

〈論 文〉

난류유동 압력경계조건을 가진 실내공간에서의 오염물질 거동에 관한 수치적 예측

이재현* · 노홍구** · 김광영*** · 오명도****

(1990년 4월 26일 접수)

A Numerical Prediction of Contamination Behavior in a Room under the Turbulent Flow and Pressure-Based Boundary Conditions

Jae-Heon Lee, H.G. Noh, K.Y. Kim and M.D. Oh

Key Words : Ventilation of a Room(실내 환기), Pressure-Based Boundary Condition(압력경계 조건) Contamination Concentration(오염농도)

Abstract

A numerical study to predict the contamination behavior in a room being contaminated has been performed. The room with one inlet and three exits, which maintained same pressure at the ceiling, has been chosen as test model. Six sets of calculation have been performed, for one, two or three contamination sources of $1 \times 10^{-4} \text{kg}_c/\text{s}$ strength at two different velocities(0, 2m/s, 20m/s). Numerical results show that the number the contamination concentration near the first source increased by every 20%~30% of the maximum concentration for each increase of the contamination source.

기 호 설 명

- C : 농도, (오염물질량/공기) (kg_c/kg)
- C_0 : 기준농도 (kg_c/kg)
- C_s : 오염원 세기 (kg_c/sec)
(하나의 오염발생영역당 단위시간당 오염물질발생량)
- C_r : 단위체적당 오염물질 발생률 (= C_s /오염원의 체적) ($\text{kg}_c/(\text{m}^3 \cdot \text{sec})$)
- k : 난류 운동에너지 (m^2/s^2)
- S_1 : 오염원 1
- S_2 : 오염원 2
- S_3 : 오염원 3

- V_{in} : 공기 유입속도 (m/s)
- μ : 점성계수 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{sec})$)
- μ_t : 난류 점성계수 ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{sec})$)
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- ε : 난류에너지 소산률 (m^2/s^3)
- ϕ : 유동함수 (kg/s)

하첨자

c : Contamination

1. 서 론

급진적인 공업화 과정에서 초래된 유해한 작업실 환경이 직업성 질병 및 환경 오염 문제를 야기시키고, 일상 생활에 까지도 그 영향이 확산되고 있기 때문에 유해한 작업 환경의 개선을 위한 대책

- * 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과
- ** 정회원, 한양대학교 대학원
- *** 정회원, 한국기계연구소
- **** 정회원, 생산기술연구원 연구개발본부

장구가 절실히 필요하다.

작업실 내의 환기를 위하여 이용되는 환기방법으로는 회석환기와 국소배기 등으로 나눌 수 있다. 회석 환기법은 작업실 내에 소규모 오염 발생원이 산재해 있고, 발생하는 오염 물질이 일정한 발생 비율을 가질때 이용되며, 이 환기법은 다시 자연 환기와 강제 환기로 세분된다. 자연 환기는 풍압 혹은 실내외의 온도차등의 기상 조건과 건물의 구조 및 개방 조건, 작업실내에서의 작업 종류등에 따라 환기량의 변동이 크기 때문에 유해 물질이 발생하는 환경에서 공기 오염물질의 농도를 일정 수준 이하로 계속 유지하기 어려우므로 보편적으로 작업실에서의 쾌적한 환기를 위하여 강제 환기를 많이 이용하고 있다. 또한 강제 환기는 층류 흐름 방식일 경우, 발생한 유해 물질을 확산시키거나 혼합시키지 않고 환기할 수 있으나 대형 공장의 경우 설비의 설치 및 유지관리가 어려우므로 난류 흐름 방식을 많이 사용하고 있다. 실제의 강제대류 방법을 사용하는 실내 환기에서는 공기에과기와 급기용 송풍기를 통하여 실내로 유입된 공기가 여러개의 배기구를 통하여 외부로 유출되는 경우가 많으며, 이 경우 실내에서 발생하는 오염물질의 거동을 예측하는 것은 중요한 일이다.

이러한 예측을 위하여서는 수치적인 방법이 많이 이용되고 있으며⁽¹⁾, 이에 부수되는 어려움은 다수의 배기구가 존재하는 경계위치에서의 경계조건을 적절히 부여하여야 한다는 것이다. 즉, 일반적으로 환기를 위한 배기구들은 보통 외기에 접하고 있으며 타당성 있는 경계조건으로서의 배기구 단면에서의 압력이 외기의 압력과 동일하다고 가정하는 것이다. 그러나 수치해석 과정에 필요한 운동량 방정식의 풀이를 위하여서는 보편적으로 경계에서의 속도값이 요구된다. 그렇지 않으면 배기구에서 Neumann형의 속도 경계조건이라도 최소한 필요하다. Akira등⁽²⁾이 2개 출구를 가지는 실제 공간내의 공기 유동을 해석한 바 있으나, 이들은 각 출구로 유출되는 유량을 미리 추정하였으며 출구에서는 출구단면과 평행한 방향으로의 속도 성분이 없다고 가정하여 문제를 해석하였다. 그러나 이들의 방법에서와 같이 유량을 문제의 해결전에 가정한다는 것은 실제의 물리적 거동과 어긋나는 결과가 나올 가능성이 크며, 출구가 많아질 수록 각 출구에서 빠져나오는 유량을 적합하게 예측하기가 점점 더 어려워져서 그 결과의 신빙성은 더욱 떨어지게 된

다.

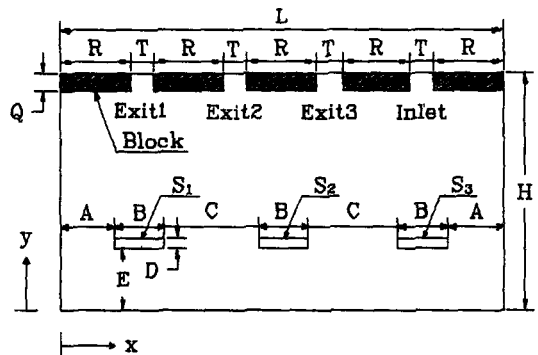
따라서 배기구에서의 경계조건으로서 압력값을 부여 할 수 있는 특별한 수치적인 처리방안이 요구된다. 더군다나 압력값은 스칼라량이므로 벡터량인 속도값에 비하여 실험적인 측정이 간단하기도 하며, 배기구가 대기에 접해 있는 경우에는 대기압을 문제의 물리적인 경계 조건으로 쉽게 이용할 수도 있다.

본 연구에서는 압력형 경계조건을 취급할 수 있도록, 속도 경계조건만을 취급하는 전형적인 프로그램을 수정하여 실제 상황에 가까운 실내 공간 내부의 유동장을 예측하였다. 이때 난류 흐름방식의 강제 대류를 해석하기 위한 지배방정식으로서의 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류 모델을 도입하였다. 실내로 유입되는 공기의 영향을 받는 유동장이 예측된 후에는 실내에 존재하는 오염원의 갯수를 변화시키면서 실내 공간에서의 오염 물질 분포를 수치적으로 계산하였다. 본 연구에서의 실내공간은 2차원이라 가정하였으며 유동은 정상유동이라 간주하였다. 또한 실내 공간을 채우는 공기량에 비하여 오염 물질의 양은 그 질량비가 0.1% 이하로서 상대적으로 아주적으므로, 오염된 공기의 밀도는 오염되지 않은 공기의 밀도와 동일하다고 가정한다.

2. 이론 해석 및 지배 방정식

2.1 계산 모델의 설정

Fig. 1은 오염 물질이 발생되고 있는 실내를 2차



$$A=0.05, B=0.12, C=0.24, D=0.02, E=0.1, T=0.06, Q=0.03, R=0.18, L=1.14, H=0.5$$

Fig. 1 Schematic diagram of physical model (unit ; m)

원적으로 묘사한 것으로서 본 연구에서 채택한 계산 모델이다. 실제로 작업실내에서의 유동은 3차원, 비등온장, 그리고 압축성등의 특성을 모두 가질 수 있으나 본 연구에서 선택한 실내공간은 한쪽 벽의 길이가 다른 두 벽에 비해 상당히 길어서 근사적으로 2차원 유동이 나타나는 것으로 간주하였으며 등은, 비압축성 유동으로 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실내공간의 천정에는 왼쪽으로부터 0.06m 폭의 배기구 3개와 유입구 1개가 0.18m의 등간격으로 배열되어 있으며, 배기구와 유입구를 위치시키기 위하여 그림에서와 같이 칸막이 역할을 하는 5개의 블록이 천정에 배열되어 있다. 공간단면 전체크기는 1.14m×0.5m이다. INLET으로 표시된 유입구에서는 300K의 공기가 유입구 단면에 수직하게 균일속도로 유입되고 있으며, EXIT1, EXIT2, EXIT3으로 표시된 3개의 배기구에는 모두 계기압력 0 Pa의 정압이 각 배기구 단면에 균일하게 유지된다. 아울러 바닥으로부터 0.1m 위로 떨어진 곳에는 0.12m×0.02m 크기를 갖는 오염 발생 영역이 3개 까지 존재할 수 있으며 이들의 위치를 그림에서 각각 S₁, S₂ 및 S₃로 표시하였다. 각 발생 영역에서는 시간당 일정한 질량(kg_c/s)의 오염물질을 발생시킨다.

2.2 난류모델의 설정

본 연구에서와 같이 여러개의 배기구와 유입구를 두기 위하여 공간 내부에 블록과 같은 여러개의 유동 장애물을 설치한 경우에는 모든 벽면에 벽면함수(wall function)를 이용하여야 하는 기존의 표준 k-ε 난류모델을 사용 할때 많은 어려움이 따른다. Jones and Launder⁽³⁾가 여러가지 복잡한 형상의 유동에 저레이놀즈 수 k-ε 난류모델 (low Reynolds number k-ε turbulent model)을 이용하여 계산한 수치해석 결과와 기존 실험 결과와 잘 일치했음을 보고한 바 있으므로 본 연구에서는 모든 벽면에서 k와 ε의 값을 0으로 줄 수 있는 계산상의 잇점을 가진 상기 난류모델을 도입하였다.

2.3 지배방정식 및 경계조건

작업실내 난류장제유동의 실제적인 물리현상을 기술하는 완전한 지배방정식에 다음과 같은 가정을 도입하여 기본방정식을 설정 하였다.

- (1) 실내유동은 정상상태 2차원 난류유동이다.
- (2) 실내의 유동에서 열전달 효과는 없다.

- (3) 실내의 공기는 일정한 밀도 및 일정 점성계수이며 비압축성 유동이다.
- (4) 오염 발생 영역에서는 시간당 일정한 오염물질(kg_c/s)을 배출하지만 그 배출량은 무시할 만큼 작으며 따라서 오염물질의 발생은 전체유동장에 영향을 미치지 않는다.
- (5) 오염물질의 물리적 성질은 공기의 그것과 동일하며 오염을 발생시키는 장치가 실내유동장을 방해 하지는 않는다.

(i) 지배방정식

위의 가정에 따른 지배방정식들은 다음과 같다.

(가) 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

(나) 운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho UV)}{\partial y} = & -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial x} \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial y} \} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \{ \mu_t \frac{\partial V}{\partial x} \} + \frac{5}{3} \frac{\partial}{\partial x} \{ \mu_t \frac{\partial U}{\partial x} \} \\ & + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \{ \mu_t \frac{\partial V}{\partial y} \} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho k \} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho UV)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^2)}{\partial y} = & -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\mu + \lambda_t) \frac{\partial V}{\partial x} \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\mu + \mu_t) \frac{\partial V}{\partial y} \} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \{ \mu_t \frac{\partial U}{\partial y} \} + \frac{5}{3} \frac{\partial}{\partial y} \{ \mu_t \frac{\partial V}{\partial y} \} \\ & + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \{ \mu_t \frac{\partial U}{\partial x} \} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \{ \rho k \} \end{aligned} \tag{3}$$

(다) 난류에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V k)}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \{ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x} \} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial y} \} + G - \rho(\epsilon + D) \end{aligned}$$

(라) 난류에너지 소산 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V \epsilon)}{\partial y} = & \frac{\partial}{\partial x} \{ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \} \\ & + \frac{\mu_t}{\sigma} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \} \\ & + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) + E \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} G = & \mu_t \{ 2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right} \end{aligned}$$

(마) 농도 방정식

Table 1 Expressions for low Reynolds number $k-\bar{\epsilon}$ turbulent model

Term	Expression
R_t	$\frac{\rho k^2}{\mu \bar{\epsilon}}$
D	$2\mu\gamma\left(\frac{\rho k^{1/2}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y}\right)^2$
E	$\frac{2\mu\mu_t}{\rho}\left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)^2\right]$
C_μ	$0.09 \exp\left(\frac{-3.4}{(1+R_t/50)^2}\right)$
C_2	$1.92[1-0.3\exp(-R_t^2)]$
C_1	1.44
σ_k	1.0
σ	1.3
σ_c	1.0
σ_t	1.0

$$\frac{\partial(\rho UC)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(-\frac{\mu}{S_c}\right) + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right] \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left[\left(-\frac{\mu}{S_c}\right) + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right] \frac{\partial C}{\partial y} + C_r \quad (6)$$

여기서 C_r 은 오염 발생 영역에서 단위 시간당 단위 체적당 발생하는 오염의 질량을 나타내며 본 계산의 경우에는 $4.167[\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$ 의 값을 가진다. 오염 발생 영역을 제외하고는 $C_r=0$ 이다. 또한 S_c 는 난류 Schmidt 수이다.

(바) 난류점성계수

난류점성계수

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\bar{\epsilon}} \quad (7)$$

방정식 (1)~(7)에 이용된 저레이놀즈수 $k-\bar{\epsilon}$ 난류

모델에 관한 정의식 및 실험 상수값들은 Launder and Sharma⁽⁴⁾가 제안한 정의식 및 실험상수값 들을 사용하였으며 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 D 와 E 항은 일반적으로 많이 사용되는 표준 $k-\bar{\epsilon}$ 모델의 방정식에는 없는 추가항이다. 표준 $k-\bar{\epsilon}$ 모델에서는 벽면에서의 난류에너지 소산률을 해결하기 위하여, 벽면함수를 이용하거나 혹은 난류에너지 소산률의 법선구배가 0이라는 조건을 사용하게 된다. 그러나 본 연구에서 채용한 저레이놀즈수 $k-\bar{\epsilon}$ 모델에서는 식 (4)와 식 (5)에 나타난 D 와 E 항을 추가적으로 도입 함으로써 벽면에서의 난류에너지 소산률($\bar{\epsilon}$)을 0으로 줄 수 있도록 하였다. 이때 이 추가항은 난류에너지 소산률의 벽면 경계값을 0이라 준 것에 대한 보정 역할을 하게 된다⁽⁵⁾.

(ii) 경계조건

경계조건으로서 속도 U 와 V 는 벽면에서 점착조건(no-slip condition)을 적용하였고, 난류운동에너지(k)와 난류에너지 소산률($\bar{\epsilon}$)에 대해서는 벽면값을 0으로 주었다. 농도 방정식을 푸는 경우에는 벽면에서의 법선구배를 0으로 하였다. 실내공간 천정에 있는 블록 부분은 실제 고체에 해당되므로 운동량 방정식, 그리고 난류에너지 소산률 방정식을 풀 필요가 없다. 그러나 본 연구의 수치 방법에서는 모든 계산 영역 내부를 유체로 간주하여 방정식을 풀이하므로 고체인 경계벽(윗벽)에서의 각종 값들이 그대로 블록 부분에 이식되도록 하기 위하여 확산계수를 인위적으로 아주 크게 주었다. 농도 방정식을 푸는 경우에는 고체 벽면에서의 속도가 0이므로 대류에 의한 오염의 전달은 없을 것이며 또한 확산계수를 0으로 설정하여 블록 부분으로의 오염 확산이 없도록 하였다. 또한 입구조건으로는 입구 단면에 수직인 속도가 균일한 분포로 들어온다고 가정하였다. 한편 입구의 난류운동에너지와 난류에너

Table 2 Boundary conditions

	U (m/s)	V (m/s)	k (m^2/s^2)	$\bar{\epsilon}$ (m^2/s^2)	C [kg _c /kg]	P (Pa)
INLET	0	V_{in}	$0.025 V_{in}^2$	$C_D k^{1.5}/(T/2)$	0	nn
EXIT 1, 2, 3	$\partial U/\partial y=0$	nn	$\partial k/\partial y=0$	$\partial \bar{\epsilon}/\partial y=0$	$\partial C/\partial y=0$	0
BLOCK	0	0	0	0	$\partial C/\partial n=0$	nn
WALLS	0	0	0	0	$\partial C/\partial n=0$	nn

Note ; n : normal direction, nn : not needed, C_D : 0.09

지 소산율은 Murakami등⁽⁵⁾이 본 연구의 모델과 유사한 상황에서 채용하여 실험 결과에 잘 부합된 바 있는 방법에 의하여 결정하였다. Murakami 등은 유입구에서 난류운동에너지는 입구 단면에서 공기 유입 속도의 자승에 비례한다고 하고 이때 비례상수는 0.025 정도로 규정하여, 유입구에서 난류운동에너지 소산율은 입구 단면폭의 절반(= $T/2$, Fig. 1 참조)을 난류특성길이(turbulent scale)로 사용하여 환산한 바 있다.

출구면의 경계조건으로는 모든 출구단면의 압력값을 출구단면을 따라 균일하게 0 Pa의 값으로 주었다. 0 Pa의 뜻은 게이지압력을 나타내며 기준 압력값이다. 또한 출구에서의 단면에 평행한 속도 경계조건은 Neumann 조건을 사용하였다. 이상의 경계조건을 Table 2에 상세히 나타내었으며 각부위의 명칭은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 전체제산영역을 많은 작은 제어체적으로 분할하여 엇갈린 격자망(staggered grid) 방법과 제어체적 공식화(control volume formulation) 방법에 의하여 얻어지는 이산화방정식을 SIMPLER 알고리즘으로 계산하는 기존의 수치해석 방법⁽⁶⁾에 하나의 경계면에 속도경계조건과 압력경계조건이 모두 부여될 수 있는 범용 수치해석 방법⁽⁷⁾을 사용하였다.

3.1 격자망 선정

본 수치계산에서는 52×42 의 직사각형 제어체적 분포를 채택하였으며, 압력경계조건을 설정하기 위하여서는 윗쪽 경계면에 접한 제어체적을 아주 얇게 설정 하였다. 3개의 오염원 위치인 S_1 , S_2 , 및 S_3 부근에서는 오염농도 구배가 클 것으로 예상되므로 비교적 조밀한 제어체적을 배치하였다.

3.2 해의 수렴 및 타당성 검토

본 수치계산에서는 유동장내 난류치의 초기값을 적절한 가정하기 위하여 먼저 유동장 성질을 층류로 가정하여 속도 및 압력값을 개략적으로 계산하였으며 이 값들을 근거로 난류 계산을 수행하였다. 수렴성을 향상시키기 위하여 하향 이완계수 방법(under-relaxation factor method)을 사용하였다. 층류로 계산시, 속도 및 압력에 관한 이완계수로서

각각 0.3 및 0.5를 사용 하였다. 난류유동 계산시에는 u , v , ρ , k , ϵ 및 μ_t 의 이완계수를 각각 0.1, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1 및 0.5로 하여 수렴해를 얻었으며 농도 C 는 속도가 완전히 수렴된후에 이완계수를 0.6~0.9의 범위로 조정하면서 계산하였다. 유동장에 관한 수렴해를 얻기위한 계산 반복횟수는 유입속도가 0.2 m/s일 경우, 3000~4000회 정도이며 유입속도가 20m/s일 경우에는 5000~6000회 정도이었다. 매회 반복계산마다 해의 수렴성을 알기 위하여 각각의 제어체적으로 들어오는 유량과 나가는 유량의 차이를 조사 하였으며 그 오차가 10^{-7} (m^3/s) 이하이고 속도 U 또는 V 와 같은 주요변수값들이 반복 계산 하는 동안에도 유효 5자리 범위에서 30여회 이상 변하지 않을 때의 값을 수렴값으로 간주하였다. 주어진 하나의 오염발생 조건하에서 농도를 수렴시키기 위한 추가적인 반복 계산은 100~300회로 충분하였다.

본 연구에서 채용한 압력경계 수치해법의 타당성은 다음의 방법으로 검증하였다. 먼저 본 연구의 방법으로 압력경계값이 주어진 유출구에서의 속도값을 계산한다. 이 속도값을 기준 속도경계 수치해법 프로그램의 경계조건으로 부여한후 유출구 위치에서의 압력값을 계산하였다. 이와 같은 방법에 의하여 구한 압력값은 본 연구에서 경계조건으로 부여한 압력값과 99.9% 이내로 일치하였으며 이로써 본 연구에서 사용된 수치방법의 타당성을 믿을수 있었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 계산조건

타당성이 입증된 본 연구의 수치해법에 의해 다음과 같은 계산조건으로 농도분포를 계산하였다. Fig. 1에 보여준 계산모델에서 유입구에서의 유입속도가 0.2m/s와 20m/s일때 오염원을 Fig. 1에 나타낸 S_1 , S_2 , 및 S_3 구역에 차례대로 1개~3개까지 위치 시키면서, 모두 6가지 경우에 대해 계산영역 내부에서의 농도분포를 계산하였다. 이때 각 오염원 영역에서는 시간당 1×10^{-4} (kg/s)의 오염물질을 발생 시키고 있다. 실제 계산에 사용된 공간내부 유체의 물성치는 대기조건인 300K, 1기압에서 공기에 해당하는 값을 사용 하였다.

유입구의 유입속도가 20m/s 이라는것은 상당히 고속유동에 해당된다. 고속으로 유입되는 공기로

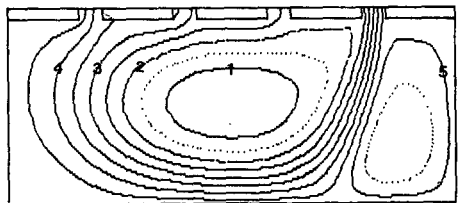
말미암아 생길 수 있는 문제점으로써 실제 작업장 바닥에 잔류한 먼지들을 다시 훑날리게 하는 부작용이 있을 수 있으나 본 연구에서는 이러한 문제점을 없는 것으로 가정하였다.

4.2 유동특성

본 연구모델에서는 공기유입구가 천정의 오른쪽에 위치하므로 여기로 유입된 유량이 천정 왼쪽에 배열된 유출구로 빠져나갈 것이다. 따라서 유입구에서 시작된 주제트(main jet)에 의한 유동은 실내를 가로지른후 3개의 유출구로 분산될 것이며 주제트의 왼쪽영역에는 시계방향의 재순환 유동영역이 나타날 것이며 오른쪽 영역에서는 고정된 반시계방향 재순환 유동영역이 될것임을 예측할 수 있다. 이러한 유체거동은 Fig. 2에 나타난 유선분포에서 확인할 수 있다. Fig. 2(a)는 유입속도가 0.2m/s, Fig. 2(b)는 20m/s인 경우를 나타내며 각 유선에 기재된 숫자는 유동함수 ϕ (kg/s)를 표시하기 위한 것이며 그값은 그림의 아래쪽에 기재되어 있다. 비록 유입속도가 다를 지라도 유선 분포의 대체적인 윤곽은 유사하다. 그러나 유입속도가 20m/s인 경

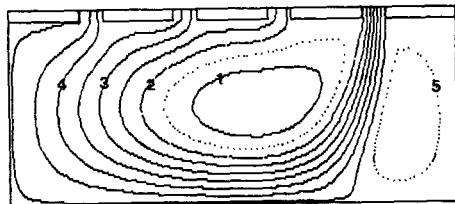
우에는 0.2m/s인 경우에 비하여, 첫째 주제트의 왼쪽영역에 위치한 시계방향 재순환 유동영역의 중심이 왼쪽으로 약 0.006m 정도 이동되었으며, 둘째 실내공간의 왼쪽하부 영역에는 재순환 유동 영역이 모퉁이에 거의 인접하도록 확장되어 있음을 알 수 있다. 이는 유입속도가 빠를 경우에는 주제트의 관성력이 상대적으로 크기 때문인 것으로 해석된다.

본 연구에서는 실제의 유동상황을 정확하게 묘사하기 위하여 3개의 유출단면에 동일한 압력값을 부여하였으며 이러한 상황에서 각 유출단면으로 빠져나가는 유량분율을 검토하는 일은 의미있는 일이다. 이를 위하여 Fig. 3(a) (b)에는 유입속도가 각각 0.2m/s와 20m/s인 경우에 공간내부의 속도벡터 분포를 보여준다. 여기서 보면 왼쪽 벽면으로부터 두번째 유출구 부근에서 속도벡터의 방향이 약간 다르다. 즉 유입속도가 20m/s인 경우에, 유출단면 방향으로의 속도벡터가 더 많이 보이며 따라서 유출 유량도 더 크게된다. 이는 유선분포에서 보았듯이 시계방향 재순환유동의 중심이 유입속도 20m/s인 경우에는 0.2m/s인 경우에 비하여 좀 더



VAL: ①:-20.4, ②:-14.9, ③:-9.53, ④:-4.10, ⑤:1.32
 *** $\phi = \text{VAL} \times 10^{-3}$ [kg/s]

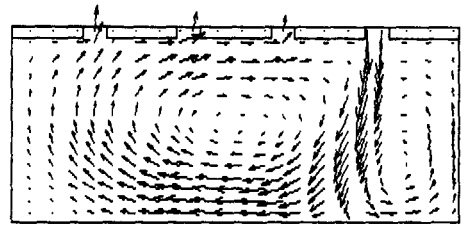
(a) $|V_{in}|=0.2\text{m/s}$



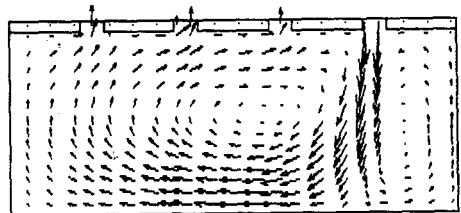
VAL: ①:-17.9, ②:-13.5, ③:-9.08, ④:-4.65, ⑤:1.99
 *** $\phi = \text{VAL} \times 10^{-1}$ [kg/s]

(b) $|V_{in}|=20\text{m/s}$

Fig. 2 Distributions of numerical streamlines within the room space



(a) $|V_{in}|=0.2\text{m/s}$



(b) $|V_{in}|=20\text{m/s}$

Fig. 3 Distributions of velocity vectors within the room space

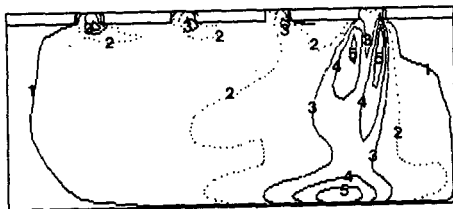
오른쪽으로 옮겨 졌기 때문이다. 계산결과에 의하면 0.2m/s의 유입속도 때 각 유출구로의 유출유량 비율은 Exit 1, Exit 2 및 Exit 3의 순서로 47.0%, 27.6% 및 25.4% 이었으며, 20m/s의 유입속도때는 40.1%, 32.3% 및 27.6% 이었다. 즉 유입속도가 커짐에 따라 유입구에서 멀리 떨어진 유출구의 유량은 감소하고 가까운 유출구에서의 유량은 증가된다고 할 수 있다.

공기 유입에 필요한 소요압력은 송풍기부하와 관련되므로 중요한 자료이다. 계산결과에 의하면 유출구와 유입구 사이의 압력 차이는 유입구에서의 상대 압력이 0.2m/s 일 때 $2.3 \times 10^{-2}(\text{Pa})$ 이었던 것이 20m/s 유입속도 때는 $2.77 \times 10^2(\text{Pa})$ 로 증가 되었으며 이는 속도의 제곱에 비례하는 압력소요를 뜻하는 송풍기 법칙에 유사한 결과이다.

실내공간에서의 등난류에너지선 분포를 유입속도 0.2m/s인 경우에는 Fig. 4(a)에, 그리고 20m/s인 경우에는 Fig. 4(b)에 나타내었다. 등난류에너지 분포선에 나타낸 숫자는 난류에너지의 강도를 지칭하며 그 값은 그림 아랫쪽에 나타내었다. 두 그림에서 난류에너지 값을 비교하면 유입속도 값의 10²

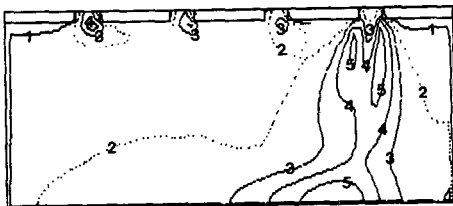
배 증가는 난류에너지 값의 10⁴배 증가를 뜻하고 있다. 공간 내부에서 난류에너지값의 분포를 보면 두 가지 유입속도 경우에 유사하게 나타나며 특히 유입구에서 시작되는 주제트 주위에서의 값이 공간 내부의 다른 위치에 비하여 크게 나타난다. 아울러 주제트가 아랫벽에 충돌하는 위치에서의 난류에너지 값이 가장 크게 나타나는 것은 물리적인 관점에서 예측과 일치한다.

난류점성계수의 검토는 어떤 물리량의 난류에 의한 확산정도를 예측할 수 있게 한다. Fig. 5(a)에는 유입속도 0.2m/s, Fig. 5(b)에는 유입속도 20 m/s인 경우에 공간내부에서의 등난류점성 계수선의 분포를 보여준다. 등난류 점성 계수선에 나타낸 숫자는 난류점성 계수의 크기를 나타내며 그 구체적인 값은 그림의 아랫쪽에 표시하였다. 층류점성 계수의 값이 약 $1.8 \times 10^{-5}[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})]$ 인 것과 비교하면 유입속도 0.2m/s인 경우에는 10^{3~4}배의 크기로 확산능력이 증가한 것으로 보인다. 난류점성 계수 μ_t 는 속도요동의 크기를 나타내는 $k^{1/2}$ 와 난류 와(turbulent eddy)의 크기를 나타내는 L_t 를 이용하여 다음과 같이 표시 될 수도 있다.



VAL : ①:0.53, ②:1.05, ③:1.57, ④:2.10, ⑤:2.62
 *** $k = \text{VAL} \times 10^{-3} [\text{m}^2/\text{s}^2]$

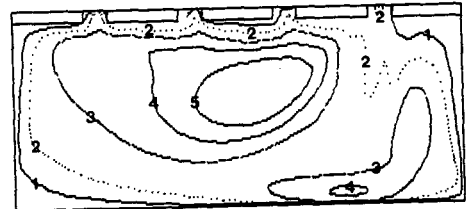
(a) $|V_{in}|=0.2\text{m/s}$



VAL : ①:0.71, ②:1.42, ③:2.14, ④:2.85, ⑤:3.56
 *** $k = \text{VAL} \times 10^1 [\text{m}^2/\text{s}^2]$

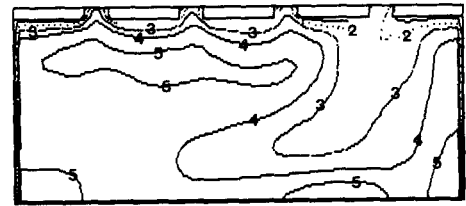
(b) $|V_{in}|=20\text{m/s}$

Fig. 4 Distributions of contours for constant turbulent kinetic energy



VAL : ①:1.81, ②:3.61, ③:5.42, ④:7.22, ⑤:9.03
 *** $\mu_t = \text{VAL} \times 10^{-4} [\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}]$

(a) $|V_{in}|=0.2\text{m/s}$



VAL : ①:2.63, ②:5.26, ③:7.89, ④:10.5, ⑤:13.1
 *** $\mu_t = \text{VAL} \times 10^{-2} [\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}]$

(b) $|V_{in}|=20\text{m/s}$

Fig. 5 Distributions of contours for constant turbulent viscosity

$$\mu_t = \rho k^{1/2} L_t \quad (8)$$

유입속도가 0.2m/s에서 20m/s로 증가 되었을 때 Fig. 4에 보는 바와 같이 난류에너지, k 가 대략 10^4 배 증가 되었으면 μ_t 는 Fig. 5에 보는 바와 같이 대략 10^2 배 증가 되었으므로 식(8)에 의하면 난류와의 위수(order)는 변하지 않는 것으로 판단된다. 그러나 난류에너지값의 분포에서와 달리 난류점성계수의 국소적인 분포는 두가지 유입 속도의 경우 넓은 영역에서 상당히 다르게 나타난다. 즉 공간의 왼쪽 하부 모퉁이에서의 난류점성계수는 유입속도가 낮은 때에 공간내에서 가장 낮은 값으로 나타났으며 유입속도가 큰 경우에는 가장 높은 값을 보인다. 이는 유선분포(Fig. 2)에서 설명 하였듯이 유입속도가 큰 경우에 주제의 순환영역이 이 모퉁이 영역에 까지 확장 됨에 따라 이 부분의 난류와 크기(turbulent scale)가 국부적으로 커졌기 때문으로 판단된다.

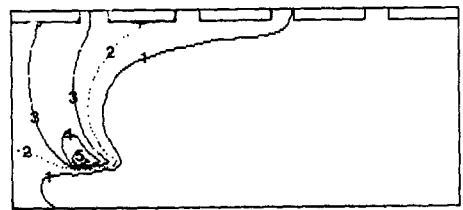
4.3 오염물질의 분포

본 연구에서 채용한 모델 공간의 체적은 제 3의 방향을 1m 길이로 간주할 때 $0.54m^3$ 이며 이 내부에 존재하는 공기 질량은 $0.639kg$ 이다. 이 공간내의 공기를 모두 신선한 새로운 공기로 대체하고자 할때, 유입구의 유속이 0.2m/s인 경우에 최소한 45.3초가 소요되며 20m/s인 경우에는 최소한 0.45초가 소요된다. 즉 오염 물질을 제거하는 능력은 유입공기 유량에 비례한다고 할 수 있으며 이에 따라 공간내의 오염물질 농도는 유입공기 유량에 반비례 할 것임을 직관적으로 알 수 있다. 본 연구에서 계산된 6가지의 오염물질 농도 분포를 분석하기 위하여서는 어떤 기준 농도가 필요하며 이 기준 농도 C_0 는 아래식으로 정의하였다.

$$C_0 = C_{s1} / (\mu |V_{in}| \cdot H \cdot W) \quad (9)$$

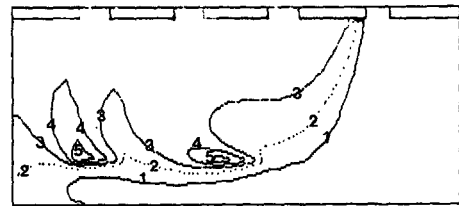
여기서 $|V_{in}|$ 은 유입 속도이며 본 연구에서는 0.2 m/s로 선택하였다. H 와 W 는 각각 공간의 높이 및 공간의 3차원 방향 길이를 나타낸다. C_{s1} 는 오염 발생량이며 오염 발생 영역이 S_1 한곳인 경우의 오염 발생률을 뜻한다. 상기 정의에 의한 기준 농도는 C_0 는 $8.5 \times 10^{-4} (kg_c/kg)$ 이며 이는 C_s 의 오염을 발생시키고 있는 $H \times W$ 의 사각형 단면의 덕트 내부를 $|V_{in}|$ 의 속도로 공기가 유동할 때 공기가 오염되는 정도를 나타낸다. Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 유입 속도가 0.2m/s 및 20m/s인 경우에 공간 내

부에서의 등오염 농도선을 보여준다. 이 그림들에서 (a)는 S_1 오염영역에서 $1 \times 10^{-4} (kg_c/s)$ 의 오염물질이 발생되고 있는 경우이며, (b)는 S_1 과 S_2 오염 영역에서 각각 $1 \times 10^{-4} (kg_c/s)$ 의 오염물질이 발생되고 있는 경우이며, (c)는 S_1 , S_2 및 S_3 오염영역에서 각각 동일한 양의 오염 물질을 발생시키고 있는 경우이다. 따라서 Fig. 6 및 Fig. 7의 (c)는 (a)에 비하여 3배의 오염 물질을 배출하고 있는 경우이다. 등오염 농도선은 최대 농도를 6등분하여 모두 5개의 등농도선으로 구분하였다. 등오염



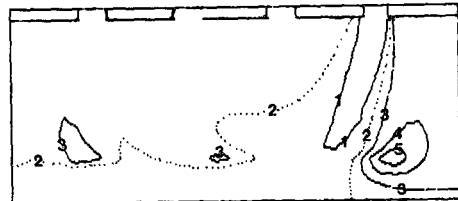
C/C_0 : ①:4.06, ②:8.12, ③:12.2, ④:16.2, ⑤:20.4
 *** $C_0 = 8.5 \times 10^{-4} [kg_a/kg]$

(a)



C/C_0 : ①:4.74, ②:9.55, ③:14.4, ④:19.1, ⑤:23.9
 *** $C_0 = 8.5 \times 10^{-4} [kg_a/kg]$

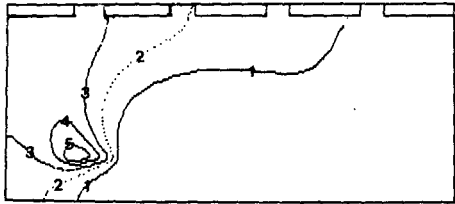
(b)



C/C_0 : ①:9.99, ②:20.0, ③:30.0, ④:39.9, ⑤:49.9
 *** $C_0 = 8.5 \times 10^{-4} [kg_a/kg]$

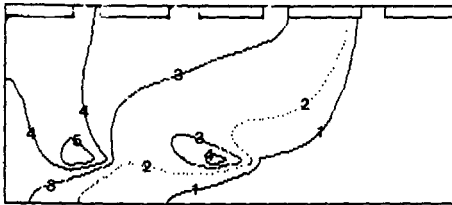
(c)

Fig. 6 Distributions of contours for constant contamination concentration in case of $|V_{in}| = 0.2 [m/s]$



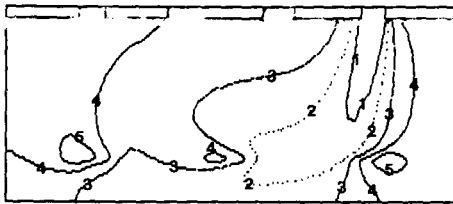
C/C_0 : ①:0.04, ②:0.07, ③:0.11, ④:0.14, ⑤:0.18
 *** $C_0=8.5 \times 10^{-4}$ [kg_s/kg]

(a) S_1 source only



C/C_0 : ①:0.05, ②:0.09, ③:0.14, ④:0.19, ⑤:0.23
 *** $C_0=8.5 \times 10^{-4}$ [kg_s/kg]

(b) S_1 and S_2



C/C_0 : ①:0.06, ②:0.13, ③:0.19, ④:0.26, ⑤:0.32
 *** $C_0=8.5 \times 10^{-4}$ [kg_s/kg]

(c) S_1, S_2 and S_3

Fig. 7 Distributions of contours for constant contamination concentration in case of $|V_{in}|=20$ [m/s]

농도선에 기재된 숫자는 농도의 크기를 나타내며 구체적인 양은 기준농도 C_0 에 대비한 무차원 오염농도 (C/C_0)로써 그림의 아래쪽에 나타내었다.

Fig. 6 (a), (b), (c)와 Fig. 7 (a), (b), (c)를 비교하면 무차원 오염 농도는 앞서 예측한 바와 같이 유입공기 유량에 반비례함을 알 수 있으며 공간내의 전반적인 등오염 농도선의 분포는 유사하다고 할 수 있다. 그러나 유입속도가 20m/s인 Fig. 7의 경우에는 0.2m/s인 Fig. 6의 경우에 비하여 오염 물질의 아래부분에서의 오염 농도 구배가 작음을 볼

수 있다. 이는 큰 유입 속도에서 상대적으로 큰 난류점성계수로 인한 현상이며 큰 유입 속도는 난류 확산에 의한 오염의 전파를 촉진시킨다고 할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 (a), (b) 및 (c)의 경우를 각각 비교하면 S_1 위치 부근에서의 오염 농도는 (a) → (b) → (c) 순서로 증가한다. 이 증가는 S_1 위치 부근 오염 농도에 관한 S_2 오염원 및 S_3 오염원의 영향을 나타내며 S_2 혹은 S_3 가 추가될 때마다 이 증가율은 공간내 최대 오염 농도의 20%~30% 정도이다. 오염원이 3개있는 경우인 Fig. 6(c)와 Fig. 7(c)에서 보면, 고립된 반시계 방향 영역내에 존재하는 오염원 S_3 부근에서의 오염 농도가 공간내에서 가장 높으며 이는 대류에 의한 오염의 배출이 용이하지 못함을 나타내는 것이다. 그러나 유입 속도가 20 m/s인 경우[Fig. 7(c)]에는 0.2m/s인 경우 [Fig. 6 (c)]에 비하여 S_3 위치 부근의 오염 농도가 S_1 위치 부근에서도 보인다. 이는 유입 속도가 빠른 경우에는 전체 공간내에서의 난류점성계수가 커지기 때문에 비록 대류에 의한 오염 물질의 배출은 어렵지만 난류 확산에 의하여 S_3 에 위치한 오염 물질의 배출은 약간 용이해지기 때문으로 판단 된다.

5. 결 론

천정 부분에 하나의 유입구와 압력이 동일한 3개의 유출구를 가지는 1.14m×0.5 m의 2차원 공간내에 1개, 2개 혹은 3개의 오염 배출원이 존재할 때 2가지 유입 속도인 0.2m/s와 20m/s의 경우에 공간내부의 난류 유동 특성과 오염 농도를 수치적인 방법으로 예측하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 유입 속도가 증가하면 주제의 왼쪽에 생기는 시계방향 재순환 유동영역의 중심은 오른쪽으로 이동하며 이러한 이동은 3개 유출구로 빠져나가는 유량의 변동을 초래한다.

(2) 3개의 유출구 단면에서의 압력을 동일하게 설정하였을 때 유입구에서 멀리 떨어진 유출구에서의 유량을 감소하고 가까운 유출구에서의 유량은 증가한다.

(3) 본 연구 모델과 같은 공간에서 오염원의 개수가 최초 1개에서 2개 혹은 3개로 증가될 때 최초 오염원 부근에서의 오염 농도는 오염원 개수의 증가에 따라 최초 오염 농도의 20%~30% 정도씩 증

가한다.

(4) 유입 속도 증가에 반비례하여 전체적인 오염 농도는 감소하며 유입 속도 증가에 거의 비례하여 난류점성계수가 증가한다. 증가된 난류점성 계수의 영향으로 유입 속도가 빠른 경우에는 유입 속도가 낮은 경우에 비하여 오염원 주위에서의 오염 확산이 촉진된다.

참 고 문 헌

(1) 오명도, 임학규, 배귀남, 1990, "초청정 클린룸 난류유동장내에서의 오염입자 비정상 전파거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제14권, 제 2 호, pp. 430~439.
 (2) Akira, Y. et al., 1974, 1975, "The Numerical Analysis of Room Air Distribution Part 1, 2, 3", The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineering of Japan. Vol. 48. No.1.

Vol.48, No. 10, Vol. 49, No. 12.
 (3) Jones, Launder, 1973, "The Calculation of Low-Reynolds Number Phenomena with a Two Equation Model of Turbulence", Int.J.Heat and Mass Transfer, Vol.16, pp.1119~1130.
 (4) Launder Sharma, 1974, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, pp.131~138.
 (5) Murakami, Kato, Suyama, "Experimental and Numerical Analysis of Flow Field Diffusion Field in Room with Obstracles, 6th Proceedings of JACA, pp. 165~187.
 (6) Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York.
 (7) 이재현, 1988, "2차원 비압축성 점성유동에 나타나는 압력경계조건의 해결방안", 대한기계학회논문집, Vol. 12, No. 3, pp. 925~933.