

<論 文>

작업대가 있는 청정실내의 유동특성에 관한 연구

이 재 현* · 이 진 원** · 이 상 렬***

(1986년 7월 12일 접수)

A Study of Flow Characteristics in a Clean Room with Work Table

Jae-Heon Lee, Jin-Won Lee and Sang-Ryul Lee

Key Words: Clean Room(청정실), Total Vertical Laminar Flow System(전면수직 층류방식), Flow Field Numerical Anyalysis(유동장 수치해석)

Abstract

The effect of placing a worktable in a vertical laminar flow clean room is investigated by a numerical simulation. The model clean room is assumed to be a rectangular square of 2m×2m, in which a worktable of 0.8m long and 0.1m thick is located at 0.7m above the floor. Major parameters are the horizontal position of the table and the inlet flow velocity.

The flow is assumed to be laminar throughout the clean room. Navier-Stokes equations with the pressure terms are directly solved by the SIMPLE algorithm. Boundary conditions at the two exits are given in terms of pressure conditions.

The flow pattern, pressure loss due to viscous friction, the ratio of flow rates through each exit and pressure imbalance at the exits are calculated. All of the flow characteristics are seen to vary substantially with the location of the table, but are quite insensitive to the inlet flow velocity(Reynolds number). As an example, the flow rate through each exit can vary by as much as 30% depending on the location of the table.

기 호 설 명

A : 차분식의 상수, 혹은 면적
b : 생성항
F : 부하계수 (loading factor)
G : 좌측벽면과 작업대좌단사이의 간격
I : 판성수

L : 특성길이 (유입구의 폭)
M : 실내의 입자 및 공기의 질량
m : 유량
P : 압력
r : 입자의 반경
Re : Reynolds 수 (= |*V_{IN}**| · *L* / ν)
u, v : *x* 및 *y* 방향의 무차원 속도
U : 특성속도 (3.1절)
*V_{IN}** : 유입속도

* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과
** 정회원, 한국과학기술원 기계공학부
*** 정회원, 한양대학교 대학원

- x, y : 무차원 직교 좌표계
- ϕ : 일반적 종속변수
- λ : 유량비 ($=m_R/m_L$)
- μ : 점성계수
- ν : 동점성 계수
- ρ : 밀도
- τ : 특성 반응시간(3.1절)

상 첨 자

- : 평균값
- *
- ' : 출구직전의 격자점

하 첨 자

- AVE : 좌측과 우측 유출구의 평균값
- f : 유체
- IN : 유입구
- L : 좌측 출구
- max : 최대값
- nb : 격자점에 이웃하는 격자점
- p : 격자점
- R : 우측 출구
- S : 입자

1. 서 론

제 2 차 세계대전 이전부터 항공기 등의 정밀장치에 사용되는 베어링이나 치차등의 파괴 및 고장의 원인이 이를 제작하는 장소의 먼지 오염에도 있음을 인식하고 이러한 오염의 제어에 관한 관심이 시작되었다. 이렇게 시작된 청정실(Clean Room)의 개념은 세계대전을 거치면서 많은 발전을 이룩하였다. 초기에는 병기 혹은 우주선의 부품생산을 위한 청정실이 중요 대상이었으나 이후 수술실, 청정병실, 생물실험실, 식품공장, 제약공장 및 유전공학 실험실 등을 위하여 공업적인 청정실기술이 도입되었다. 최근에는 산업의 발달에 따라 제품의 미소화, 정밀화, 고품질화 및 고신뢰도가 요구되어 이를 위하여 청정실기술의 개량도 요구된다. 특히 반도체 제조공장 등에서 요구하는 청정도의 질은 계속 높아지고 있다.

청정실 내의 청정도 유지를 위해서 이용되는 실내 공기 유동방식은 수직층류 방식, 수평층류 방식, 난류방식 및 병용방식 등이 있다. 최근에는 높은 청정도의 유지를 위해서 전면 수직층류방식(Total vertical lam-

inar flow system)을 많이 채용하고 있으나 이 방식은 운전비용이 많이 소요되므로 경제성을 높일 수 있는 새로운 방식이 계속적으로 연구되고 있다. 우수한 실내 공기 유동방식을 선택하더라도 단순히 환기회수를 증가시킨다고 하여 제품생산에 필요한 고급의 요구청정도를 얻을 수 있는 것은 아니다. 제품 생산에 필요한 청정도의 달성 및 유지를 위한 원칙은 일반적으로 다음의 4 항목으로 생각할 수 있다.

- (1) 실내로 먼지를 유입시키지 않는다.
- (2) 실내에서 먼지를 발생시키지 않는다.
- (3) 발생한 먼지가 제품에 닿지 않도록 한다.
- (4) 먼지가 어떤 부위에 쌓이지 않게 한다.

여기서 (1)과 (2)의 원칙은 HEPA 필터 혹은 ULPA 필터와 청정의(non-linting uniform) 등으로, 또 (4)의 원칙은 적절한 내장재와 마무리 작업기술의 개발로 그 일부가 해결될 것이다. (3)과 (4)의 원칙의 만족을 위하여는 실내의 공기 유동 패턴을 엄격히 제어하는 일이 필요하다. 청정실에서 문제가 되는 미립자의 거동은 거시적으로 공기의 흐름과 일치되므로 공기유동의 제어가 청정실성능에 미치는 영향은 지대하다고 할 수 있다.

공기 유동 패턴을 제어하기 위한 기술의 발전을 위해서는 실험적인 방법이나 수치해석적인 방법이 사용되고 있다. Kazuya⁽¹⁾ 등과 Hiroyuki⁽²⁾는 전자의 방법으로 Akira⁽³⁾ 등은 후자의 방법으로 연구 발표한 바 있다. 또한 Unno⁽⁴⁾ 등은 청정실의 실내유동 예측을 위하여 치분법의 일종인 MAC⁽⁵⁾ 법을 사용한 바 있다. 청정실내의 유동과 같은 재순환 유동(recirculating flow)이 있는 유동장의 공기유동의 예측을 위하여 모델 실험의 결과로 단순한 차원해석으로 실제 유동장에 확장적용할 수 없으므로 실제 청정실 유동장의 컴퓨터시뮬레이션(computer simulation)에 의한 수치해석 방법이 광범위하게 사용된다.

단순한 기하적 형상의 실내가 아닌 실제 청정실내의 유동 예측을 위한 수치해석 방법에는 많은 어려움이 나타난다. 우선 공기유동을 완벽하게 기술할 수 있는 비정상 3차원 기본방정식의 설정과 이와 연관된 물성치 및 난류도의 변동을 기술하는 수식의 설정에 관한 어려움이 있다. 또한 두개 이상의 입구와 두개 이상의 출구를 가지는 청정실의 기하학적인 형상에 따르는 각 출입구의 압력조건의 만족 방법과 비선형 복합 방정식들의 해를 구하는 방법 등에도 어려움이 따른다. 현재 까지 발표된 청정실 관계의 수치적 연구 결과는 대부분 특정 기하학적 형태를 가지는 청정실 내에서의 유

등형태에만 관심을 보여왔으며 수치연구의 구체적인 방법과 특히 출입구의 압력조건 처리를 위한 기본적인 방법 등에 관한 학술적인 자료가 부족하다.

본 연구에서는 청정실 내부에 하나의 작업대가 유동을 방해하고 있으며, 출구공기덕트가 2개이기 때문에 출구의 평균압력조건은 주어지나 출구속도의 경계조건이 간단히 기술되지 않는 청정실내에서 유동을 예측하고자 하였으며, 수치계산상의 구체적인 방법을 논하였다. 그 결과로서 작업대 위치 및 각 출구에서의 압력 조건에 따른 유동장의 형태 및 각 출구에서의 유출유량 비율등을 논하였다.

2. 이론 해석

Fig. 1은 전면 수직층류 방식을 채용하는 실제 청정실의 개략도이다. 실제로 청정실내에서의 유동은 3차원, 비등온장, 압축성, 날류 등의 특성을 가질수 있으나 이번 연구에서는 일차적으로 2차원, 등온장, 비압축성, 층류 유동장으로 가정하고, 유동장의 내부에 유동을 방해하는 한 개의 작업대가 존재하는 전면 수직층류 방식의 청정실을 모델로 설정하여 수치적인 연구를 수행하였다. 또 실제 청정실에서 바닥을 이루고 있는 출구 격자(exit grid)는 편의상 이번 연구에서는 고려하지 않았다. 전면 수직층류 방식 청정실은 난류강도(turbulence intensity)가 15% 이내로 규정되어지는데 이러한 경우에 층류유동의 가정은 벽면이나 작업대의 매우 인접한 부분을 제외하고는 타당하게 받아들여질 수 있다. 또한 대부분의 청정실은 한쪽 벽의 길이가 다른 두벽의 길이에 비하여 상당히 긴 형태이므로 2차원 유동의 가정이 허용될 수 있다.

청정실내의 공기는 분진입자가 섞여 있으므로 기류의 분포를 엄밀히 예측하기 위해서는 2상 유동(two-phase flow)의 해석방법을 따라야 한다. 그러나 분진

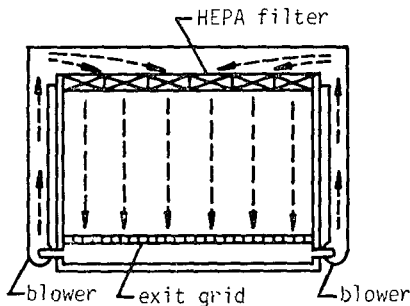


Fig. 1 Schematic diagram of a vertical laminar flow clean room

입자가 기류에 영향을 미치는 정도를 나타내는 부하계수 (loading factor)가 아주 작은 경우에는 단상유동 (single phase flow)의 해석이 가능하게 된다. 여기서 부하계수는 실내의 공기의 전질량에 대한 입자의 전질량의 비율을 나타내며, 실제 청정실의 경우 이 값은 10^{-6} 정도이므로 단상유동의 가정이 용인되고 있다.

실제 청정실의 운전시에는 HEPA 필터를 거친 공기가 유입되므로 유동입구에서 균일한 유입속도를 가정할 수 있다. 그러나 유동출구가 2개인 본 연구에서 선택된 모멘트의 경우에 좌우출구 각각에서의 수치계산 경계조건인 유출속도를 추정하는는 어려움이 있다. 왜냐하면 실제의 청정실에서는 출구경계조건으로 유출속도가 아닌 출구에서의 평균 압력이 주어지는 경우가 대부분이기 때문이다. 그러므로 주어진 출구 평균 압력에 일치되도록 유출 속도 경계 조건을 조정하여야 한다. 이를 위하여 지배방정식의 변환과정 중에 압력항이 보존될 수 있도록 하였다.

또한 대부분의 청정실에서는 유출된 공기가 공기 필터로 재순환되며 이때 실내에서 유출된 공기는 상당히 먼 덕트를 지닌다고 생각할 수 있으므로 출구덕트의 끝 부분에서는 속도 성분의 변동이 거의 없으며 덕트의 진행 방향으로의 속도만 존재한다고 가정한다.

2.1 지배방정식

Fig. 2에는 본 연구에서 선택한 청정실의 모델을 보여준다. 유입구에서는 일정한 y 방향 속도 V_{IN}^* 으로 유량 m_{IN} 의 공기가 유입되며 좌측 출구로 유량 m_L 및 우측 출구로는 유량 m_R 로 분류되어 유출된다.

2차원 층류유동을 기술하는 기본 방정식에서 다음과 같이 무차원 변수를 정의하여 식을 무차원화 시킨다.

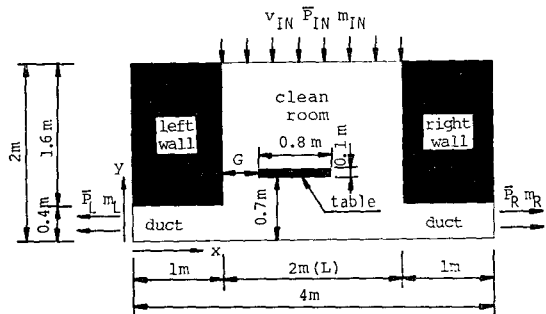


Fig. 2 Schematic diagram of the present investigation

$$x = \frac{x^*}{L}, \quad y = \frac{y^*}{L}, \quad u = \frac{u^*}{|V_{IN}^*|}, \quad v = \frac{v^*}{|V_{IN}^*|}$$

$$P = \frac{P^*}{\rho V_{IN}^{*2}}, \quad Re = \frac{|V_{IN}^*| \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

여기서 *는 유차원 값을 나타낸다.

무차원화된 연속방정식과 운동량방정식은 아래와 같다

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

경계조건으로서는 청정실의 벽면과 작업대의 벽면에서 속도를 영으로 두고(no-slip condition), 아울러 유동입구와 출구에서는 아래식과 같은 조건을 준다.

유동입구에서 : $u=0, v=-1$ (5)

유동출구에서 : $\frac{\partial u}{\partial x}=0, v=0$ (6)

2.2 출구 압력조건에 부합되는 출구속도 경계조건에의 결정

출구의 압력조건이 정해져 있는 경우의 물리적인 상황에서는 실내유동장의 형태는 유일하게 결정되며 아울러 출구의 속도조건도 유일하게 결정된다. 더우기 출구압력은 운동량 방정식의 수렴된 해가 얻어짐과 동시에 결정되므로 주어진 출구압력 조건을 만족시키기 위해서는 여러개의 Dirichlet 형 속도 경계조건을 이용하여 계산된 출구압력 경계조건을 주어진 압력경계조건과 비교해 보는 시행착오(trial and error) 방법을 사용하여야 한다. 물리적인 의미에서 출구압력 조건의 변화는 각 출구에서 유출되는 유량의 변동을 수반하므로 각각의 출구에서 유출되는 유량의 비율을 조정함으로써 주어진 압력조건에 근접시킬 수 있다.

운동량방정식 (3) 및 (4)는 타원형이며, 이의 출구 경계조건인 식 (6)에는 Neumann 형 속도 경계조건이 포함되어 있다. 그러나 이들 운동량 방정식의 해를 수치해법으로 얻기 위해서는 Neumann 형 경계조건을 Dirichlet 형으로 변환시켜야 한다. 주어진 압력조건을 근사하게 만족시킬 수 있는 좌우출구에서의 유량비 $\lambda (=m_R/m_L)$ 을 선택하여 Neumann 형 속도 경계조건을 Dirichlet 형으로 전환시키는 방법은 아래와 같다.

Fig. 3에 나타난 출구속도 u 와 출구직전 속도 u' 는 수치해가 수렴되었을 경우 $u=u'$ 가 되며, 이것은 식 (6)에서의 Neumann 형 경계조건을 만족하게 된다. 그러므로 반복계산의 시작에서는 Dirichlet 형 경계조건으

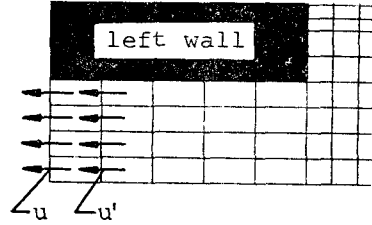


Fig. 3 Positions of u velocity for outlet boundary condition

로 u 를 추정하고 반복계산중에 u 가 개선되도록 상수 f 를 이용하여 u 를 다음과 같이 표시한다.

$$u = f \cdot u' \quad (7)$$

상수 f 는 반복계산 중에 1로 접근되면서 주어진 유량비 조건에 맞도록 u 가 u' 에 의해 개선되도록 한다. 이를 위하여 상수 f 는 다음과 같이 계산한다.

우선, 좌측 출구유량은 입구유량과 좌우출구의 유량비에 의하여 다음식으로 주어진다.

$$m_L = m_{IN} / (1 + \lambda) \quad (8)$$

또한 좌측 출구에서의 유량 m_L 은 다음과 같이 표시될 수도 있다.

$$m_L = \int_A (\rho u dA)_L \quad (9)$$

$$m_L = \int_A (\rho f u' dA)_L \quad (10)$$

상기 식 (10)로부터 상수 f 는 다음과 같이 결정된다.

$$f = m_L / \int_A (\rho u' dA)_L \quad (11)$$

여기서 m_L 은 식 (8)로 계산된 값을 사용한다. 상기식들에서 A 는 유동출구의 면적을 나타내고 dA 는 유동출구에 접하고 있는 개개의 제어체적에서의 한쪽 표면을 뜻한다.

우측 출구에서도 같은 방법으로 상수를 구할수 있으며, 이러한 방법으로 구하여진 출구에서의 속도는 유동의 전체적인 연속조건을 만족시킬 수 있다.

2.3 수치해석 방법

전체 계산 영역을 Fig. 4에서와 같이 유한개의 제어체적으로 분할하고 지배방정식을 제어체적 방법으로 차분화시키면 그 일반식은 다음과 같다.

$$A_p \phi_p = \sum A_{nb} \phi_{nb} + b \quad (12)$$

여기서 ϕ 는 일반적 종속변수를 나타내며 하첨자 nb는 격자점 p 에 이웃하는 격자점을 표시한다. 본 연구에서와 같이 2차원인 경우에는 하나의 격자점 p 주위의 동서남북 방향으로 모두 4개의 이웃 격자점이 존재한

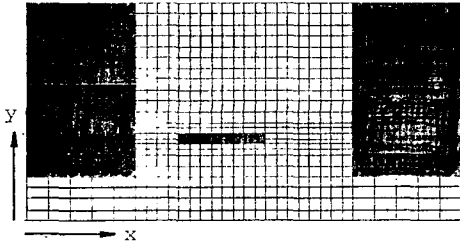


Fig. 4 Subdivision of the calculation domain

다. b 는 종속변수에 관계없는 여타항의 합이다.

상기 차분 방정식을 풀기 위해 여러 보존 방정식군의 해를 압력항의 계속적인 수정방법을 통하여 효과적으로 구할수 있는 SIMPLE⁽⁶⁾ 방법을 이용하였다.

수치계산의 해는 유출되는 유량이 유입되는 유량과 0.1%의 오차이내에서 일치되며, x 및 y 방향 속도의 변화가 계속되는 10회 이상의 반복계산에서 유효숫자 5자리까지 변화하지 않을 때에 수렴되었다고 간주했다.

3. 결과 및 토의

대부분의 청정실에서 유입공기의 속도는 0.1~0.5m/s 이므로 본 연구에서 수행한 수치계산의 조건도 이범위에 속하도록 Re 수의 범위를 $1.5 \times 10^4 \leq Re \leq 5.0 \times 10^4$ 로 선택하였으며 물성치는 20°C의 공기의 것을 사용하였다.

본 연구에서는 청정실내부의 유동특성에 관하여 관심있는 사항을 아래와 같이 4가지로 나누어 검토하고자 한다.

- (1) 실내 유동특성을 나타내는 유선분포 및 속도 벡터의 분포
 - (2) 작업대의 위치변동에 따른 좌우출구에서의 유량비의 변화
 - (3) 유입구와 유출구의 평균압력 차이의 변화
 - (4) 좌우 출구에서의 평균압력의 변동
- 각 단면에서의 평균압력 \bar{P} 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\bar{P} = \frac{\int_A P^* dA}{\int_A dA} \quad (13)$$

여기서 A 는 유동출입구의 면적을 나타내고 P^* 및 dA 는 유동입구에 접하고 있는 하나의 제어체적 표면에서의 압력 및 면적을 뜻한다.

3.1 실내유동의 일반적인 특성

계산된 모든 경우에서 유동의 형태는 본 연구에서 선택된 Reynolds 수의 범위 내에서는 큰 변화가 나타나지 않았으며, 좌측벽면에서부터 작업대좌단까지의 거리 G 에 따라서는 상당히 큰 변화를 보였으므로 G 의 변화에 따르는 유동특성을 토의한다. 청정실내에서의 기류해석의 주된 목적은 분진입자의 궤적을 예측하는 것인데, 일반적으로 공기와 섞여있는 분진입자는 그 자신의 궤성을 가지므로 그 궤적이 공기의 유선과 일치하지는 않는다. 그러나 대부분 청정실내에서는 아래와 같은 논의에 의하여 유선분포를 입자의 궤적으로 생각하여도 거의 오차가 없음을 알 수 있다.

개별적인 입자가 유체유동을 따르는데 필요한 시간을 나타내는 특성 반응시간 τ 는 $\tau = (2\gamma s^2 \rho_s) / (9\mu t)$ 로 정의되며^(7,8), 이것을 무차원화한 입자의 관성수 I 는 $I = \tau / (L/U)$ 로 정의된다. 여기서 하첨자 S 는 입자를 f 는 유체를 나타내며 L , U 는 유체유동에서의 특성길이 및 특성속도를 나타낸다. 개략적으로 $I \approx 1$ 이면 입자의 물리적 거동을 고려하여야 한다고 알려져 있으며 현재 청정실로 이루어지는 공간에서의 I 값은 1보다 아주 작다. 예를들면, 본 연구에서 채택한 청정실내에서, 입경이 1μ 이고 밀도가 330kg/m^3 인 wool의 분진 입자인 경우에는 관성수 I 가 10^{-6} 정도이다.

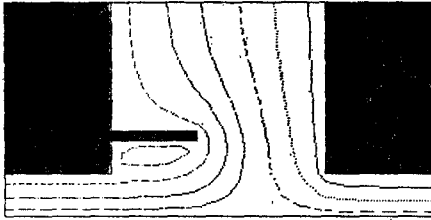
좌우 출구의 평균압력이 동일하며 ($\bar{P}_L = \bar{P}_R$) Re 수가 15,000 일 때, G 를 0, 0.2, 0.4 및 0.6m로 변화시켰을 때의 유선의 분포와 속도벡터의 분포를 각각의 G 에 대해서 Fig.5~Fig. 8에 나타내었다. 유선의 분포에서는 일반적으로 예상할 수 있는 2차 유동(secondary flow)이 작업대의 아랫 부분에 나타나며 이 부분의 속도의 상대적인 크기는 속도벡터의 분포에서 알 수 있다 이 2차 유동은 그 부분의 공기를 재순환시키며, 이에 따라 미세한 입자들이 결집되어 큰 입자를 생성할 수도 있어서 청정실 오염에 증대한 영향을 준다. 특히 작업대가 좌우 중심에 위치하는 $G=0.6\text{m}$ (Fig. 8)일 때는 2차 유동의 범위가 오염되기 쉬운 청정실의 바닥까지 미치기 때문에 바닥 표면에 있는 입자들을 부유시킬 수 있다. 이 부유 입자들은 작업자의 행동이나 기타 열원에 의한 자연대류 등의 교란에 의하여 청정을 요하는 다른 위치로 옮겨질 수 있으므로 양호한 청정도의 유지를 위해서는 작업대가 실내의 좌우 중심에 위치하는 것을 피하여야 할 것이다.

$G=0\text{m}$ (Fig. 5)인 경우에는 다른 경우에 비하여 작업대 아랫쪽에서의 청정도 유지는 양호하지만 작업대

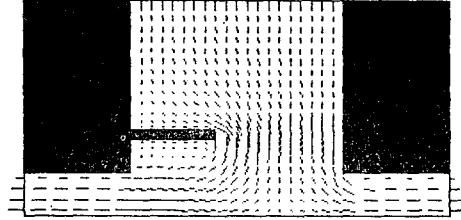
윗면과 벽면 사이의 코너에서 2차 유동이 생길수 있으므로 작업실내에서의 이와 같은 작업대의 배치는 바람직하지 못하다고 할 수 있다.

순환 유동이 1개만 표시되어 있다. 또 하나의 작은 재순환 유동이 기존 재순환 유동의 좌측에 존재하나 이 영역의 크기가 아주작기 때문에 나타내지 않았다.

Fig. 6와 Fig 7의 유선분포에서 작업대 아래에 재

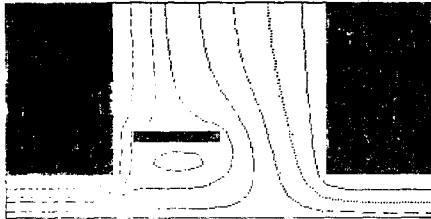


(a)

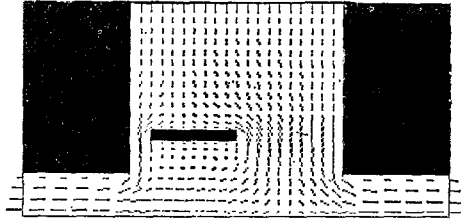


(b)

Fig. 5 Numerical stream-lines (a) and velocity vectors (b). ($G=0.0m$, $\bar{P}_R=P_L$, $Re=15,000$)

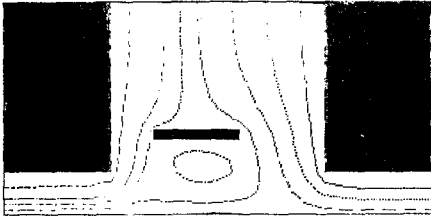


(a)

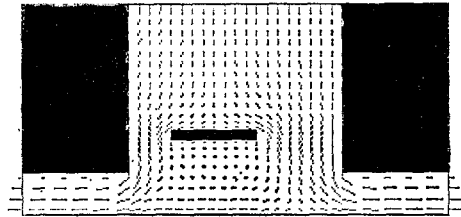


(b)

Fig. 6 Numerical stream-lines (a) and velocity vectors (b). ($G=0.2m$, $\bar{P}_R=\bar{P}_L$, $Re=15,000$)

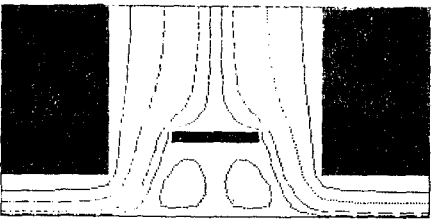


(a)

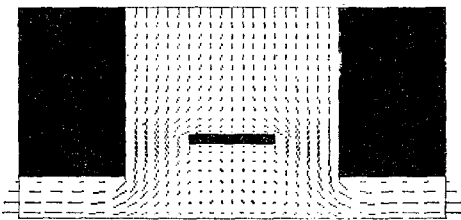


(b)

Fig. 7 Numerical stream-lines (a) and velocity vectors (b). ($G=0.4m$, $\bar{P}_R=\bar{P}_L$, $Re=15000$)



(a)



(b)

Fig. 8 Numerical stream-lines (a) and velocity vectors (b). ($G=0.6m$, $\bar{P}_R=P_L$, $Re=15,000$)

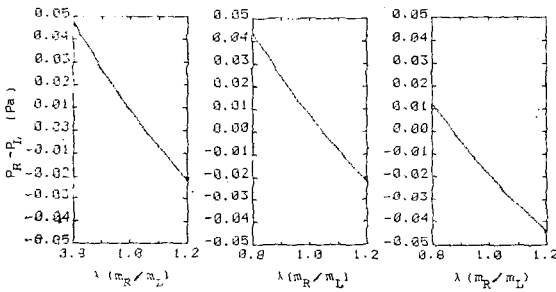
3.2 작업대 위치변동에 따른 좌우 출구에서의 유량비의 변화

청정실 실내의 조건변화에 의한 출구에서의 유량변동은 속도의 변동을 동반하며 이에 따라 출구덕트의

진동, 소음, 유동저항 등에 영향을 줄수 있다. 본 연구에서는 좌우출구에서의 평균압력이 동일할 때 작업대의 위치를 변화시키면서 양쪽 출구로의 공기 유출량의 비율 $\lambda=m_R/m_L$ 을 검토하였다. 즉 $\lambda > 1$ 이면 오른쪽 출구로 유출되는 양이 의쪽 출구로 유출되는 양보다 많다는 뜻이다.

좌우 출구에서의 평균압력을 동일하게 정하기 위하여서는, Fig. 9에서 보는 바와 같이 각각의 G 값에 대하여 λ 의 값을 5개정도 변화시키면서 얻은 수치계산 결과에서 좌측출구 평균압력 \bar{P}_L 과 우측출구 평균압력 \bar{P}_R 의 차이 $(\bar{P}_L - \bar{P}_R)$ 를 그래프화하여 $(\bar{P}_L - \bar{P}_R) = 0$ 인 λ 의 값을 개략적으로 정한다. 이어서 시행착오 방법으로 $[(\bar{P}_{IN} - \bar{P}_R) / (\bar{P}_{IN} - P_L)]$ 값의 범위가 1 ± 0.0005 가 되도록 값을 산출하였다.

Fig. 10에는 $Re=15,000$ 인 경우에 G 의 값에 따른 λ 값의 변화를 나타내었다. $G=0.6m$ 인 경우는 좌우 대칭 유동이므로 당연히 $\lambda=1$ 이나 $G=0.12m$ 경우에도 역시 $\lambda=1$ 되는 유동이 된다. λ_{max} 는 $G=0.3m$ 근처에서 나타난다. 이는 $G=0.3m$ 인 위치에서의 작업대가 좌측출구로의 유체유동에 가장 큰 장애요인이 됨을 뜻한다.



(a) $G=0.0m$ (b) $G=0.2m$ (c) $G=0.4m$

Fig. 9 Variations of the mean pressure difference between right outlet and left outlet with the ratio of flow rate

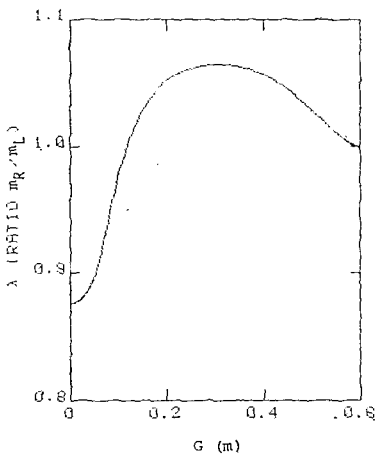


Fig. 10 Variation of the ratio of flow rate with gap between wall and table

3.3 유입구와 유출구의 평균압력 차이 변화

본 연구의 모델에는 유입구가 1개, 유출구가 2개 있으며 유입구의 평균압력을 \bar{P}_{IN} 으로, 두 유출구의 평균압력을 \bar{P}_{AVE} 로 표시하고, \bar{P}_{AVE} 는 좌우출구 각각의 평균압력의 산술 평균, 즉 $[(\bar{P}_L + \bar{P}_R) / 2]$ 로 계산된다. 동일한 유량을 실내에 통과시키는데 소모되는 펌프일은 $(\bar{P}_{IN} - \bar{P}_{AVE})$ 의 값이 커지면 증가될 것이다.

Fig. 11에는 좌우출구에서의 평균압력이 동일한 경우, 즉 $\bar{P}_{AVE} = \bar{P}_L = \bar{P}_R$ 일때에 G 값의 증가에 따른 유입구와 유출구사이의 압력강하 $(\bar{P}_{IN} - \bar{P}_{AVE})$ 는 작업대가 실내벽면에 접해 있을 때에 최소이고 작업대가 좌우의 중앙에 있을 때에 최대이다. 그러나 그 최대값은 $0.12Pa$ 정도이며 최소값과의 차이는 $0.05 Pa$ 미만이므로, HEPA 필터 전후의 압력강하가 $250 Pa$ 정도임을 비교해볼 때, 작업대의 위치변화가 청정실내의 유동을 위한 펌프일에 미치는 영향은 거의 무시될 수 있다. 또한 청정실에서 필요한 양압보다 역시 작으므로 양압 제어에 미치는 영향도 무시할 수 있다.

Fig. 12는 좌우 출구 평균압력이 역시 동일하게 유지되며, 작업대가 좌우 벽면으로부터 중앙에 위치할 때 ($G=0.6m$), Reynolds 수의 증가, 즉 유입유량이 증가됨에 따른 $(\bar{P}_{IN} - \bar{P}_{AVE})$ 값의 변화를 보여준다. 이 평균 압력차이는 Re 수의 증가에 따라 증가한다.

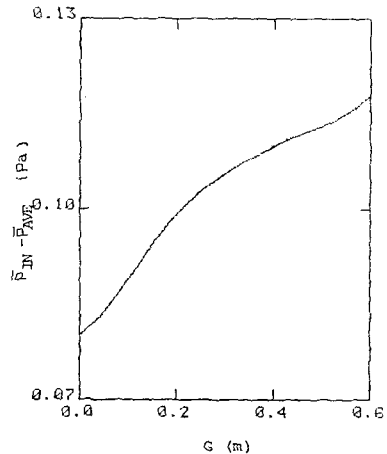


Fig. 11 Variation of the mean pressure drop from inlet to outlet with gap between wall and table

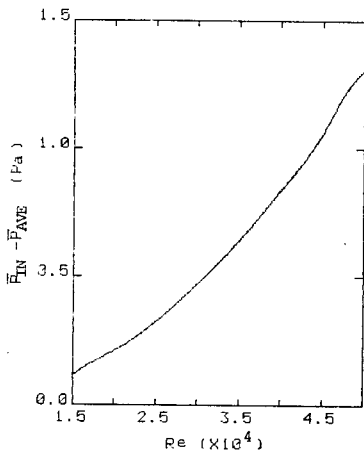


Fig. 12 Variation of the mean pressure drop from inlet to outlet with Reynolds number

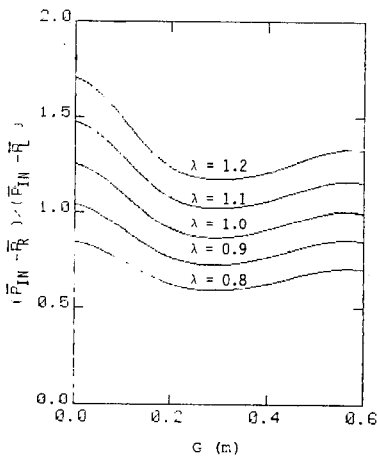


Fig. 13 Variations of the dimensionless pressure ratio for several ratios of flow rate with gap between wall and table

3.4 좌우측 출구 평균 압력의 변동

지금까지의 토의에서는 좌우측출구에서의 평균압력이 서로 동일한 경우이었으며, 이것은 좌우 출구가 같이 대기압에 노출되어 있을 때의 경우에 해당된다. 본 연구에서는 좌우 출구압력의 비평형 요인에도 관심이 있다.

Fig. 13에는 5개의 고정된 유량비, $\lambda=0.8, 0.9, 1.0, 1.1$ 및 1.2 인 경우에 G 값의 변동에 따른 좌우 출구에서의 평균압력인 \bar{P}_L 과 \bar{P}_R 의 변화량을 나타내기 위하여 유입구 평균압력 \bar{P}_{IN} 을 도입하여 무차원 압력

비 $[(\bar{P}_{IN} - \bar{P}_R) / (\bar{P}_{IN} - \bar{P}_L)]$ 를 정의하여 사용하였다. Fig. 13에서 $\lambda=1$ 일 때 $\bar{P}_L = \bar{P}_R$ 이 되는 2개의 G 값이 존재함은 3.2절의 Fig. 10에 대한 논의에서와 일치한다. 그러나 간단한 선형보간법에 의하면 $\lambda < 0.87$ 혹은 $\lambda > 1.08$ 의 범위에서는 $\bar{P}_L = \bar{P}_R$ 이 되는 G 값이 존재하지 않는다. 이로부터, 만약 좌우측 출구의 압력이 동일하게 설정된 경우에 작업대의 위치가 좌우로 이동되면 한쪽 출구로 유출될 수 있는 최대유량과 최소유량과의 차이는 최소유량의 약 30% 정도이다.

4. 결 론

공기 유입구가 1개, 공기유출구가 2개 있으며, 유입구쪽을 특성길이라 한 Reynolds 수가 $1.5 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$ 인 범위에서 $2m \times 2m$ 크기의 단면을 갖는 실제 크기의 청정실내부에 하나의 작업대가 위치할 때 나타나는 2차원 유동장을 모델로 하여 수치계산을 행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서의 방법으로 주어진 출구의 평균압력 경계 조건에 부합되는 유동장을 예측할 수 있었다.
- (2) 바닥으로부터 0.7m 높이에 있는 0.8m 폭의 작업대가 청정실내의 좌우 중앙에 위치하면 작업대 아래의 2차 유동이 바닥표면까지 확대되므로 청정도 유지에 좋지 않다.
- (3) 좌우 출구의 압력이 동일하게 유지될 때에는 작업대가 좌우로 이동되면 한쪽 출구로 유출될 수 있는 최대유량과 최소유량과의 차이는 최소유량의 약 30% 정도이다.

참 고 문 헌

- (1) H. Kazuya, et al., "The Study on the Clean Room," *The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol. 46, No. 9, pp. 1~12, 1972
- (2) H. Hiroyuki, "Smoke Trails and Models for the Exploration of Uni-directional Flow Ventilation Systems," *The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol. 46, No. 9 pp. 31~34, 1972
- (3) Y. Akira, et. al., "The Numerical Analysis of Room Air Distribution Part 1, 2, 3," *The Society*

- of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol. 48, No. 1 (1974), Vol. 48, No. 10 (1974), Vol. 49, No. 12 (1975)
- (4) K. Unno, et. al., "A Study on Numerical Analysis of Room Air Distribution Part I, II, III," *TAKENAKA TECHNICAL RESEARCH REPORT*, No. 27 (1982), No. 29 (1983), No. 31 (1984)
- (5) P. J. Roache, *Computational Fluid Dynamics*, Chap. III, Hermosa, Publishers, 1972
- (6) S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, 1980
- (7) G. Hetsroni, et. al., "*Handbook of Multiphase Systems*," Chap. 3, McGraw Hill, 1982
- (8) S. Crowder, J.W. Daily and J.A.C. Humphrey, "Numerical Calculation of Particle Dispersion in a Turbulent Mixing Layer Flow," *J. of Pipelines*, 4, p.159, 1984