

장방형 공간내 난류유동및 오염물질 거동의 수치해석

A Numerical Analysis of Turbulent Flow Field and Contamination Particles Movements in Rectangular Chambers

심 우 섭*, 송 기 천*, 황 태 연*, 신 영 철*
W. S. Shim, K.C.Song, T.Y.Hwang, Y.C.Shin

Key Words : Turbulent Flow Field Numerical Analysis(난류 유동장 수치해석), Particle Trajectory(입자 추적), Particle Distribution(입자분포)

ABSTRACT

The movements of small particles distributed uniformly in a steady flow in rectangular chambers having inlets and outlets were simulated numerically. Low Reynolds number turbulent model with a two-equation ($k-\epsilon$) which describes the turbulent characteristics was applied to predict the air flow pattern and particles movements under the condition of the various locations and size of ducts.

The calculation results show that the prediction of recirculation zone and stagnation point of flow is important to determine the particles behavior according to the design change.

These results will be useful in designing the rectangular chambers for collective protection.

기 호 설 명

A : 면적 [m^2]
 C_c : Cunningham 보정계수
 d_p : 입자 직경 [μm]
 k : 난류운동에너지 [m^2/s^2]
 L : 입구 크기 [m]
 N : 유입구 폭과 입자 제원에 관련된 무차원 수

P : 공기 압력 [Pa]
 Re : 입구의 레이놀즈수
 Rt : 난류 레이놀즈수
 t : 시 간
 u, v : x, y 방향 속도 [m/s]
 u_p, v_p : x, y 방향 입자속도 [m/s]
 V_{in} : 입구 속도 [m/s]
 x, y : 직교 좌표계
 μ : 점성계수 [$kg/m \cdot s$]

- μ_t : 난류점성계수 [$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
- ρ : 공기 밀도 [kg/m^3]
- ρ_p : 입자 밀도 [kg/m^3]
- ϵ : 난류에너지소산율 [m^2/s^3]
- σ_p : 난류운동에너지에 대한 유효 프란틀수
- σ_ϵ : 난류에너지소산율에 대한 유효 프란틀수
- λ : 공기 평균 자유 행로 [μm]
- ϕ : 입자 분포 비율 [%]
- Δt : 시간 단계

1. 서 론

실내나 작업장내의 떠 있는 먼지, 담배연기, 오염환경 출입에 따른 오염미립자를 제거하기 위한 방법의 하나로 공간내에 정화공기를 유입함으로써 유해물질을 배출한다. 유체내의 부유하는 입자를 제거하는 문제는 실내의 환기 뿐만 아니라, 클린룸, 화학공장 등에서 매우 중요하다.

오염환경 출입에 따라 실내에 유입된 오염물질은 실내기류의 유동으로 이동 확산된다. 오염도를 효율적으로 낮추기 위해서는 실내의 기류분포를 예측하고 제어하는 기법이 필요하다.¹⁾ 실내의 기류분포를 조절하기 위한 기법으로는 기류의 가시화, 풍속분포의 직접 측정, 수치해석 등의 방법이 있다. 기류의 가시화 기법으로는 유동장 전체의 유동 양상을 파악하는데 적합하지만 정량적인 자료 얻기에는 부적합하다. 풍속 분포의 직접 측정방법에는 tandem 형 열선풍속계, smoke 와 thermistor 풍속계의 병용, 또는 초음파 풍속계등이 이용되고 있다. 이 방법은 비교적 정확한 정량적인 자료를 얻을 수 있지만 여러 곳을 측정해야 하므로 노력이 많이 든다. 수치해석 방법은 입자 유동에 관한 기초이론과 이에 따른 조직적인 기본실험을 근거하여 해석 모델을 설정하고 임의의 형상에 대해서는 이 수치해석 모델을 이용하여 직접 측정없이도 그 기류분포를 예측할 수 있다.

실내의 기류유동은 공급 및 배출 기류의 분배 형태에 따라서 그 유동형태가 크게 달라지므로 오염환경 출입에 따라 발생된 오염물질

의 신속한 배출을 위해서는 실내 공기유동의 이론적 예측이 필요하다. 본 연구에서는 모델실내의 실험결과를 실제 실내에 확장시키는 어려움을 극복하고 실내에 오염물질의 거시적인 움직임을 예측함은 물론 오염물질의 효과적인 제거를 위한 정화공기의 입출구 위치 선정 및 최적 운전조건등 설계자료를 획득하기 위하여 입출구 위치 및 갯수가 다른 장방형 공간 3종을 선정하여 모델링하였고 $k-\epsilon$ 난류 모델을 도입하여 유동장을 해석하였다. 이 유동장을 사용하여 입자의 거동을 3가지로 분류(배출, 순환, 부착)하여 입자크기, 레이놀즈수가 오염물질 거동에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 이론해석 및 지배방정식

2.1 계산 모델의 선정

입출구 위치 및 갯수가 다른 장방형 공간 3종을 선정하여 모델링한 것을 Fig.1에 나타내었다. 계산모델 3종 모두 300k의 공기가 온도 변화 없이 유입단면에 수직하게 균일 속도로 유입되고 있다. 공급 송풍량은 85m³/h, 170m³/h으로 A, B형은 유입구 1개에 모두 공급되고 C형은 유입구 3개에 균등히 공급되고 있다.

2.2 난류 모델의 선정

난류유동은 매우 불규칙하며 비정상적인 3차원 운동이므로 난류유동과 관련된 유동현상을 수치적으로 정확하게 예측하거나 설명하기란 어려운 일이다. 난류모델은 난류점성계수(μ_t)를 취급하는 방법에 따라 여러가지로 분류할 수 있다.²⁾ 난류점성계수를 혼합길이(mixing length)와 난류 평균속도로 나타내는 zero-equation model, 난류운동에너지(k)와 혼합길이(ℓ)로 정의되는 one-equation model이 있으나 재순환 유동해석으로는 적합하지 못하다.²⁾

본 연구는 난류운동에너지(k) 및 난류에너지소산율(ϵ)에 의해 난류점성계수를 결정하는 $k-\epsilon$ 모델을 선정하여 유동장의 특성을 해석

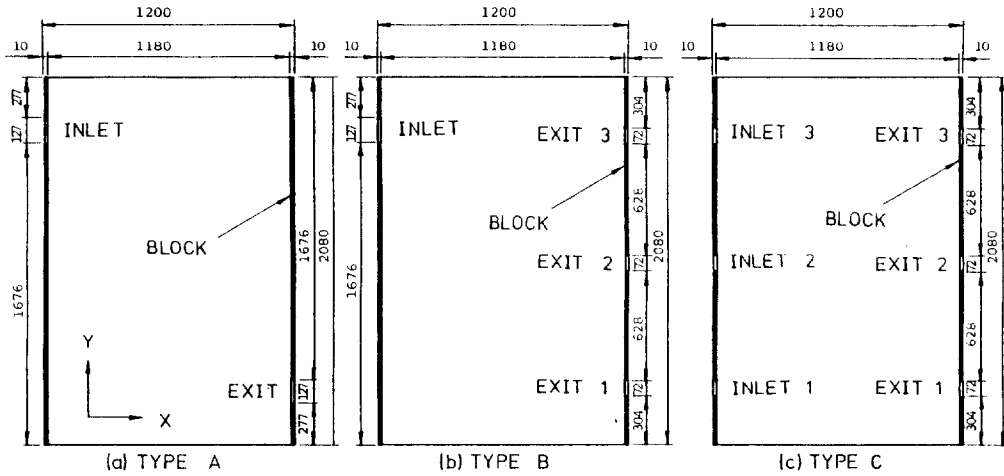


Fig. 1 Schematic diagram of the rectangular chambers (unit : mm)

하였다. $k-\epsilon$ 모델은 유체점성 증가 및 난류 성분 감소로 난류 레이놀즈가 낮은 벽면 근처의 난류 경계층내에서의 유동해석용으로 적합하지 못하다. 벽면효과를 고려한 방법으로 Wall function method와 Low Reynolds number turbulent model 이 있다.^{3, 4, 5, 9)} 두방법 모두 장단점이 있으나 본 연구에서는 공급 및 배기 형태의 변화를 주어야 하는 프로그램의 변환성 때문에 벽면에서 k 와 ϵ 의 경계값을 zero로 줄 수 있는 Low Reynolds number turbulent model을 채택하여 평균 유동을 계산하였다.

2.3 지배방정식 및 경계조건

실내의 난류 강제유동 현상을 해석하기 위해 Low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulent model을 사용했으며 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 실내 유동은 난류도가 크므로 정상상태 2차원 난류유동이다.
- 2) 실내 유동은 온도 변화가 크지 않으므로 등온장으로 간주한다.
- 3) 실내 유동은 저속유동이므로 비압축성 유동이다.
- 4) Loading factor가 작으므로 단상유동 및 오염 입자가 균일하게 분포한다.

5) 재순환 유동이 발생하므로 타원형(Elliptic type) 문제이다.

2.3.1 지배방정식

1) 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho U_i) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial X_j} + \frac{\partial}{\partial X_i} \left(\mu \frac{\partial U_j}{\partial X_i} - \overline{\rho U_i^1 U_j^1} \right) \dots (2)$$

$$-\overline{\rho U_i^1 U_j^1} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k - \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial X_k} \right) \dots\dots\dots (3)$$

3) 난류운동에너지(k) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_i} \right] + G - \rho \epsilon - 2 \mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial X_j} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

4) 난류에너지소산율(ϵ) 방정식

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_i} \right\} + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) + \frac{2\mu\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial X_i \partial X_j} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

5) 난류점성계수

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

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

$$R_t = \rho \frac{k^2}{\mu \varepsilon}$$

$$C_\mu = 0.09 \text{ EXP} \left\{ \frac{-3.4}{(1+R_t/50)^2} \right\}$$

$$C_2 = 1.92 [1 - 0.3 \text{ EXP}(-R_t^2)]$$

$$C_1 = 1.44$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

방정식 (1)~(6)에서 Low Reynolds number $k-\varepsilon$ turbulent model 에 관한 정의식 및 실험상수값은 Launder-Sharma 가 제안한 정의식 및 실험상수값들을 사용하였다.⁴⁾

식 (4)~(5)에서 밑줄친 항은 일반적으로 많이 사용되는 $k-\varepsilon$ 모델 방정식에는 없는 추가항이다. 다른 $k-\varepsilon$ 모델에서는 벽면에서의 난류에너지소산율을 해결하기 위하여 Wall function 이나 벽면에서의 법선구배가 0 이라는 조건을 사용하게 된다. 그러나 본 연구에서와 같이 복잡한 재순환 유동의 경우에 벽면효과로서 Wall function 조건을 사용하면 계산이 복잡하게 되므로 식 (4)와 식 (5)에 추가항으로 도입함으로써 벽면에서의 난류에너지소산율(ε)을 0 으로 줄 수 있도록 하였다. 이때 그 추가항은 난류에너지소산율(ε)을 벽면에서 0 이라고 경계조건으로 준 것에 대한 보정항 역할을 하게 된다.⁵⁾

2.3.2 경계조건

경계조건으로 속도 u, v 는 벽면에서 점착조건 (no-slip condition) 을 적용하였고 난류운동에너지(k)와 난류에너지소산율(ε)에 대해서는 벽면값을 0 으로 주었다. 고체 영역에 해당되는 블럭 부분들은 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식, 난류에너지소산율 방정식을 푸는 경우에 확산계수를 무한대 값으로 주었다. 또한 입구조건으로 유량 85 m³/h, 170 m³/h 을 기준으로 계산된 속도가 입구단면에 수직하게 균일 분포로 들어오며 Murakami 등이 측정한 값으로 입구의 난류운동에너지와 난류에너지소산율 ($k_{in} = 0.025 V_{in}^2, \varepsilon_{in} = k_{in}^{3/2}/\ell, \ell = 0.5L$) 을 취하였다.⁶⁾ 출구 경계조건으로는 모든 출구 단면의 압력값을 출구 단면에 따라 균일하게 모든 출구에 0 Pa 의 값으로 주었다. 0 Pa 은 물리적인 진공이란 의미가 아니며 실내공간에서의 상대적인 기준 압력값을 의미한다. 또한 출구에서의 속도, k, ε 에 관한 경계조건은 Neumann 조건을 사용하였다.

2.3.3 입자 운동방정식

입자가 유동을 따라 운동할 때 입자의 궤적이 유동에서 벗어나는 요인은 다음의 세가지가 있다.

- 1) 중력에 의한 침강 ($\rho_p > \rho_{air}$)
- 2) 관성에 의한 이탈 (유선이 곡률을 가질 때)
- 3) 확산 ($d_p < \lambda$)

이중 일반적 장방형 공간내에서 얻어지는 유동조건과 입자크기를 고려할 때 침강이나 확산의 영향은 관성의 영향에 비해 무시할 수 있을 만큼 작다. 따라서 본 연구에서는 입자의 궤적이 관성에 의해서만 지배받는 것으로 해석하였다.

Stokes 법칙에 Cunningham 보정계수를 적용하면 입자 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} (u - u_p) \quad (7)$$

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \rho_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{3\pi\mu d_p}{C_c} (v - v_p) \quad (8)$$

식 (7), (8)을 입구폭(L), 입구속도(V_{in}) 및 시간(L/V_{in})을 사용하여 무차원하면,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{N}{Re} \left(u - \frac{dx}{dt} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{N}{Re} \left(v - \frac{dy}{dt} \right) \dots\dots\dots (10)$$

여기서,

$$N = \frac{18 \rho L^2}{\rho_p d_p^2 C_c}$$

$$C_c = 1 + \frac{0.1064}{d_p} (1.257 + 0.4 e^{-10 \cdot 34 d_p})$$

$$Re = \frac{\rho V_{in} L}{\mu}$$

3. 수치해석

3.1 SIMPLER 알고리즘

전체 계산영역은 많은 제어체적으로 분할되어 엇갈린 격자망(staggered grid)방법, 그리고 제어체적의 공식화(control volume formulation) 방법에 의하여 이산화 방정식(discretization equation)이 얻어진다. 이 이산화 방정식들은 SIMPLER(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation Revised) 알고리즘에 의하여 풀려진다.⁷⁾

일반적으로 운동량 방정식을 풀기 위하여 경계조건으로서 속도값이나 유동 출구에서의 속도에 관한 Neumann형의 경계조건이 필요하다. 그러나 B형과 같이 다수의 출구가 있는 경우, 속도에 관한 자료를 얻기 위해서 실험을 해야하는 어려움이 있다. 이 어려움을 해결하는 방안이 압력 경계조건으로 압력값은 스칼라양이므로 벡터량인 속도값에 비하여 실험적인 측정이 간단하기도 하며 다른 여건에 의해 정의되기 편리하기 때문에 실제 물리적인 문제의 경계조건으로 쉽게 이용할 수 있다. 본 연구에서는 SIMPLER 알고리즘이 응용된 기존 2차원 타원형 프로그램을 수정하여 속도 경계조건 혹은 압력 경계조건이 모

두 부여될 수 있는 범용 수치해석 방법을 사용하였다.⁸⁾

3.2 유동해석 프로그램

타원형 2차원 편미분 방정식은 비정상항(unsteady term), 대류항(convective term), 확산항(diffusive term), 생성항(source term)으로 대별될 수 있으며 비정상항, 대류항, 확산항은 주 프로그램에서 계산하고 생성항은 사용자 프로그램에서 계산하였다.

3.3 입자유동 방정식 흐름도

입자를 수반하고 유동하는 유체는 입자량이 많을 때는 입자에 의해 유동장이 많은 변화를 받는다. 그러나 질량비로 1/1000 정도 이하의 입자를 수반할 때에는 유체 유동은 입자에 의해 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 본 연구에서는 오염물질은 실내 공기 유동을 방해하지 않는다고 가정하였다. 입자의 초기 속도를 정지상태로 놓고 입자 운동방정식을 4차 Runge-Kutta method를 이용하여 풀면 미소시간 Δt 동안에 이동한 입자의 새로운 위치와 속도를 결정한다. 블록부분을 제외한 계산영역내의 입자 1518개(33×46)의 초기 위치를 변경시켜 가면서 시간에 따라 입자들을 추적하여 입자들이 벽에 부착, 순환 및 배출하는지를 판별한다. 입자들이 균일하게 분포하고 있다고 가정하여 부착 입자비율 ϕ_w , 순환 입자비율 ϕ_c 및 배출 입자비율 ϕ_e 을 식(11)과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \phi_w &= A_w / A \\ \phi_c &= A_c / A \\ \phi_e &= A_e / A \\ A &= A_w + A_c + A_e \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

여기서,

- A_w 는 부착입자들의 제어체적합
- A_c 는 순환입자들의 제어체적합
- A_e 는 배출입자들의 제어체적합

3.4 격자망 선정

본 수치계산에서 채택한 42×48 격자분포

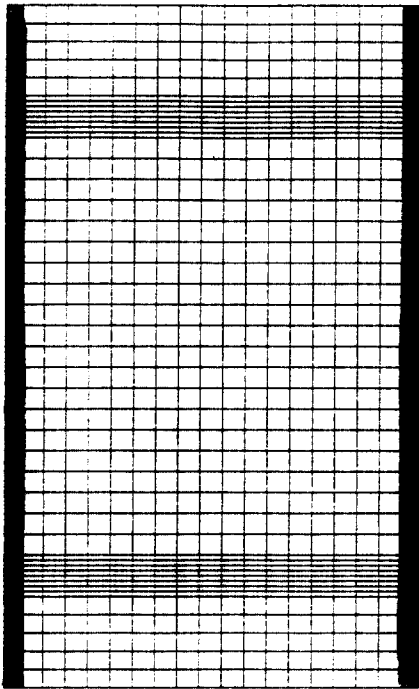


Fig. 2 Grid illustration (Type A)

를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 압력 경계 조건을 사용한 출구 경계면에 접한 제어체적은 아주 얇게 설정된 크기이므로 거의 나타나지 않았다. 또한 속도구배가 클 것으로 예상되는 지역은 조밀한 제어체적을 배치하였다.

3.5 해의 수렴

본 수치계산에서는 층류를 먼저 풀어서 어느 정도 수렴된 u, v, P 값을 난류 계산의 초기값으로 취했으며, 수렴성을 향상시키기 위하여 하향 이완계수 방법(Under-relaxation factor method)을 사용하였다. 층류로 계산시 u, v 및 P 에 대한 이완계수는 각각 0.3, 0.3 및 0.5로 하였다. 난류로 계산시에는 $u, v, P, k, \epsilon, \mu_t$ 의 이완계수는 각각 0.1, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1, 0.5로 하여 수렴해를 얻었으며 입자 운동 궤적은 u, v 가 완전히 수렴된 후에 계산하였다. 일회 반복 계산마다 해의 수렴성을 알기 위하여 제어체적으로 들어오는 유량과 나가는 유량의 차이를 조사하였으며 그 오차가 10^{-4} 이하이고 속도 u 또는

v 등의 주요 변수값들이 반복 계산하는 동안에도 유효 5 자리 안에서 30 여회 이상 변하지 않을 때의 값을 수렴값으로 간주하였다.

4. 결과 및 고찰

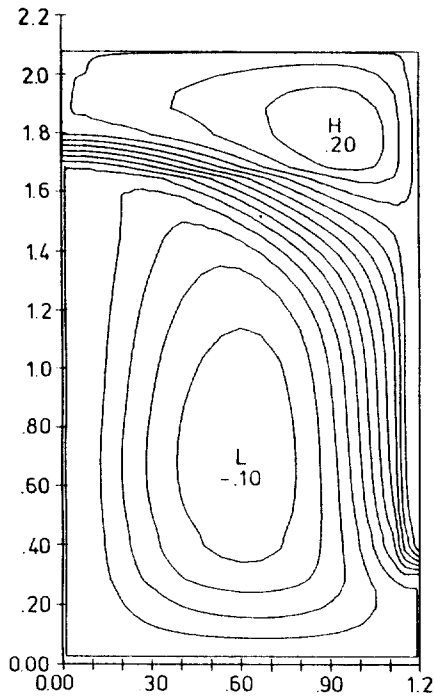
본 연구에서는 장방형 공간 A, B 및 C형에 대하여 형태에 따라 입구속도를 2 가지로 변화시켜 각 유동장의 특성 및 입자의 거동을 해석하였다. 특히 입구속도의 크기가 커서 계산영역의 유동장이 층류조건 이상이므로(최하 레이놀즈수) 난류방정식을 도입하였으며 계산은 Cyber 860/180 컴퓨터를 사용하여 한 형태에 대하여 CPU 시간이 약 10000 초 가량 되었으며 입자 운동 계산시 입자크기 및 레이놀즈수에 따라 약 2000-3000 초 소요되었다.

본 항에서는 계산된 유동장의 특성 및 압력 분포도를 검토하고 또한 계산된 유동장에서 입자의 크기를 변화시켜 각 입자가 움직이는 형태 및 입자거동을 고찰하고자 한다. 또한 유동장의 표현은 contour 및 surface를 사용하였는데 3차원 그림인 3D surface는 각각 변수의 크기를 입체적으로 표현할 수 있어 임의의 변수값을 해석하는 매우 유용한 것으로 판단된다.

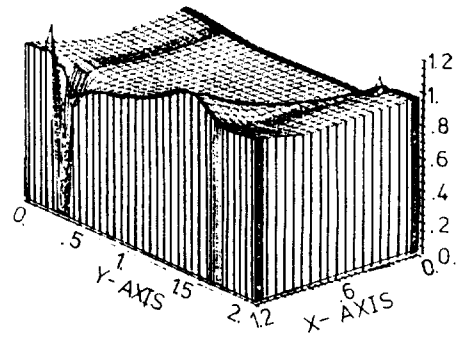
4.1 유동장에 대한 고찰

본 항에서는 각 장방형 공간(A형, B형, C형)의 형상에 따라 유동특성을 분석하였다.

Fig. 3은 A형상 실내에서 입구속도 V_{in} 이 0.925 m/s 일 때 유선 및 압력장을 나타낸 것이다. 유선분포는 주유동과 주유동의 아랫부분 및 상부 오른쪽에서 재순환 유동(recirculation flow)이 생성되며 유량의 상대적 세기는 주유동(main flow)에서 크게 나타나고 상부가 하부보다 2배 가량 큰데 비하여 영역(zone)의 크기는 정반대가 된다. 압력장 그림을 살펴보면 입구상부, 주유동과 상부 재순환 유동사이, 출구하부 벽면에서 벽면효과(wall effect)에 의한 압력이 형성되어 재순환유동이 발생되며 이는 정체영역(flow stagnation)이 발생함을 알 수가 있다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 조건하에서 입구속도를

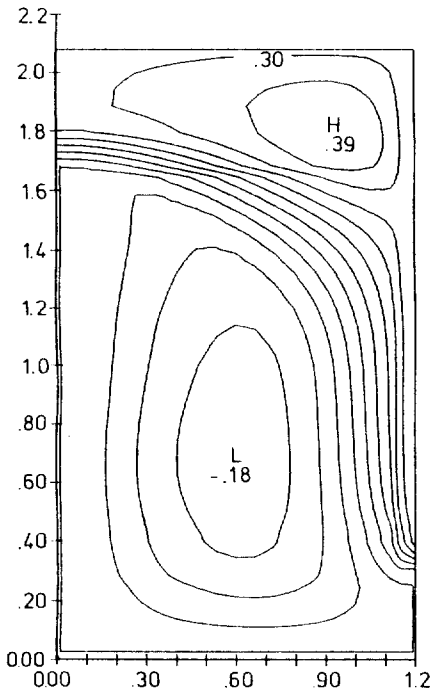


(a) Streamlines

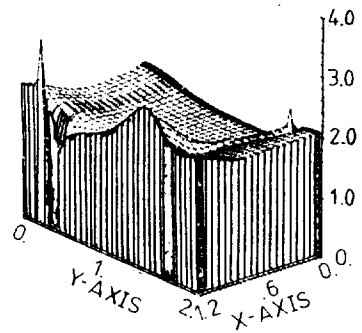


(b) Pressure field (unit:Pa)

Fig. 3 Contour and Pressure field of type A chamber ($V_{in} = 0.925 \text{ m/s}$)



(a) Streamlines



(b) Pressure field (unit: Pa)

Fig. 4 Contour and Pressure field of type A chamber ($V_{in} = 1.85 \text{ m/s}$)

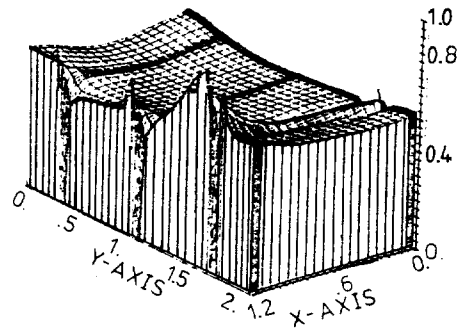
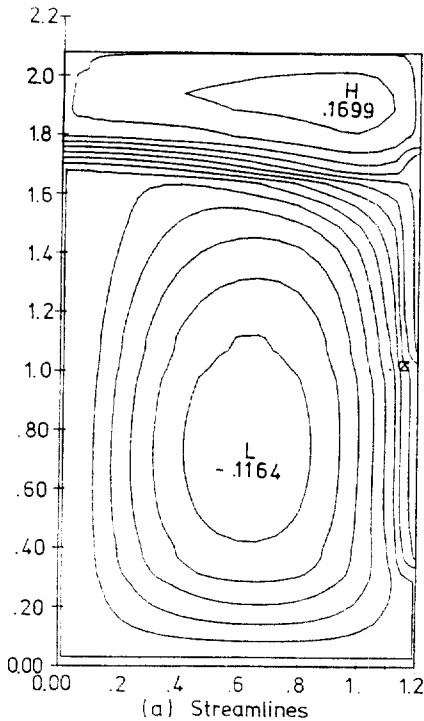


Fig.5 Contour and Pressure field of type B chamber ($V_{in} = 0.925 \text{ m/s}$)

2배로 했을 때의 유선 및 압력장 분포이며 유선분포는 상부 및 하부에서 재순환 영역이 입구속도 크기가 증가함에 따라 약간 줄어들을 수 있으며, 전반적으로 $V_{in} = 0.925 \text{ m/s}$ 일 때와 같은 양상을 보인다. 또한 입구와 출구사이의 압력강하 (pressure drop)는 속도가 2배로 증가할 때 1 Pa에서 2 Pa로 대수적으로 비례한다.

Fig.5는 B형 공간으로 입구가 1개이고 출구가 3개인 형상에서 입구속도 $V_{in} = 0.925 \text{ m/s}$ 일 때 유선 및 압력장 분포를 나타낸 것이다. 유동분포는 A형과 비슷한 양상을 보이며 특히 재순환 유동은 A형과 같이 상하부 각각 하나씩 생기며 재순환 영역은 커지는 양상이며 특히 하부에서는 더욱 커진다. 압력분포는 출구를 제외한 전 영역에서 압력 분포는 일정하며 출구에서는 구배가 크다는 것을 보여주며 A형과 마찬가지로 입출구 주위에 정체영역이 생성됨을 알 수가 있다.

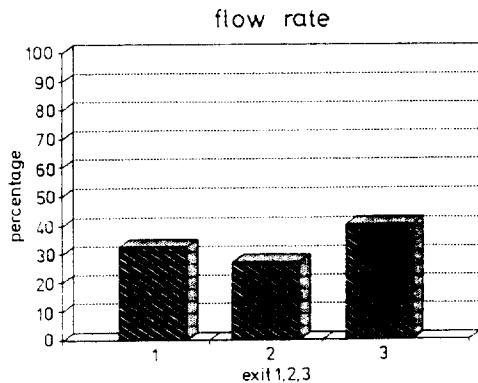


Fig.6 Flow rate distribution of type B chamber ($V_{in} = 0.925 \text{ m/s}$, $V_{in} = 1.85 \text{ m/s}$)

Fig.6은 출구 EXIT 1, EXIT 2 및 EXIT 3에서 $V_{in} = 0.925 \text{ m/s}$ 및 $V_{in} = 1.85 \text{ m/s}$ 일때 각 출구단면으로 빠져 나가는 유량 (flow rate)의 분포이며 EXIT 3에서 유량이 많이 빠져 나가고 EXIT 2에서 유량이 적으며 상대적으로 EXIT 1이 EXIT 2 보다 큰 이유는

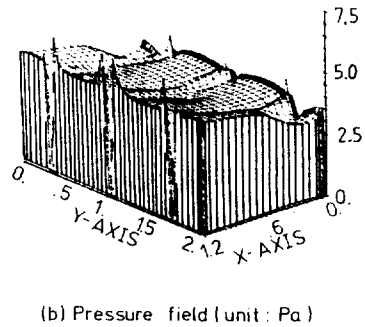
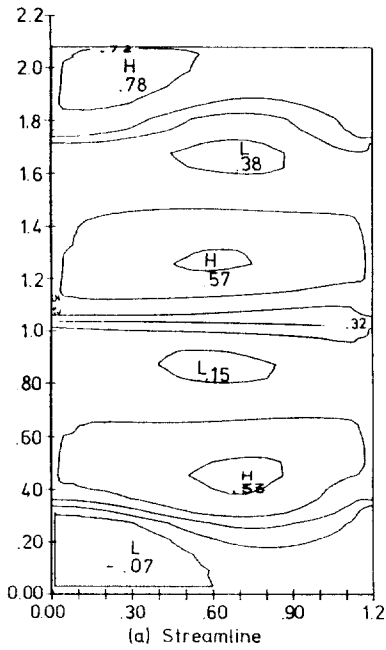


Fig.7 Contour and Pressure field of type C chamber ($V_{in}=2.8\text{m/s}$)

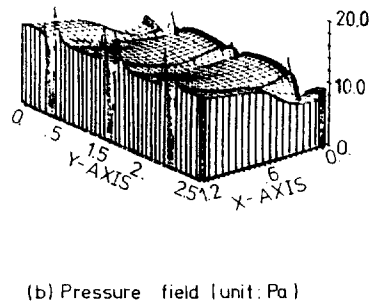
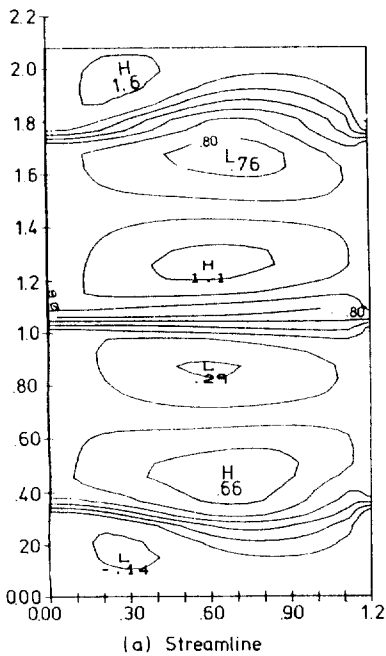


Fig.8 Contour and Pressure field of type C chamber ($V_{in}=5.6\text{m/s}$)

벽면효과로 재순환 영역부근의 압력생성이 유동이 밀고 들어오는 것을 견제함과 동시에 속도성분을 크게 해주는 작용을 하기 때문이고, 또한 입구속도가 2배로 증가해도 유선 및 압력장의 전반적인 변화가 없기 때문에 유량분포가 같다고 판단된다.

Fig.7은 C형 공간으로 입구가 3개이고 출구가 3개인 형상에서 입구속도가 $V_{in}=2.8$ m/s일 때 유선 및 압력장 분포를 나타낸 것으로 재순환영역은 상하부 $X=0.15$ 점 부근 및 중간 4개부분에 형성되며 상하부 주유동은 각 벽면의 영향에 의하여 굴절되는 반면 중간 주유동은 직선으로 중간출구로 빠져 나간다. Fig.8은 속도를 2배로 했을 때의 유선 및 압력장 분포로서 Fig.7에 비하여 유선 크기는 증가하나 재순환영역은 약간 감소함을 알 수 있다. Fig.3과 Fig.7을 비교해보면 C형이 A형보다 약 5배의 큰 압력강하를 보이는데 이것은 고속의 정화공기가 유출면적이 작은 다수의 출구로 빠져 나가기 위해서 큰 압력강하 현상이 나타나기 때문이다.

이로부터 압력차이가 크기 때문에 송풍기 용량 및 운전에너지가 많이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4.2 입자운동에 대한 고찰

입자운동은 속도장이 형성된 일정한 공간 내에서 각 입자의 크기나 레이놀즈수에 따라 입자가 유선곡률의 영향에 따라 움직이는 일종의 입자 random trajectory 이다.

본 연구에서는 입자크기, 레이놀즈수 변화량 및 시간경과(time marching)에 따라 분포되어 있는 각 입자가 벽면에 부착, 순환 및 출구쪽으로 빠져 나가는 현상을 파악하였다. 이는 실내에 오염물질이 균일하게 분포되어 있을 때 입자거동의 분포 변화량을 파악하여 기초설계를 위한 정량적 분석방법을 제시하는데 목적이 있다.

Fig.9는 $Re=7460$ 일 때 무차원변수 $N=10^4$, $N=10^6$ 에 대하여 각각 $0 \leq t \leq 300$ 동안 일어나는 입자의 거동상태를 A형에 대하여 입자계적으로 나타낸 것으로 $N=10^4$, N

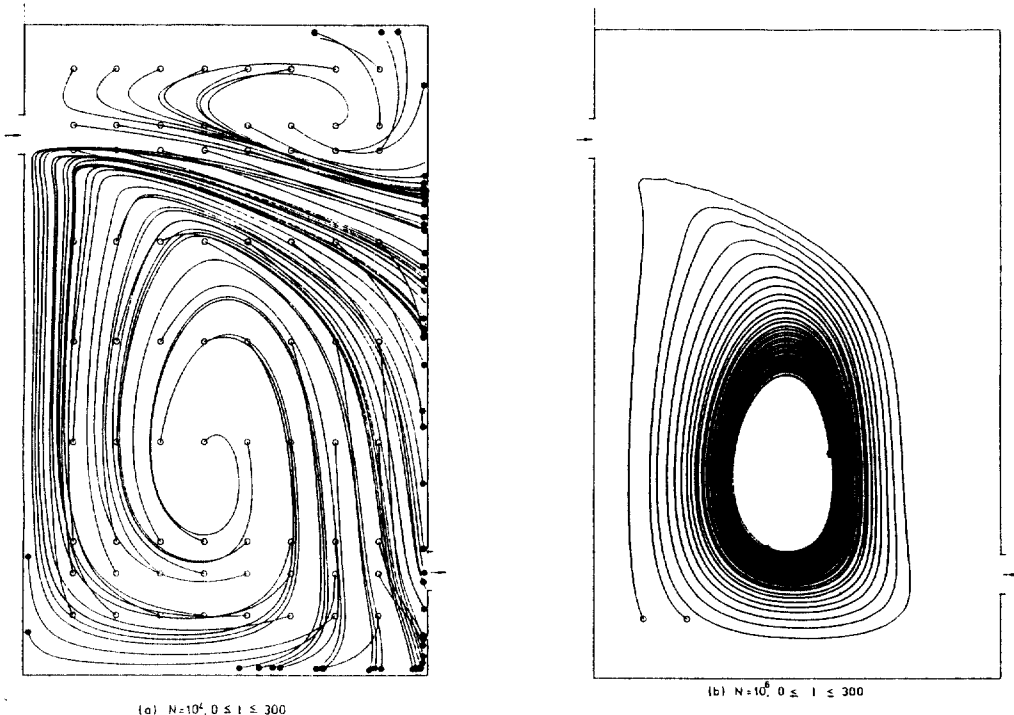


Fig.9 Particle trajectory (Type A, $Re=7460$)

= 10^6 의 의미는 실제적으로 A형 공간에 부유하는 입자직경이 각각 수백 μm , 수십 μm 이하를 말한다. $N = 10^4$ 경우 A형 유선분포와 비슷하나 유선곡률 및 속도장이 큰 부분에서 입자의 관성에 의하여 입자가 유선을 이탈하여 벽에 부착된다. 곡률 및 속도장이 작은 부분에서의 입자는 유선을 따라 움직이다가 속도가 큰 주유동에 포획되어 벽에 부착하는 현상을 보여준다. 벽에 부착하는 대부분의 입자는 벽면효과로 압력이 형성되는 영역 즉 최종적으로 속도장이 거의 없는 유동 정체영역으로 모여, 입자크기가 줄어들면서 ($N = 10^4 \rightarrow 10^6$) 재순환영역에서의 입자는 일정한 궤도(orbit)로 형성하면서 유선을 따라 흐른다.

Fig. 10은 A형에서 시간변화에 따라 유동장 전체의 입자가 배출, 부착 및 순환되는 양을 면적비에 따른 각각의 퍼센트로 나타낸 것이다. $N = 10^4$ 경우 속도 증가에 따른 관성력 때문에 입자가 유선을 이탈하므로 입구속도 $V_{in} = 0.925\text{m/s}$ 일때의 순환 입자량은 입구속도 $V_{in} = 1.85\text{m/s}$ 보다 많아지나 상대적으로 벽면에 부착되는 양은 줄어드는 것을 알 수 있으며 이때 배출되는 양은 거의 같다는 것을 보여준다. 입자크기가 줄어들면 ($N = 10^6$)에 따라 입자순환량이 상당히 커지는 반면 벽면 부착입자량은 급격히 줄어들고 또한 배출량이 커지는 것을 그림(b)에서 볼 수 있으며 이는 재순환 영역에서는 영역내의 모든 입자가 한 궤도안에 모이고 입자가 유선을 벗

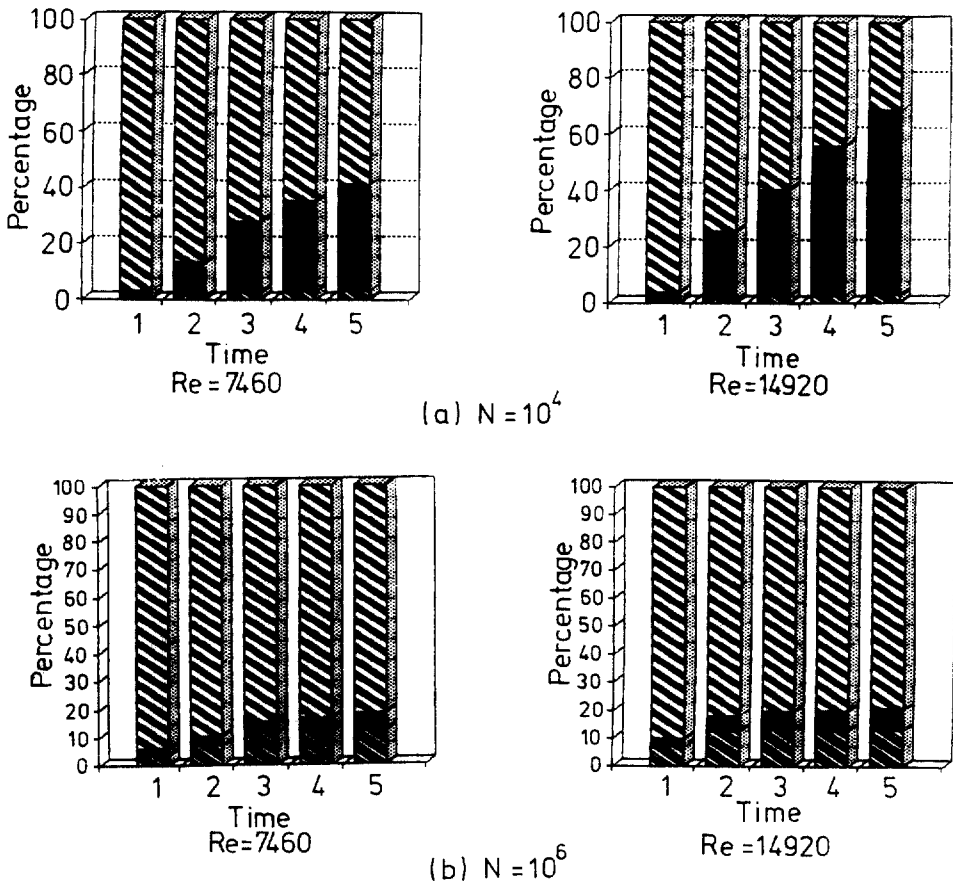


Fig. 10 Particle distribution in type A chamber
 (Circulation, Wall, Exhaust)

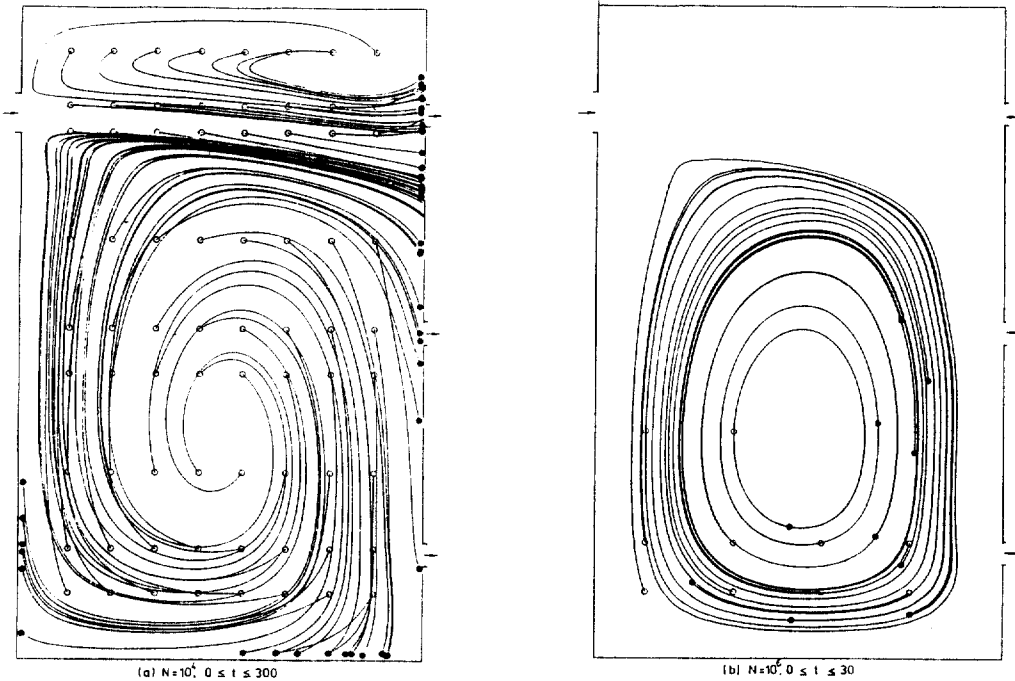


Fig. 11 Particle trajectory (Type B, $Re=7460$)

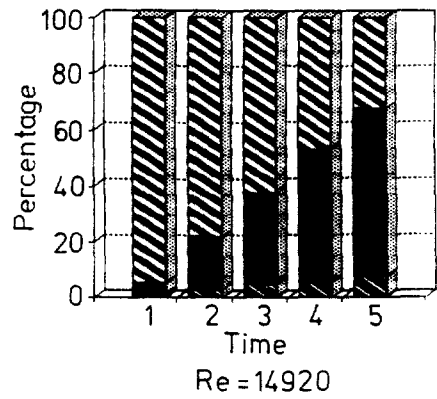
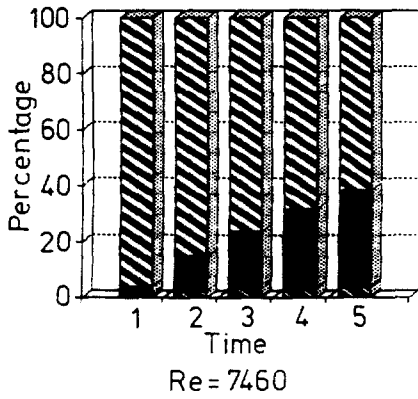
어나지 못하여 주유동을 따라 거동하므로 배출입자가 증가하는 현상으로 파악할 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 9와 같은 조건에서 B형 공간내 입자궤적을 나타낸 그림이다. Fig. 5를 살펴보면 출구 각각 근접부위에서 유동정체영역이 형성되어 있으며 특히 EXIT 3 바로 아래에서 정체영역이 넓고 크기가 크게 나타나 있으며 EXIT 3 바로 윗부분에서는 정체영역이 작아지나 크기는 거의 같은 수준으로 나타나는 것을 보여준다. Fig. 11(a)에서 보듯이 벽면에 붙는 입자는 EXIT 3 벽면 주위에서 매우 많은 양의 입자가 부착되어 있으며 각 출구 주위에 어느 정도의 양이 부착되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 상부 재순환 영역에서는 입자 관성 크기 때문에 입자가 순환하지 못하고 벽에 붙거나 출구로 빠져 나가는 현상을 볼 수 있으며 하부 재순환 영역에서도 입자가 어느 정도 유선 곡률을 따라 움직이다가 곡률이 큰 부분에서 유선에서 이탈하는 현상을 볼 수가 있다. Fig. 11(b)는 시간제한 및 입자크기를 줄였을 때 입자궤적을 나타낸 것

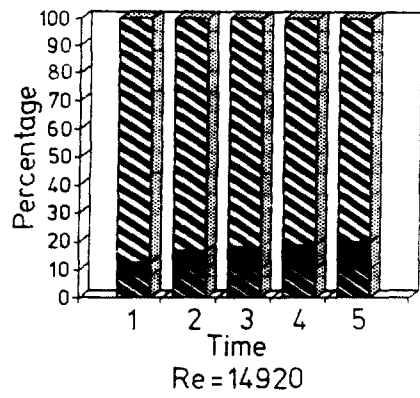
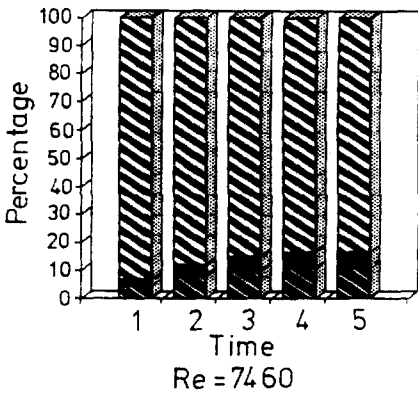
으로서 초기입자들은 시간이 경과하면서 유선을 따라 흐르다가 결국에는 재순환영역의 중심점에서 일정한 거리를 가진 궤도를 형성하면서 모이게 될 것을 예상할 수 있다. 이는 Suzuki가 지적했듯이 입자의 거동은 유선곡률의 크기, 입자크기 및 레이놀즈수가 지배한다는 사실을 알 수가 있다.¹⁰⁾

Fig. 12는 B형에서 입자의 분포량을 나타낸 것이다. A형의 입자분포량과 마찬가지로 입구속도가 큰 경우 벽면부착 입자량이 커지는 반면 순환입자량은 적어지는 것을 알 수 있으며 입자 크기가 작아질수록 입자가 유선을 따라 유동하므로 순환량 및 배출량이 눈에 띄게 많아짐을 보여준다.

Fig. 13은 $Re = 12800$ 이고 나머지 조건은 위와 같은 조건의 C형에서 입자 거동상태를 나타낸 것으로 그림(a) 경우 대개의 입자가 벽에 붙거나 출구쪽으로 빠져 나가고 벽면에 부착되는 대부분의 입자는 유동정체영역으로 모이는 것을 알 수 있다. 재순환영역에서의 입자궤적은 초기 입자 위치가 $X=1.2$ 벽면에



(a) $N = 10^4$



(b) $N = 10^6$

Fig.12 Particle distribution in type B chamber

(Circulation, Wall, Exhaust)

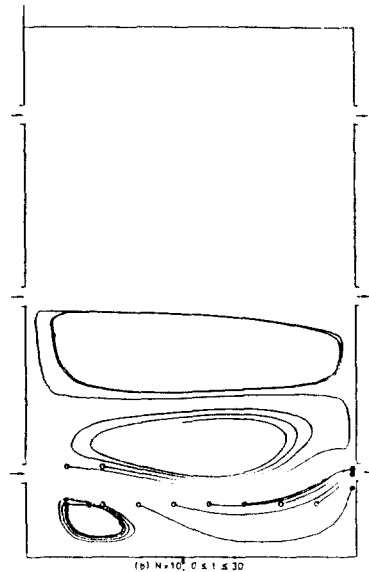
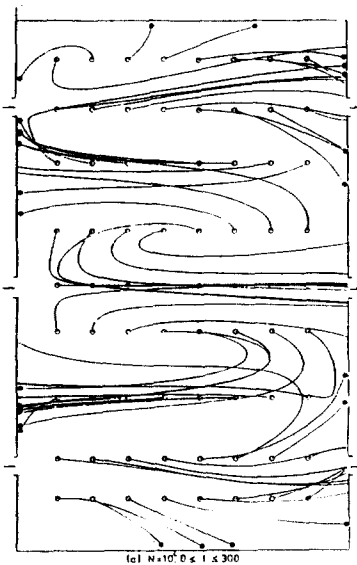


Fig.13 Particle trajectory (Type C, Re=12800)

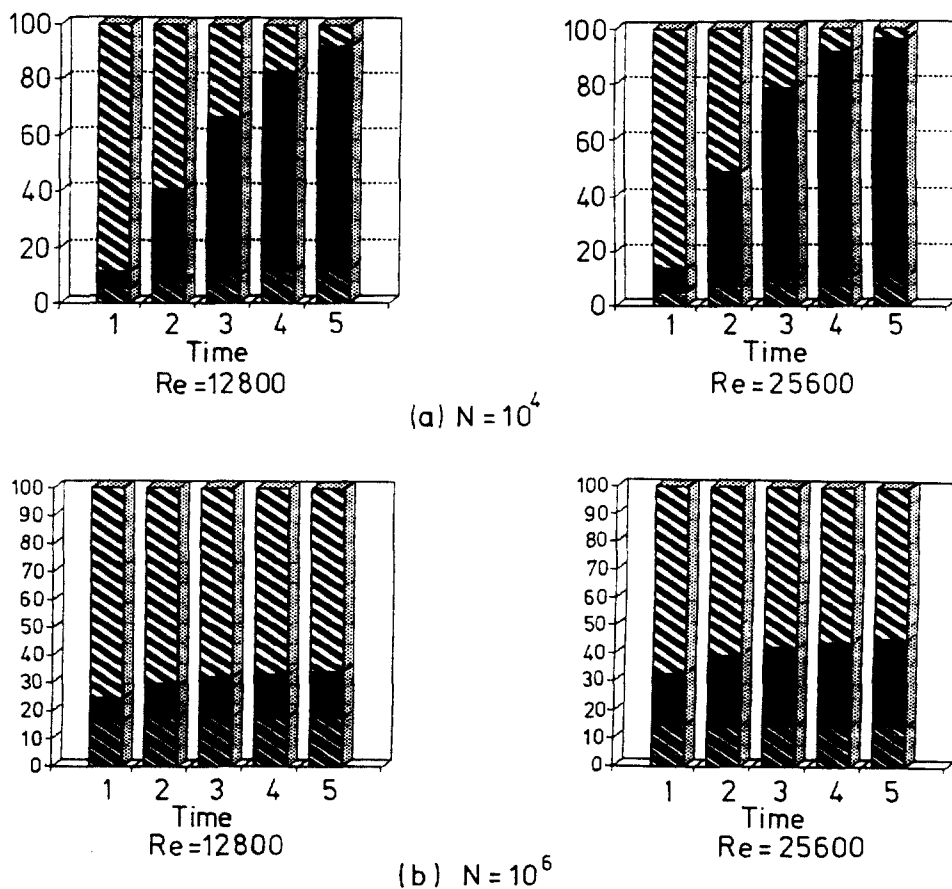





Fig.14 Particle distribution in the type C chamber ( Circulation,  Wall,  Exhaust)

가까운 부분은 $X=0$ 벽면주위로 입자가 모이며 $X=0$ 벽면에 가까운 초기입자는 $X=1.2$ 벽면으로 모이거나 출구로 빠져 나가는 것을 알 수 있다. 이는 입자가 유선을 따라 흐르다가 곡률 및 속도가 큰 부분에서 입자관성에 의하여 입자가 이탈하는 것을 보여준다. 그림 (b)는 $N=10^6$ 일 때 입자궤적을 나타낸 그림이다. 앞서서도 언급하였듯이 좌측 구석 주위에 형성되는 재순환영역에서 주위입자가 한 궤도를 형성하면서 모이게 되는데 $N=10^4$ 일 경우는 이와같은 현상을 파악할 수 없었다. 이는 입자관성이 유선을 이탈할 정도의 크기가 되지 못한다는 사실을 알려준다. 또한 재순환유동이 근접한 부분에서도 입자가 상대측 재순환영역으로 포획될 수 있다는 것

을 그림에서 보여주며 입자가 매우 작아지면 이와 같은 현상은 줄어들 것으로 예상할 수 있다.

Fig.14는 C형에서의 입자량 분포로서 입구속도에 관계없이 배출, 순환, 부착되는 입자분포량이 거의 일정하며, 특히 순환입자비율이 작아지는 것을 알 수 있는데 이는 입자관성이 계산 유속 변화 범위내에서는 유선을 벗어날 만큼 크기 때문에 나타나는 현상이며 유동의 재순환 세기가 주 유동에 비하여 그다지 크지 않다는 사실을 알 수 있다. $N=10^6$ 경우 재순환영역이 $V_{in}=2.8\text{m/s}$ 일때가 입자순환량이 크며 입구속도 $V_{in}=5.6\text{m/s}$ 일 때는 상대적으로 벽면 부착입자량이 크다는 것이 그림 (b)에 나타나 있다. 입구속도가 클

수록 벽면부착 입자량이 커지는 것은 입자의 관성 영향에 의한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

오염된 실내에서 Low Reynolds number turbulent model 을 도입하여 유체유동 및 오염물질의 거동을 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 입구 및 출구조건의 변화에 따른 입자의 형상에 대한 유동 및 입자크기에 따른 오염입자 거동현상을 정량적으로 분석할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다.

2) 순환 입자는 와류역의 한 궤도에 모이며 대부분의 부착입자는 체류역에 부착된다.

3) 무차원 변수 N 이 작을수록(입자가 수백 μm 이상) 관성에 의해 벽에 부착하는 비율이 많고, N 이 클수록(입자가 수십 μm 이하) 유선을 따라 유동하며 입자거동은 유선을 따라 유동하며 입자거동은 유선곡률, 레이놀즈수에 영향을 받는다.

4) A형, B형 및 C형 모두 체류역 및 와류역이 발생되어 오염물질 배출에 좋지 않으나 다수의 입·출구가 있는 C형의 형태가 상대적으로 오염물질 배출에 좋은 결과를 보였다.

5) 정량적인 분석을 위해서는 시뮬레이션과 함께 모델실험을 통한 비교분석 연구가 수반되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Erskine 외, 1970, "Improved Entry System for CB Protective Shelters", AD880916, pp. 122-124.
2. B.E. Launder & D.B. Spalding, 1972, "Mathematical Models of Turbulence", Academic Press, London.
3. Launder, Spalding, 1974, "The numerical Computation of Turbulence Flow", Computer Method in Applied Mechanic & Engineering, Vol. 3, pp. 269-289.
4. Launder, Sharma, 1974, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", Letters in Heat & Mass Transfer, Vol. 16, pp. 131-138.
5. Jones, Launder, 1973, "The Calculation of Low-Reynolds Number Phenomena with a Two Equation Model of Turbulence", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 16, pp. 1119-1130.
6. Murakami, Kato, Oowada, 1986, "Numerical Simulation on Natural Ventilation in Large-Scale Indoor Space with Pressure Type Boundary Condition", 6th. proceedings of JACA, pp. 558-565.
7. Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer & Fluid Flow", McGraw-Hill, New York.
8. 이재현, 1988. "2 차원 비압축성 점성유동에 나타나는 압력 경계 조건의 해결 방안", 대한 기계학회 논문집, Vol.12, No.4 pp. 926-933.
9. Patel, Rodi, Scheuerer, 1985, "Turbulence Models for Near-wall & Low Reynolds Number Flow; A Review", AIAA J., Vol. 23, No. 9, pp. 1308-1319.
10. Suzuki, Hasegawa, Matsufuji, 1988, "Movement of Small Particles Caused by an Air Flow in a Chamber", Int. J. JSME., Vol. 31, No. 2, pp. 234-241.