종류의 유입속도를 각각 기준으로 하여 무차원화 시킨 것이다. 즉, 장애물을 설치하지 않는 경우(without desk)는 유입속도의 크기가 변화하여도 거의 유사한 내부 유

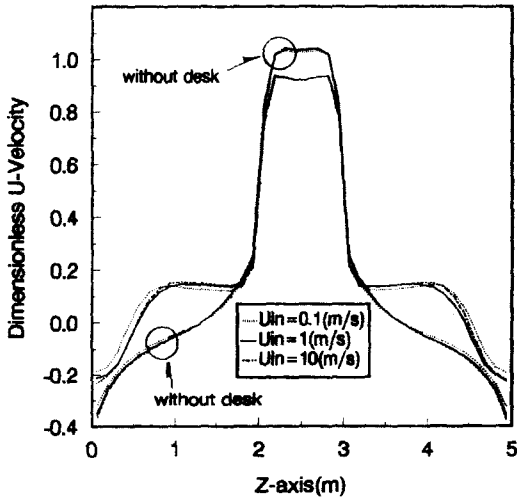


Fig. 2 Dimensionless U-velocity profile.

동 형태를 나타내었다. 장애물이 설치된 경우는 장애물이 끝나는 부분($Z=0\sim 1m, 4\sim 5m$)에서 비교적 각각의 속도 크기에 따라 유동 패턴에는 약간의

차이가 있는 것을 제외하고는 장애물의 유무에 관계없이 전체적으로 유사한 내부 유동 형태를 나타내었다. 또한, 다른 단면에서의 속도도 마찬가지로 거의 동등한 유동 패턴을 보였다.

그래서 다음의 속도 벡터에 대한 그림에서는 유입속도를 $1m/s$ 로 한정하여 나타내었다. Fig. 3, 4, 5에는 각각 XY, XZ, YZ평면에 대한 속도 벡터를 표시하였다. 각 그림의 좌측은 장애물이 존재하였을 경우, 우측 그림은 장애물이 없는 경우에 대하여 나타낸 것이며, 그림상의 속도 크기는 Fig. 3의 $Z=2.5m$ 단면의 상부 유입구측의 속도 벡터가 $1m/s$ 임을 나타낸다.

(1) X-Y 평면의 유동장

Fig. 3은 X-Y평면의 속도벡터(U, V속도)를 나타낸다. 장애물이 없는 경우는 중심부에서 유입된 유체가 공간 바닥면에 부딪혀 벽면상에서는 벽면을 따라서 상승하는 기류가 형성되는 비교적 단순한 유동패턴을 보인다. 그러나, 장애물이 존재함에

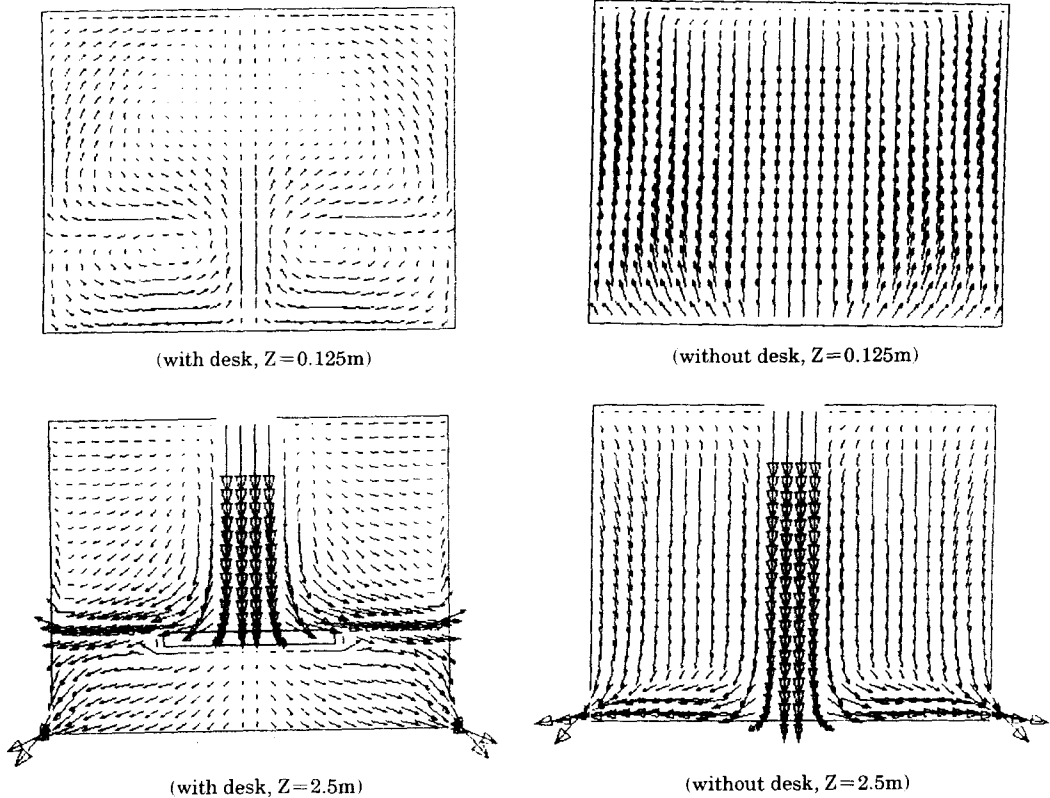


Fig. 3 Velocity vectors in X-Y plane.

따라 중심부에서는 일부의 공기유동이 상부 공간과 하부 유출구도 양분되는 현상이 나타난다. 장애물의 끝 단면에서는 장애물을 기준으로 상부와 하부의 유동 패턴이 2차 흐름(Secondary Flow)의 형태로 재순환 영역을 구성한다. 이러한 형태는 벽면에서도 강력히 존재하여, 장애물이 공간내 전체에 큰 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

(2) X-Z 평면의 유동장

다음의 Fig. 4는 X-Z 평면의 속도 벡터(U, W 속도)를 나타낸다. 장애물이 없는 경우는 중심부에서 좌우 양측면에 큰 재순환 영역이 발달되며, 측면벽으로 갈수록 재순환 영역의 중심이 공간내의 중앙부로 이동되어 측면벽에서는 중심부에 존재하는 유출구에서 큰 속도로 배출되며 평면의 양측에는 약 45° 경사진 재순환 영역이 발달한다. 그러나, 장애물에 존재하게 되면 공간의 중심부에서는 장애물 상부에 좌우대칭의 재순환 영역이 존재하여 그 하부에서는 장애물 상부로 이동하려는 유속성분이 존재하게 된다. 측면벽에서는 장애물 위치를

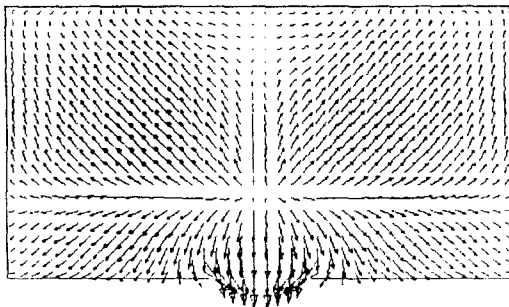
기준으로 상부 및 하부에는 각각 상승기류 및 하강기류로서 양분되는 특이한 유동 패턴을 보인다.

이상에서와 같이 책상형의 장애물이 실내 유동장에 설치됨에 의한 유동패턴은 장애물이 없는 경우에 비해 상당히 복잡하며, 장애물을 기준으로 상하부면의 유동이 분리되는 현상을 나타낸다.

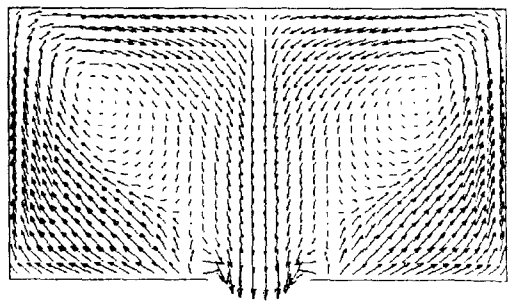
(3) Y-Z 평면의 유동장

다음의 Fig. 5는 Y-Z 평면의 속도(V, W 속도) 벡터를 나타낸다. 장애물이 존재하지 않는 경우, 상부벽면에서는 중심 유입구측을 향하여 공기유동이 집중하며, 실내 바닥면에서는 천정면과 역 방향으로 유출구 및 방사형상으로 확산되는 현상을 보여주고 있다.

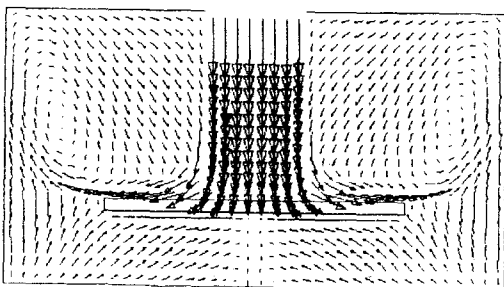
그러나 장애물이 존재함에 따라서는 비교적 작은 유속이 천정면을 지배하지만 공간내의 하부면에서는 유출구 근방만이 비교적 큰 속도를 가지고 유출되는 반면 내부의 대부분 영역에서는 오히려 중심면을 향하는 유체 유동현상이 공존하는 현상을 보였다. 또한, 이 Y-Z 평면에서의 유동은 거의



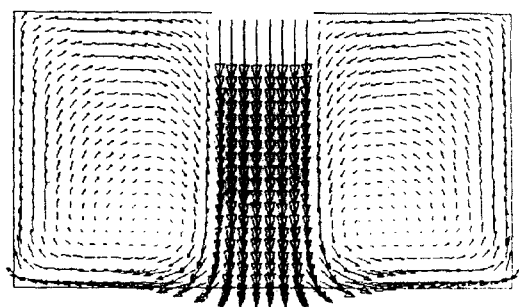
(with desk, Z=0.125m)



(without desk, Z=0.125m)



(with desk, Z=1.75m)



(without desk, Z=1.75m)

Fig. 4 Velocity vectors in X-Z plane.

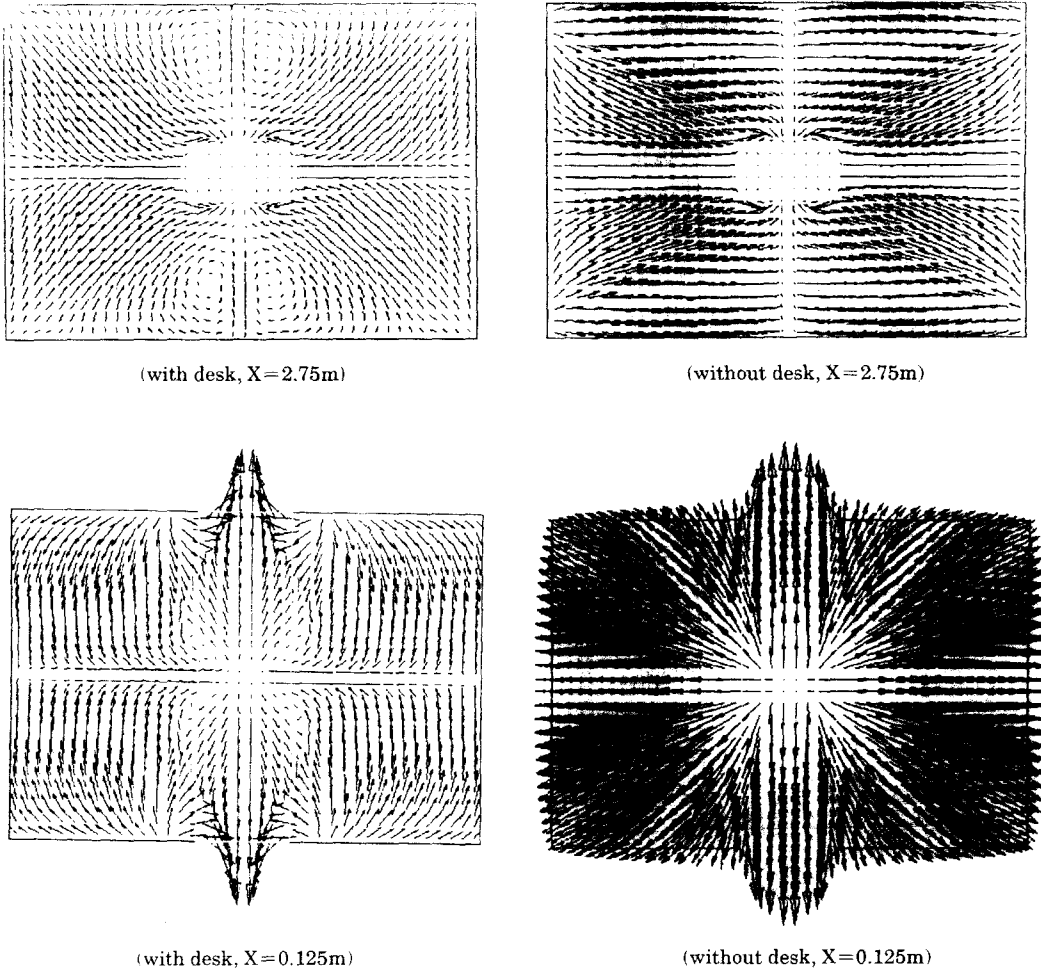


Fig. 5 Velocity vectors in Y-Z plane.

십자형태로 기류가 분할되는 특성을 보이고 있고, 이러한 기류특성은 후술하는 오염물질에 의한 오염형상이 실내공간 전영역이 걸쳐서 확산되지 못하고 한쪽면에 집중적으로 오염농도가 높아지는 것과 관련된다. 오염물질에 의한 공간내의 농도 분포를 조사하기 위하여 Fig. 1의 S_1 , S_4 , S_{12} 의 위치에서 각각 오염발생이 생겼다고 가정하여 이 3가지의 농도 분포형태와 장애물이 없는 경우에서의 S_1 점을 오염 발생점으로 한 경우에 한정하여 조사한다.

3.2 오염 물질에 의한 실내 농도 분포

(1) 장애물이 없을 경우의 오염농도분포

Fig. 6~Fig. 10은 $U_{in}=1m/s$ 에 대하여 장애물이 없는 경우에 대한 오염 물질의 농도분포를 나타낸다.오염물질의 발생위치는 Fig. 1의 Y-Z평면의 중앙점 $S_1(X=0.875m$ 의 높이)으로 가정하였다. 우선 Fig. 6은 오염물질 발생위치를 기준으로 한 X-Y평면상의 오염 농도를 나타내며, 그림의 종축의 수치는 유차원의 오염농도를 나타내고 있다. 즉, XY평면상에서는 Y축 전면에 걸쳐서 큰 오염농도를 보이지만 X-Z 평면상에서는 Z좌표측으로는 오염물질 확산이 저지되도 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3과 같이 양측면 하부에 유출구가 존재함에 의해 오염물질이 곧바로 배기구로 향하여 배출되기 때문이다.

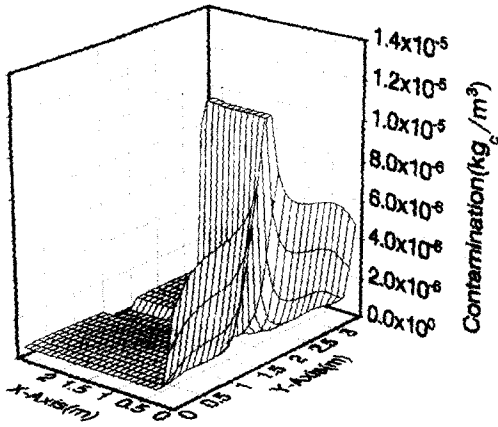


Fig. 6 Contamination concentration in X - Y plane. (Z=2.5m, without desk)

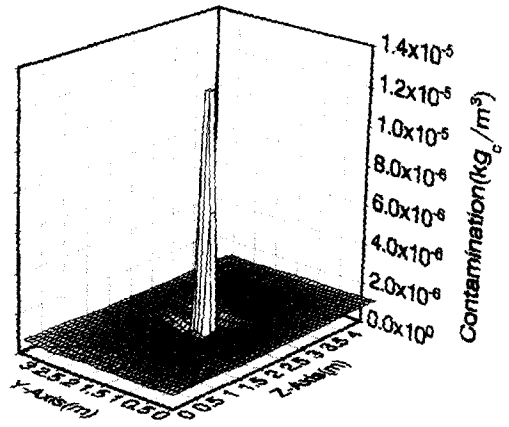


Fig. 9 Contamination concentration in Y - Z plane. (X=0.875m, without desk)

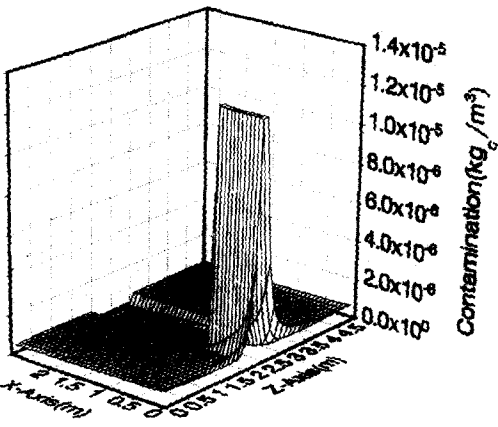


Fig. 7 Contamination concentration in X - Z plane. (Y=1.75m, without desk)

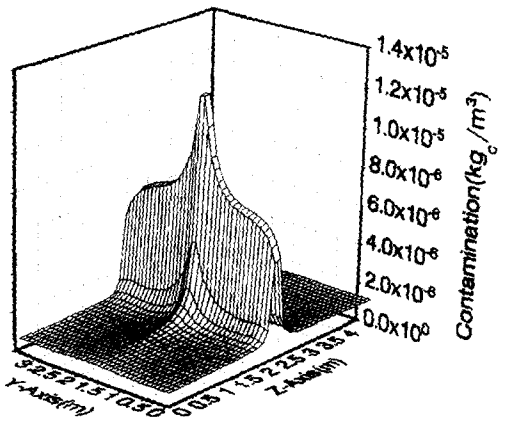


Fig. 10 Contamination concentration in Y - Z plane. (X=0.125m, without desk)

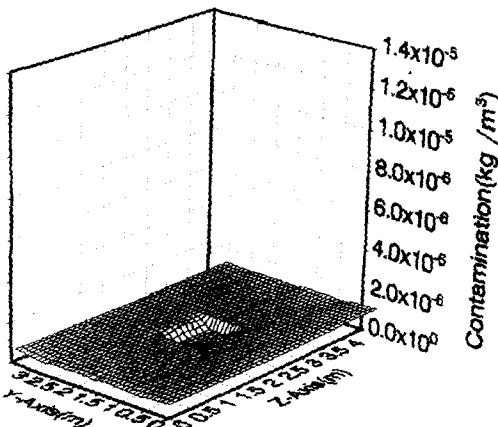


Fig. 8 Contamination concentration in Y - Z plane. (X=2.75m, without desk)

다음의 Fig. 8, 9 그리고 10은 각각 천정부근, 중간부(오염물질 발생위치 X=0.875m) 및 하부 바닥면에서의 오염물질 농도분포를 나타낸다. 즉 Fig. 8의 중앙부근에서는 오염농도가 직사각형 공간이 생긴다. 이 부분은 공간내의 유입구로써 항상 신선한 공기가 유입함에 의한 것이다. 이러한 상태가 Fig. 9의 위치에 오면 정중앙부의 오염 발생 위치에서는 극대치의 농도 분포와 그 주변에는 오염 농도가 상대적으로 작은 영역이 생긴다. 이것은 유입류의 영향으로 Y-Z 평면상에서의 확산은 거의 이루어지지 않음을 나타낸다. 그러나 하부 바닥면에 와서는(Fig. 10) Z=2.5m부근을 중심으로 오염물질

이 큰 값으로 배출구를 향하여 분포함을 나타내고 있다. 즉 Z축을기준으로 양 끝면에서는 거의 오염물질의 영향이 미치지 않음을 의미하고 있다.

(2) 장애물이 존재 할 경우의 오염농도분포

Fig. 11~Fig. 17은 오염 발생원이 S_1, S_4, S_{12} 에 존재할 경우의 오염농도 분포이며, 다음의 무차원식에 의한 값을 종축으로 표시하였다.

$$\frac{\text{각 공간 내의 오염 농도}}{\text{실내 평균 오염 농도}(S_1)} \quad (13)$$

위 식의 분모는 장애물이 없는 경우의 S_1 점을 오염원으로 할때 실내 평균 오염 농도 이며 구체적인

값은 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 11~Fig. 13은 장애물 있는 경우, Fig. 1의 S_1 점에 오염발생원이 존재하였을때, S_1 점을 기준으로 X-Y평면(Fig. 11), X-Z평면(Fig. 12) 및 Y-Z평면(Fig. 13, 장애물 상면)에 대한 오염농도 분포이다. X-Y평면(Fig. 11)에서는 장애물 상면에 집중적으로 오염농도가 심함을 알 수 있다. 즉, 장애물 상부영역($X=1.2\text{m}$ 이상)은 상부 유입구에 의해 대체로 신선한 공기로 충만해 있고, 장애물 하부 영역에서는 양측 하단면에서 배출구를 갖는 관계로 오염정도가 상당히 정화되어 있음을 알 수 있다.

X-Z평면(Fig. 12)에서는 특히 Z방향으로의 오염 확산이 상당히 저지되고 있음을 나타내며, 이것은 Fig. 4의 속도 벡터에서 알 수 있듯이, S_1 점을 기준으로 좌우측으로 거의 대칭인 유속분포를 이루는 경계점으로서 이 단면 내를 오염시킬 수 있는 유속의 형태가 아닌 정체점(Stagnation Point)의 역할을 하고 있기 때문이다. 그러나 Y-Z평면(Fig. 13)에서는 상부로부터 하강한 기류가 곧바로 배출구로 향하는 성질에 의해 Z축으로의 오염은 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 다음의 Fig. 14, 15 그리고 16은 오염 발생원의 위치가 S_4 점인 경우, 이 점을 기준으로 한 각 단면에 대한 오염 농도 분포이다. 우선 Fig. 14의 X-Y평면상에서는 상부로부터의 유입류 영향이 거의 미치지 않음으로 인하여 $X=1.0\text{m}$ 이상의 상부면에도 상당한

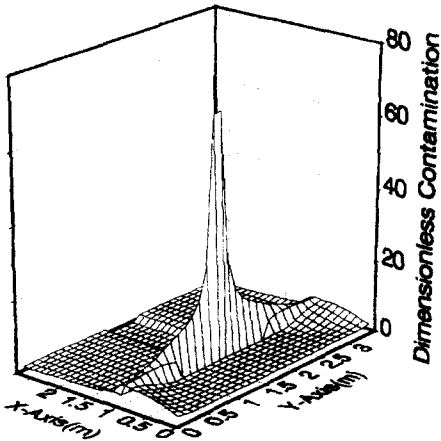


Fig. 11 Contamination concentration in X-Y plane with S_1 source point.(Z=2.5m, without desk)

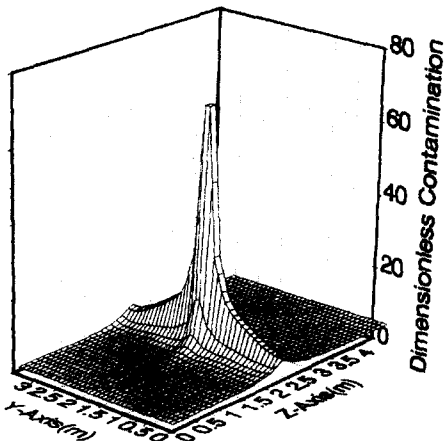


Fig. 12 Contamination concentration in X-Z plane with S_1 source point.(Y=1.75m, without desk)

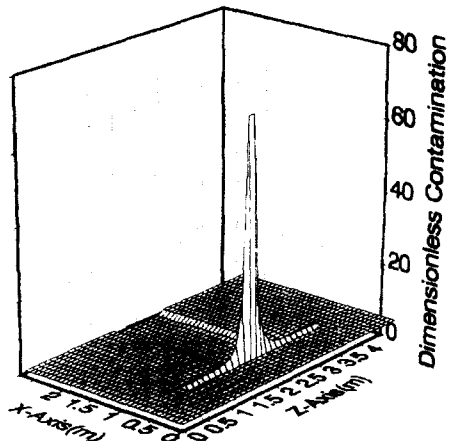


Fig. 13 Contamination concentration in Y-Z plane with S_1 source point.(X=0.875m, without desk)

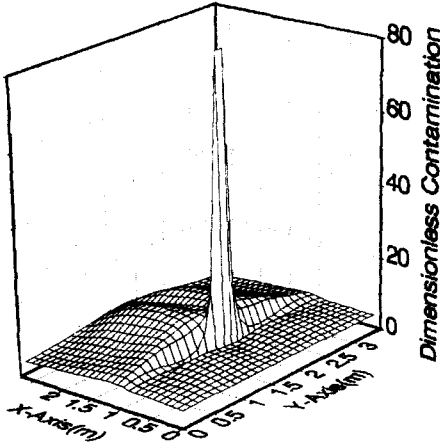


Fig. 14 Contamination concentration in X - Y plane with S_4 source point.($Z=2.5m$, without desk)

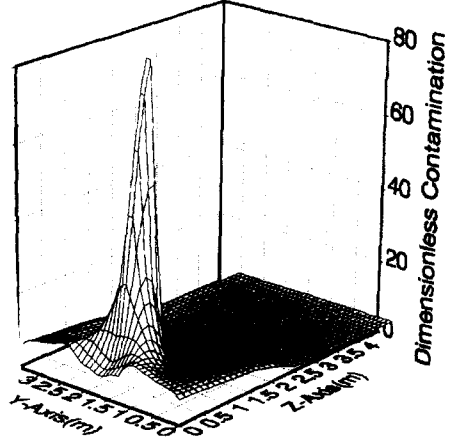


Fig. 16 Contamination concentration in Y - Z plane with S_4 source point.($X=0.875m$, without desk)

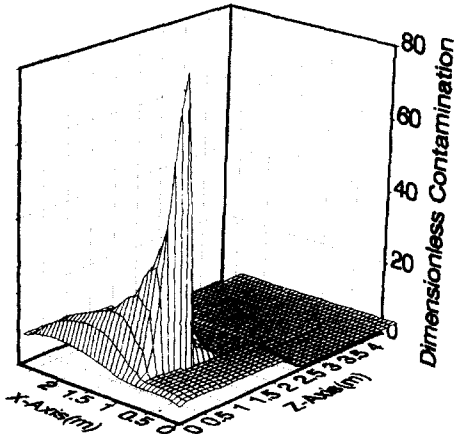


Fig. 15 Contamination concentration in X - Z plane with S_4 source point.($Y=1.75m$, without desk)

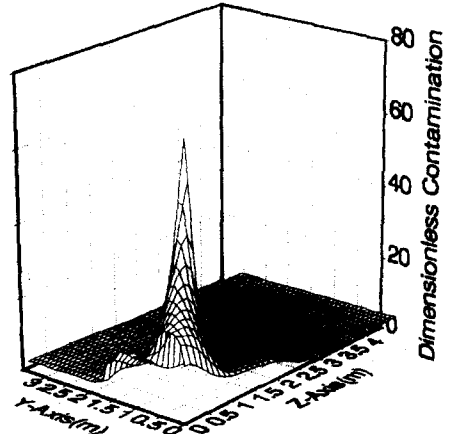


Fig. 17 Contamination concentration in Y - Z plane with S_4 source point.($X=0.875m$, without desk)

오염전파가 보이며 반면, 장애물의 하부에는 오염 전파가 상당히 억제되고 있음을 나타낸다. 이것은 장애물을 기준으로 상하부에는 완전히 양분된 유동패턴을 이루고 있기 때문에 상부의 오염이 하부의 전파가 거의 차단되고 있음을 알 수 있다.

다음의 X - Z평면(Fig. 15)에서는 장애물의 좌측 상단면에 집중적인 오염 농도가 분포해 있다. 이것은 장애물 왼쪽 끝면에 오염원이 존재하는 경우이므로 장애물을 기준으로 십자형태의 4분할 영역의 형태가 되어 한쪽 부분에만 집중적으로 오염되어 다른 부분으로의 확산이 저지되는 유동 패턴에 기인한다. 다음의 Fig. 17은 장애물의 좌측면 하부

(S_{14})에 오염원이 존재하는 경우로서 Y - Z 평면의 오염분포를 나타낸다. 이 부분의 유동패턴이 4분할되는 관계로 좌측 하부면에 오염 농도가 집중하게 되는 것을 나타낸다.

3.3 실내 평균 오염농도

Fig. 18은 유입속도(0.1, 1, 10m/s)에 대한 12개의 지점에 각각 오염원으로 가정하였을 때 실내 평균 농도를 장애물이 없는 경우의 평균 농도로서 무차원화 한 수치(Table 1)를 원형의 점으로 나타내었다. 예를 들면, $U_{in}=1m/s$ 인 경우에 오염원의 위치가 S_4 인 경우에는 장애물이 설치됨으로 인하여

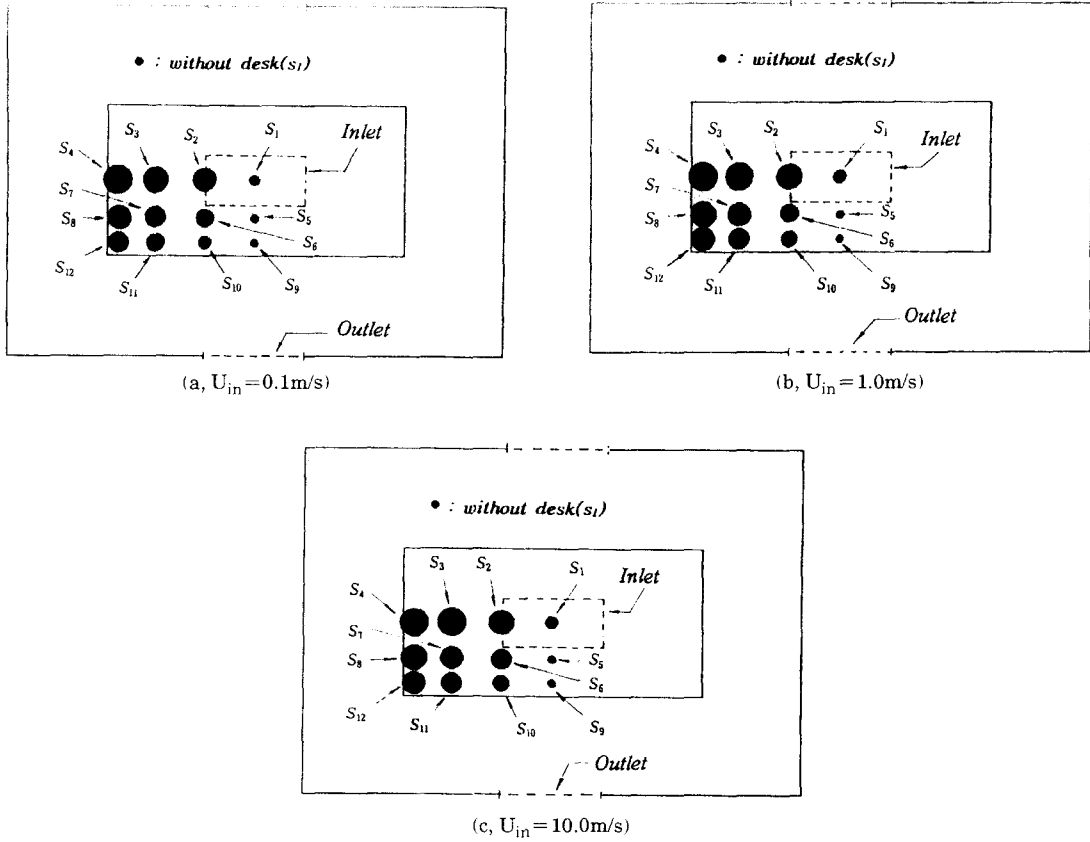


Fig. 18 Dimensionless value of contamination concentration.

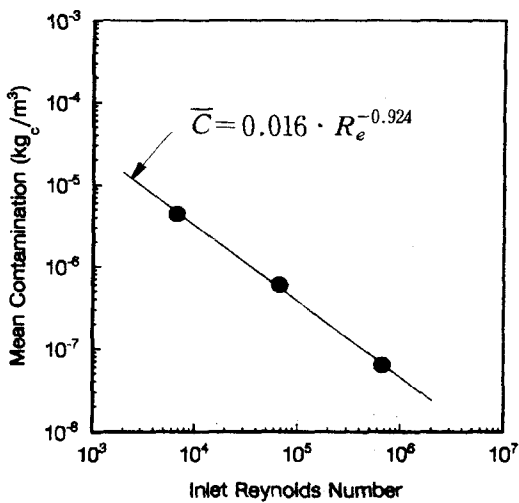


Fig. 19 The relationship inlet Reynolds Number and mean contamination concentration. (in case of S_1 source point, without desk)

3.72배로 오염 정도가 심하게 됨을 의미한다. 또한, 각 그림상의 without desk(S_1)은 각각의 유입 속도에 대하여 장애물이 설치되지 않았을 때 실내 평균 오염 농도를 의미한다. 즉 Fig. 18에서는 유입 속도가 변화해도, 장애물이 설치됨에 인한 오염 정도의 분포는 각각의 오염원의 위치에 대하여 유사함을 의미하며, 이것은 Fig. 2의 속도 분포에서 알 수 있듯이 본 연구에서 고려한 기하학적 형상에서는 유동패턴 및 오염 농도는 거의 상사적 분포임을 알 수 있다.

오염원의 위치 변화에 대한 오염 정도에 관하여 S_1 , S_5 그리고 S_9 의 위치는 장애물의 존재 여부는 거의 변화가 없지만 장애물의 좌측면 중앙부로 오염원이 이동할 수록 장애물에 의한 오염 정도는 상당히 심각성을 띤다고 할 수 있을 것이다. Fig. 19는 각각의 유입류의 속도($U_{in}=0.1, 1, 10\text{m/s}$)를

Table 1. Dimensionless value of contamination concentration.

U_{in} (m/s)	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	without desk(S_{12}) ($kg/m^3 \cdot s$)
0.1	1.48	2.98	3.35	3.52	1.04	2.25	2.80	2.99	0.99	1.91	2.53	2.81	4.41×10^{-6}
1.0	1.56	3.24	3.59	3.72	1.02	2.45	3.06	3.29	0.95	2.04	2.72	3.06	5.98×10^{-7}
10.0	1.61	3.34	3.68	3.80	1.03	2.59	3.22	3.46	0.96	2.15	2.88	3.21	6.26×10^{-8}

대표속도로하는 Re수와 이에 대한 장애물이 없는 경우 오염원 S_1 일 때의 실내평균 오염농도와와의 관계를 나타낸 것이다. 즉, $\bar{C} = 0.016 \cdot Re^{0.924}$ 의 직선 식으로 대표되며, 거의 선형적으로 유입속도가 증가함에 따라 실내 오염 정도가 감소함을 알 수 있다. 또한 장애물이 설치되는 경우에도 Table 1 및 Fig. 10에서 알 수 있듯이 각 유입속도에 대하여 같은 오염원의 위치에서는 거의 동등한 무차원 오염정도를 나타내므로 유입속도와 실내오염농도는 반비례 함을 알 수 있다.

본 연구에서 채택한 계산모델의 경우 $Z=2.5m$ 의 단면에서 유입구 및 유출구가 동시에 존재하는 형상에서는 비교적 유입속도와 오염농도가 직선적으로 반비례하였으나 천정에서 흡배기구를 갖는 청정실의 경우와 같은 여러 다른 형상에서는 본 계산 결과와 상당한 차이점도 기대되어진다.

4. 결 론

3차원 실내공간의 상부에서 일정유속이 유입하여 양측면 하부쪽으로 유출될 경우, 책상형의 장애물의 영향에 의한 유동장의 변화와 오염물질의 농도분포를 수치계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표준 $k-\epsilon$ 모델로 난류유동장을 해석한 결과 장애물을 기준으로 상하부에는 독립적인 큰 재순환 영역이 존재함을 알 수 있으며, 이에 따른 오염농도의 분포도 크게 양분되어 다른 영역으로의 오염전파가 저지됨을 알 수 있었다.

(2) 유입류의 속도 변화에 따른 전체적인 유동패턴은 큰 변화없이 상사적인 분포를 하는 것을 알 수 있었다.

(3) 작업대의 형태를 한 장애물 상의 입의 위치 에 오염원이 존재할 경우, 장애물의 끝면 중앙부

에 오염원이 존재하는 경우가 실내 오염도가 가장 높았다.

(4) 유입류의 속도가 증가함에 따라 실내오염 농도는 선형적인 감소 현상을 보였다.

참고문헌

- 오명도, 임학규, 배귀남, "초청정 클린룸 난류유동장에서의 오염일자 비정상 전파거동에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제14권, 2호, pp. 430 - 439, 1990.
- 심우섭, 송기천, 황태연, 신영철, "장방형 공간내 난류유동 및 오염물질 거동의 수치해석", 공기조화 냉동공학 논문집, 제3권, 제5호, pp. 350 - 364, 1991.
- 이재현, 이진원, 이상렬, "작업대가 있는 청정실내의 유동특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제10권, 제6호, pp. 852 - 860, 1986.
- Murakami, S., Kato, S., Nakagawa, H., "Numerical Prediction of Horizontal Nonisothermal 3-D Jet in Room based on the $k-\epsilon$ Model", ASHRAE Transactions, 1991.
- Murakami, S., Kato, S., Kondo, Y., "Examining $k-\epsilon$ EVM by means of ASM for a 3-D Horizontal Buoyant Jet in Enclosed Space", Int. Sym. on Eng. Turbulence Modelling and Measurements, 205 - 214, 1990.
- Murakami, S., Kato, S., Suyama, Y., "Numerical Study of Flow and Contaminant Diffusion Fields as affected by Flow Obstacles in Conventional - Flow-Type Clean Room", ASRAE Transaction, 1990.
- Launder, B. E. and Sharma, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", Letters in Heat and Transfer, Vol. 1, pp. 131 - 138, 1974.
- Jones, W. P. and Launder, B. E., "The Calcula-

- tion of Low - Reynolds - Number Phenomena with a Two Equation Model of Turbulence", *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 16, pp. 1119 - 1130, 1973.
- 9) Patel, V. C., Rodi, W. and Scheuerer, G., "Turbulence Models for Near - Wall and Low Reynolds Number Flows : A Review, *AIAA J.*, Vol. 23, No. 9, pp. 1308 - 1319, 1985.
- 10) 小竹進, 土方邦夫, "熱と流れ", (株)丸善 出版, pp. 14 - 20, 1990.
- 11) 香月正司, 中山顯, 熱流動の數値シミュレーション, 森北 出版, pp. 50 - 54, 1990.
- 12) Launder, B. E. and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 269 - 289, 1974.
- 13) Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing corporation, 1984.