

# 다수의 출구를 가지는 크린룸 내부의 기류분포에 관한 연구<sup>†</sup>

A Study on Flow Distribution in a Clean Room with Multiple Exits

이재현,\* 이시운,\*\* 김석현\*\*\*  
Jae-Heon Lee, Sie-Un Lee, Sukhyun Kim

## 요약

종래의 전통적인 컴퓨터 프로그램에서는 속도 경계조건만을 처리할 수 있으며, 크린룸에서와 같이 넓은 출입구가 존재하는 실제적인 유동통로에서 이 속도 경계조건을 부여하기 위한 실제 속도의 측정은 간단하지 않다. 그렇다고 경계에서의 속도 분포를 가정하는 것은 물리적으로 타당하지 않는 상황을 의미할 수도 있다. 이러한 동기에서 본 연구에서는 비교적 측정이 쉬운 압력이 경계조건으로 알려졌을 때 공간 내부의 유동을 예측할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 고안하여 문제를 해석하였다. 여기에서의 속도 경계조건은 다만 점착조건과 문제를 확정시키기 위하여 입구에서의 단면 방향 속도를 영으로 둔 것 뿐이다. 본 연구의 결과는 실용적으로 많이 이용되고 있는 간단한 Bernoulli 방정식에 의한 예측치와 비교되었으며 5% 이내의 차이로 정량적인 일치를 보았으며 이로써 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다.

본 연구에서는 유입구와 2개의 유출구에 압력경계조건이 부여된 크린룸 내부의 공기유동을 수치적으로 예측하고자 하였다. 유입구의 정압이 상대적으로 낮은 값을 가지는 왼쪽 유출구의 정압보다 150[Pa] 높은 경우에 왼쪽 유출구의 정압은 고정시키고 오른쪽 유출구의 정압을 0~150[Pa] 범위에서 25[Pa] 간격으로 변화시켜가면서 각 경우에 대한 크린룸내부의 유동 특성과 유입구의 속도분포 그리고 2개 유출구에서의 유량분배와 크린룸 내부의 유동특성을 예측하였다. 상대적으로 높은 정압이 부여된 오른쪽 유출구로의 유량배분은 이 유출구에 부여되는 정압이 커짐에 따라 선형적으로 감소되었으나 유입구에서 역류가 형성될 수 있을 만큼 정압이 증가된 후에는 유량배분이 급격히 감소되었다.

## ABSTRACT

Since conventional computer program is workable only with velocity boundary condition,

<sup>†</sup> 이 논문은 1987년도 문교부 자유공모과제 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

\* 정회원, 한양대학교 공과대학

\*\* 한양대학교 대학원

\*\*\* 정회원, 국민대학교 공과대학

in practical fluid passage such as clean room which usually have wide inlets and outlets, it is not easy to measure velocity itself because of its vector property. Furthermore a certain assumption of velocity at boundaries may lead to physically unreasonable results. From this motivation, we have developed a computer program to predict whole flow field imposed on pressure-based boundary condition which can be measured by relatively simple method. The only additional velocity boundary condition that should be imposed on to make the problem unique, are no slip condition at all walls and zero cross stream velocity at inlet. The result of present study was compared with that by Bernoulli equation being used practically. They were coincident well each other within 5%, therefore the validity of the present method is proved.

In the present work, the flow field in a clean room subject to pressure-based boundary conditions at an inlet and two exits was predicted numerically. The pressure difference between the inlet and the left exit which keeps relatively low pressure among two exits is fixed as 150 [Pa] and the pressure at the right exit is varied from zero to 150 [Pa] by the increment of 25 [Pa]. For each cases the flow characteristics in the clean room, the velocity profile at the inlet, and the flow rate through the two exits was predicted. The flow rate through the right exit imposed on relatively higher pressure than the left exit decreased linearly according to the increase of pressure of the right exit. When the pressure of the right exit is increased enough to cause back flow at the exit, the flow rate is rapidly decreased.

## I. 서 론

최근 산업의 발달에 따라 제품의 미소화, 정밀화, 고품질화 및 그 신뢰도가 추구되고 있으며 이에 따라 청결한 제조환경이 요구된다. 이러한 제조환경을 위하여 크린룸이 이용되고 있으며 특히 반도체칩(chip) 제조공정에서는 양질의 청정도가 제품회수율을 크게 좌우한다.

크린룸내의 청정도 유지를 위하여 이용되는 실내공기 유동방식은 수직층류방식, 수평층류방식, 난류방식 및 병용방식 등이 있으나 높은 청정도의 유지를 위하여 전체수직층류방식(Total vertical laminar flow system)이 많이 채용되고 있다. 크린룸에서 문제가 되는 미립자의 거동은 거시적으로 공기유동과 일치되므로 공기유동의 예측 및 이의 제어는 크린룸의 성능을 좌우한다고 할 수 있다. 지금까지 이에 관한 연구는 실내기류분포 등의 연구의 확장으로 인식되었으며 밀폐된 실내에서의 기류분포 혹은 한 개의 입구와 출구가 있는 실내에서의 기류분포에 관한 연구가 수행되고 있다.

그러나 실제의 크린룸에서는 HEPA 필터를 통하여 유입된 공기가 여러개의 출구를 통하여 분배되어 유출되는 경우가 많다. 이러한 복수개의 출구는 구멍뚫린 판(Punching plate) 혹은 격자바닥(grid floor) 혹은 여러개의 유출슬롯(outflow slot) 등에 의하여 구성된다. 이 경우 복수개의 출구가 있더라도 크린룸내부에서의 공기유동방향이 유입되는 공기유동방향과 크게 다르지 않아야 하며 또한 여러개의 출구에서는 단위면적당 거의 균일한 유량이 통과할 수 있어야 한다는 크린룸 성능상의 요구를 만족시켜야 한다. 따라서 여러개의 유출구 위치 및 각 유출구의 유출단면적이 적절히 선택되어야 한다.

상기 언급된 문제에는 재순환(recirculation) 영역이 포함될 수 있으므로 타원형(elliptic) 문제로 분류되며 물리현상을 묘사하는 지배방정식은 일반적인 유체유동해석에서 사용되는 것과 유사하지만 경계조건의 설정이 특별하다. 즉 지배방정식이 운동량방정식이므로 단위질량의 운동량은 명확한 속도값이 경계조건으로 주어지는 경우에 쉽게 풀려진다. 그러나 실제

의 크린룸에서 유동입출구에서 벡터량인 속도 값을 명확하게 예측하거나 실측하는데는 많은 어려움이 있다. 그 대신 유동입출구에서의 스칼라량인 정압은 쉽게 측정할 수 있을 것이다. 이에 따라 입출구에서의 압력을 이용 가능한 경계조건으로 고려할 수 있는 방법의 제안이 요구된다.

Akira<sup>1)</sup> 등이 2개 출구를 가지는 실제공간 내의 공기유동을 해석한 바 있으나 이들은 압력경계조건을 부여하지 않고 각 출구로 유출되는 유량비를 가정하고 출구에서는 출구면과 평행방향의 속도성분이 없다고 가정하여 문제를 해석하였다. 그러나 이들의 방법에서 유량비를 문제의 해결전에 가정한다는 것은 실제 물리적인 거동과 어긋나며 출구면과 평행한 방향의 속도성분이 실제로는 있을 수 있으므로 이 또한 실제의 물리적인 거동과는 차이가 있다. 이들의 수치계산모델에서 실제적인 경계 조건은 2개 출구에서의 압력이 출구 바깥쪽 외기의 압력이므로 유체의 정확한, 거동은 이 압력경계조건을 만족시키면서 해석되어야 할 것이다.

본 연구에서는 상기 문제에 접근하는 이차원적인 연구로서 정압이 알려져 있는 하나의 유입구를 가진 크린룸에 압력손실이 서로 다른 2개의 유출구가 설치되어 있는 경우에, 두 개 유출구에서의 압력손실 불균형이 크린룸 내부유동에 미치는 영향과 아울러 각 유출구에서 유출되는 유량을 수치적으로 예측하고자 한다.

## 2. 계산모델의 설정과 지배방정식

Fig.1에는 본 연구에서 계산 모델로 선택된 2개의 유출구를 가지는  $L(0.3\text{m}) \times H(0.6\text{m})$  크기의 2차원 크린룸 모델을 보여준다.  $y = H$ 인 유입구에서는  $0 \leq x \leq L$ 인 영역에서는  $20^{\circ}\text{C}$ 의 공기가 온도 변화없이 정상상태로 유입되며 유입단면에서의 정압은 일정하게 유지된다.  $y=0$ 인 유출구에는  $x$ 방향 전체폭을 7등분하여,  $L/7$ 폭의 4개 블록이  $L/7$ 간격으로 나열되어 있다. 이 블록의 크기는  $0.0357H \times (L/7)$

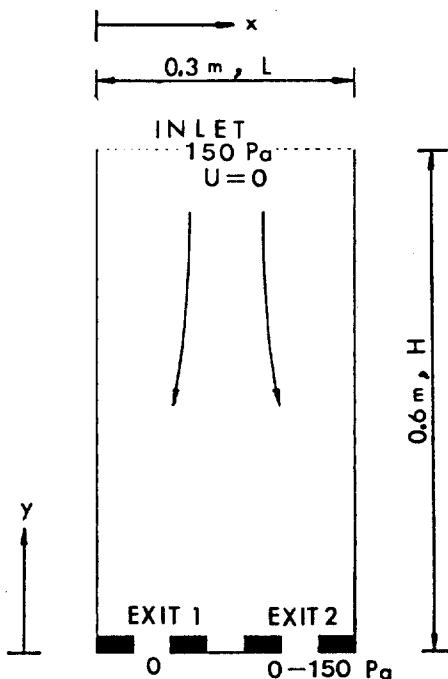


Fig.1 Schematic of present investigation

이며 이 블록들 사이에 두 개의 유출구 *exit 1*과 *exit 2*가 위치한다. *exit 1*의 정압을 기준 압력 0으로 간주하여 유입구의 정압은 150 [Pa]로 유지되고 있으며 *exit 2*의 정압은 0 – 150 [Pa] 사이에서 균일하게 유지된다.

일정밀도 및 일정점성계수의 가정하에서 정상 2차원 비압축성 층류 유동을 기술하는 무차원 연속방정식과 무차원 운동량 방정식은 아래와 같다.

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$u(\partial u / \partial x) + v(\partial u / \partial y) = -\partial p / \partial x + (1/\text{Re}) + (\partial^2 u / \partial x^2 + \partial^2 u / \partial y^2) \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

$$u(\partial v / \partial x) + v(\partial v / \partial y) = -\partial p / \partial y + (1/\text{Re}) + (\partial^2 v / \partial x^2 + \partial^2 v / \partial y^2) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

상기 무차원 기본방정식에서 사용된 무차원 수 및 무차원변수의 정의는 아래와 같다.

$$x = x''/L, \quad y = y''/L, \quad u = u''/v_c, \quad v = v''/v_c, \\ v_c = \sqrt{\Delta P / \rho}, \quad P = P' / \Delta P, \quad \text{Re} = v_c L / \nu, \\ \Delta P = P_i - P_{ei} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

여기서 상첨자 ‘''’는 유차원 값을 표시하며

$v_c$ ,  $\Delta P$  및  $L$ 는 각각 특성속도, 특성압력 차이 및 특성길이로 사용된다.  $Re$ ,  $\rho$  및  $\nu$ 는 각각 Reynolds수, 밀도 및 점성계수이다.  $P_i$  및  $P_{ei}$ 은 각각 유입구의 압력 및 exit 1에서 압력이다.

지배방정식과 함께 정의되는 무차원 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u=0 \text{ and } v=0 &\text{ at } x=0 \text{ and } x=L \\ u=0 &\text{ at } y=H/L \\ P=1 &\text{ at } y=H/L \\ P=0, \quad v \leq 0 &\text{ at } y=0 \text{ and } (1/7) \leq x \leq (2/7) \\ P=1 \sim 0, \quad v \leq 0 &\text{ at } y=0 \text{ and } (5/7) \leq x \leq (6/7) \\ \dots & \end{aligned} \quad (5)$$

상기 경계조건 중  $y=H/L$ 에서  $u=0$ 의 뜻은 압력 조건만으로는 완벽하게 규정되지 않는 문제의 성격을 확정시키는 것이다. 이는 유입구에서의 정압이 고정되었더라도 단면방향속도  $u$ 의 지점에 따라 여러가지 유체유동의 거동이 나타날 수 있기 때문이다.

### 3. 수치계산 방법

0이 아닌 속도 경계조건이 없이 압력 경계조건 만에 의하여 공간내부의 유동이 계산되어야 하므로 속도 경계조건을 사용하여야 하는 전통적인 프로그램으로서는 본 문제의 해결이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 SIMPLER<sup>2</sup> 알고리즘이 이용되어 압력경계 조건을 해결한 바 있는 본 연구자의 수치 방법<sup>3)</sup>을 이용하였다. 전체 계산영역은  $49 \times 29$ 개의 제어체적으로 분할되어 계산되었으며 0.3 정도의 하향이완계수로서 하나의 계산 경우마다 3,000회 정도의 반복이 소요되었다.

### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 유입구의 정압이 exit 1의 정압보다 항상 150[Pa] 높게 유지되는 상황에서 exit 2에서의 정압을 7가지로 변화시키면서 이 변화에 따라서, 공간내부를 흐르는 공기의 유동특성, 유량 그리고 각 유출구를 빠

져나가는 유량의 비율 등을 검토하였다. exit 2의 7가지 정압은 exit 1의 정압보다 각각 0.25, 50, 75, 100, 125 및 150[Pa] 높은 것이다. exit 2의 이러한 정압 상승은 해당 유출구에 설치된 공기필터의 오염정도 또는 유출구에 설치된 멤퍼의 개도량에 의하여 생길 수 있는 것이다. 본 연구결과의 정량적인 타당성 검토는 실용적인 측면에서 덱트내의 공기 흐름을 간단하게 예측하는 데 사용되는 Bernoulli 방정식의 결과와의 비교를 통하여 이루어졌으며 다음과 같은 과정에 의하여 수행되었다.

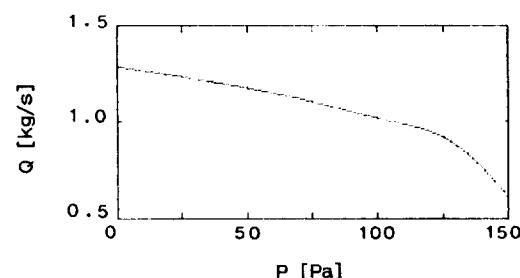


Fig.2 Flow rate at inlet with Various static pressure at exit 2

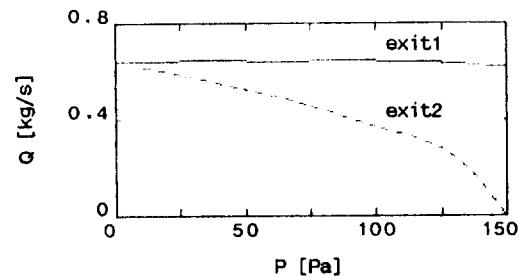


Fig.3 Flow rate through exit 1 and exit 2 with various static pressure at exit 2

Table I. Comparison of the pressure difference between from present method and from Bernoulli equation

$\Delta P_2$ [Pa]	$V_{max}$ [m/s]	$V_{in}$ [m/s]	$\Delta P_B$ [Pa]	$\Delta P_2 / \Delta P_B$
150	15.73	3.69	144.1	1.04
125	14.33	3.35	119.6	1.05
100	12.85	3.12	95.8	1.04
75	11.13	2.79	71.6	1.05
50	9.15	2.39	48.1	1.04
25	6.86	2.85	24.0	1.04

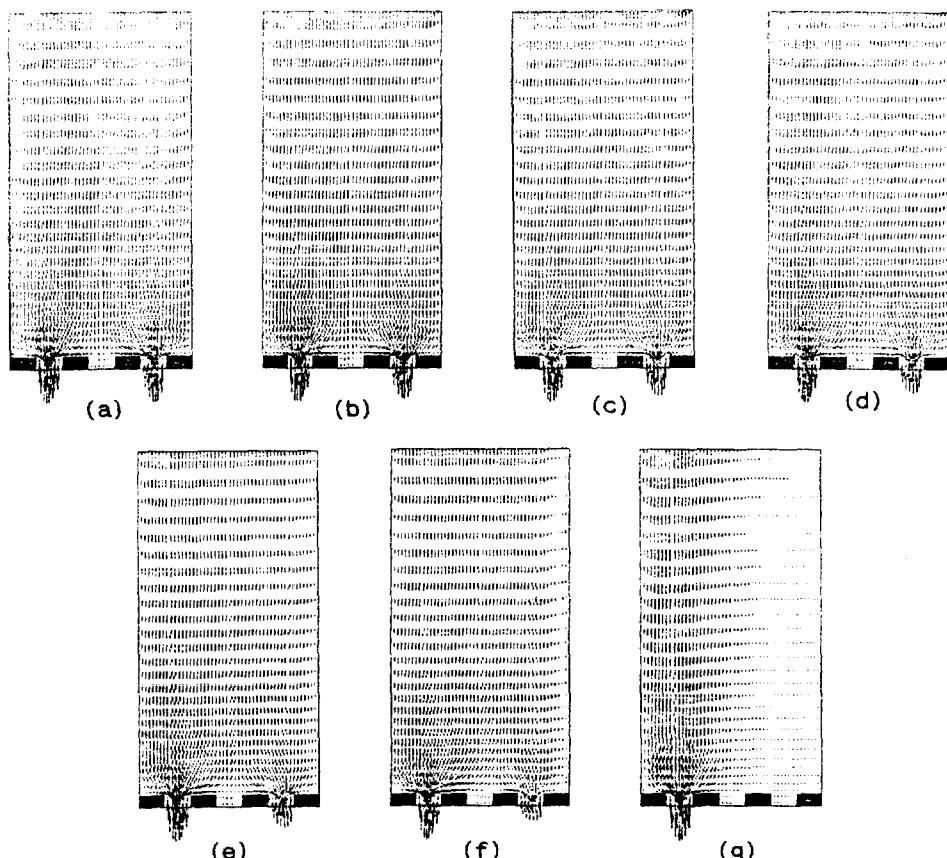


Fig.4 Distributions of velocity vectors within the room: the static pressure at exit 2 are (a) 0, (b) 25 [Pa], (c) 50 [Pa], (d) 75 [Pa], (e) 100 [Pa], (f) 125 [Pa], (g) 150 [Pa]

1. 오른쪽 유출구에서의 국소최대속도( $V_{max}$ )을 읽고 이 최대속도 위치를 지나는 유선을 선택한다.

2. 이 유선이 유입구를 통과하는 위치에서의 유입속도( $V_{in}$ )을 읽는다.

3. 속도  $V_{max}$ 와  $V_{in}$ 을 Bernoulli 방정식에 대입하여 두 위치에서의 정압차이  $\Delta P_B$ 를 구한다. 이 정압차이는 마찰손실과 이차손실(minor loss)에 의한 것을 포함한다.

4. 구하여진  $\Delta P_B$ 와 본 수치연구에서 부여한 실제 압력차이  $\Delta P_2 (=P_i - P_{e2})$ 를 비교한다. 여기서 하첨자 e 2는 exit 2임을 뜻한다.

상기 방법을 본 연구에서의 유출구 exit 2에 적용하여 이 값들의 비교를 Table 1에 나타내었다.  $\Delta P_2 / \Delta P_B$ 가 1.04~1.05의 값을 가지므로 본 계산 방법의 정량적인 타당성은 충

분히 입증되며 2차원 유동가정에 의한 압력손실( $\Delta P_2$ )이 1차원 비접촉 유동가정에 의한 압력손실( $\Delta P_B$ ) 보다 커서  $\Delta P_2 / \Delta P_B > 1$ 로 나타나는 것은 마찰손실과 이차손실을 고려한 물리적인 판단과 부합된다.

이로부터 크린룸에서 2차원 층류유동에 의하여 공기가 유출구로 유출될 때 유입구와 유출구 사이의 압력차이는 단순한 Bernoulli 방정식에서 환산된 값보다 약 5% 크다고 할 수 있다.

exit 2의 정압이 0에서 점차 증가하여 유입구의 정압과 동일한 150 [Pa] 까지 될 때 단위 깊이(1 m)의 크린룸에 유입되는 총유량의 변화를 Fig.2에, 그리고 exit 2에서의 유출되는 유량을 Fig.3에 나타내었다. exit 2 정압변화에 따르는 총유량의 변화성향과 exit 2에서 유

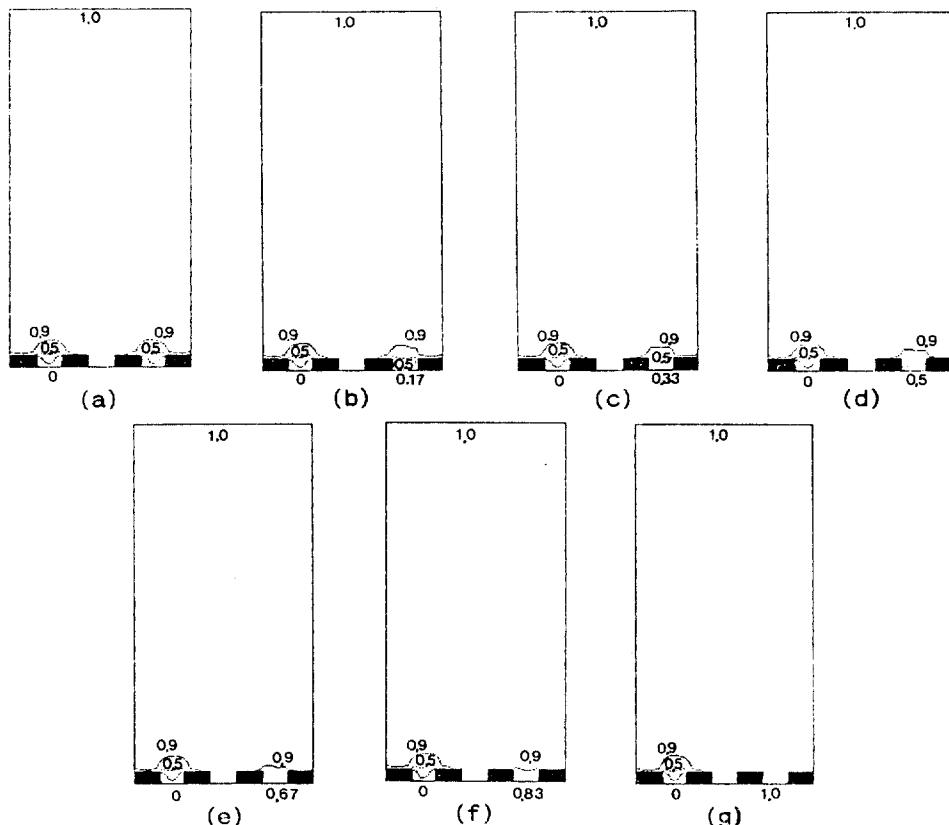


Fig.5 Distributions of isobaric lines within the room: the static pressures exit 2 are  
(a) 0, (b) 25[Pa], (c) 50[Pa], (d) 75[Pa], (e) 100[Pa], (f) 125[Pa], (g) 150[Pa]

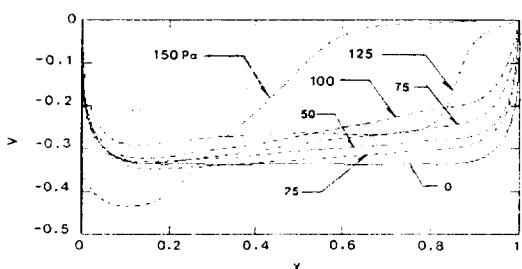


Fig.6 Velocity profiles at inlet for various static pressure of exit 2

출되는 유량의 변화성향이 상당히 유사하며 이는 exit 1에서 유출되는 유량이 exit 2의 정압과는 거의 무관함을 뜻한다. 이에 따라 2개 중 상대적으로 낮은 압력을 가지는 유출구에서 유출되는 유출유량은 유입구와의 정압차이에만 관계되며 인접한 유출구에서의 정압에는 무관함을 알 수 있다. 그러나 상대적으로 높

은 정압을 가지는 유출구에서의 유량은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 어느정도 낮은 정압범위에서는(본 연구에서는 0~100Pa) 해당 유출구에서의 정압이 상승함에 따라 거의 선형적으로 유량이 감소하나, 공기유출이 거의 중단될 수 있는 정압범위(본 연구에서는 100Pa 이상)에서는 한층 급격히 감소한다. 이는 해당 유출구의 정압이 유입구에서의 유통패턴에 영향을 주기 때문이다. 판단되며 이어서 논의되는 공간내부의 유통특성과 관련이 있다.

Fig.4, Fig.5 및 Fig.7에는 exit 2의 정압이 7가지로 변화할 때 공간내부의 속도벡터 분포, 등압선 분포 및 유선의 분포를 각각 보여준다. Fig.5의 등압선에 기재된 수치는 무차원 압력값이다. 여기서 보면 압력강하는 거의 유출구 부근에서 이루어진다. 즉 내부공간의 95% 이상 영역에서의 정압은 유입구에서의 압

력과 동일하다고 할 수 있다. 속도벡터 분포를 나타내는 Fig.4에서는 특히 유입구에서 공기 유입속도에 관심이 간다. exit 2에서의 정압이 증가함에 따라 exit 2가 위치하는 공간내부의 오른쪽 영역에서의 속도는 점차 감소되며 exit 2의 정압이 125[Pa]일 때는 공간내부의 일부에서 미소한 역류가 관찰된다. 이러한 역류의 발생은 앞에서 언급된 바 있는 exit 2로부터 유출되는 유량이 급격히 감소하는 이유로 판단된다.

$x$ 방향에 따라 균일한 압력분포를 가지는 유입구에서의 속도분포를 Fig.6에 나타내었다. 이하의 논의에서는 편의상 유차원 좌표  $x''$ 에서의 상첨자를 삭제시키겠다.

exit 2의 정압이 exit 1의 정압과 같이 0일 때의 속도분포는  $L/16 \leq x \leq 15L/16$  영역에서 거의 균일하며 exit 2의 정압이 증가함에 따라

유입구의 오른쪽에서의 유속이 점차 감소되어 나타나며 이에 따라 유입유량이 감소된다. 그러나 exit 2의 정압이 100[Pa]인 경우에 유입구의  $L/16 \leq x \leq 7L/8$  영역에서 오히려 균일한 속도분포를 보이다가  $7L/8 \leq x \leq L$  영역에서 급격히 감소된다. exit 2의 정압이 유입구의 정압과 동일하다는 것은 exit 2가 아래 막혀 있다는 뜻이 되며 유입구 오른쪽 영역에서의 최대유속은 exit 2의 정압이 낮을 때보다 오히려 더 크게 나타난다. 하지만 유입구에서  $x < L/2$ 인 영역의 유속은 아주 느리다.

Fig.7에 나타낸 유선 분포에서는 7가지 exit 2 정압의 경우에 유입구에서 유입되는 공기 입자의 유출경로를 알 수 있다. 특히 exit 2의 정압이 125[Pa] 및 150[Pa]인 경우에 오른쪽 하부공간에 재순환 유동이 나타남을 볼 수 있으며 만약 이 부분에 공기의 밀도와 유

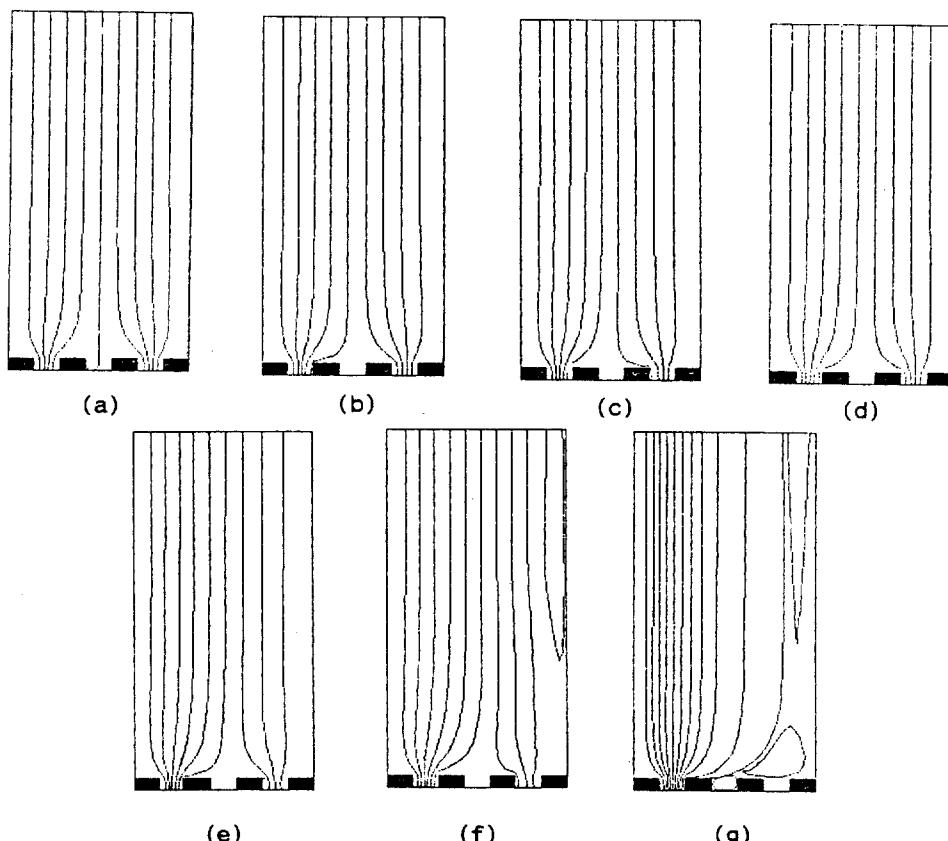


Fig.7 Distributions of streamlines within the room: the static pressures of exit 2 are  
 (a) 0, (b) 25[Pa], (c) 50[Pa], (d) 75[Pa], (e) 100[Pa], (f) 125[Pa], (g) 150[Pa]

사한 부유물이 존재할 경우 그 부유물은 exit 1 혹은 exit 2로 배출될 수 없음을 예측할 수 있다. 이 경우에 유입구의 우측에서 미소한 역류현상이 보인다. 이는 공간 우측 하부에 위치한 exit 2의 높은 정압 때문이며 실제의 크린룸을 설계할 때 이러한 현상을 피하도록 하여야 할 것이다.

## 5. 결 론

유입구의 정압이 단면에 따라 균일하게 유지되면서 서로 다른 압력손실을 가지는 2개의 유출구를 가지는 크린룸 공간에서 각 유출구로 유출되는 유량과 공간내부의 유동특성을 수치적으로 연구하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 공간내에 2차원 층류운동에 의하여 공기가 유출구로 유출될 때 유입구와 유출구의 압력차이는 단순한 Bernoulli 방정식에서 환산된 값보다 약 5% 크다.
2. 두개의 유출구중에서 상대적으로 낮은 정압을 유지하는 유출구에서의 유량은 나머지 유출구에 작용하는 정압의 크기에 무관하게 거의 일정하게 유지된다.
3. 상대적으로 높은 정압을 유지하는 유출구에서는 그 정압이 유입구 정압의 0~80 % 되는 범위에 들 때 정압의 증가에 따라 유출

유량이 선형적으로 감소하거나 80~100% 되는 범위에서는 급격히 감소된다.

4. 유출구의 전체단면적이 유입구의 전체단면적에 비하여 감소된 경우에 크린룸 내부 공간의 95% 되는 영역의 정압이 유입구의 압력과 동일하게 유지되며 정압의 감소는 유출구에 인접한 좁은 영역에서만 발생한다.

5. 본 연구 방법에 의하면 공간의 기하학적 구조에 따라 유입구에서 생길 수 있는 역류의 존재를 예측할 수 있으며 또한 특정위치에 존재하는 부유물이 유출구로 배출 가능한지를 판단할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Y. Akira, 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(1974), Vol. 48, No. 10(1975), Vol. 49, No. 12(1975).
2. Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill, New York.
3. 이재현, 1988, "2차원 비압축성 점성유동이 나타나는 압력경계조건의 해결방안", 대한기계학회 논문집, Vol. 12, No. 3, pp.925~933.