

Access Panel 개폐에 따른 청정실내 유동특성

On the Characteristics of the Flow with Opening and Shutting of Access Panels in a Clean Room

박 명 식*, 이 재 현**, 안 강 호*** 김 정 호****
M. S. Park, Jae-Heon Lee, K. H. Ahn, J. H. Kim

Key words : Clean Room(청정실), Pressure Drop(압력강하), Distributed Pressure Resistance
(분산압력저항)

ABSTRACT

A numerical investigation has been carried out for the two-dimensional flow and pressure characteristics in a clean room equipped with two kinds of filters and four access panels. The distributed pressure resistance concept was applied to describe the momentum loss in filters and access panels. As a result, the velocity profile in the clean room became rather smooth by the presence of access panels. Furthermore, the average pressure drop of each access panel reached the same value so that the ratio of the flow rate should be the same at any zone. The closing of an access panel with maintaining the other access panels being opened had influenced on the velocity distribution in lower two thirds of left half space of the clean room.

1. 서 론

기류가 상부 플레넘(plenum)으로부터 필터를 통과하여 청정실로 유입된 후 access panel을 통하여 하부 플레넘으로 유출되는 실제 청정실에서의 유동에 관한 이론적 연구는 청정실 설계의 기술축적을 위하여 필요하다. 청정실내 유동특성에 관한 많은 연구들중에 필터와 access panel 모두를 고려한 것은 드물다. 수직충류형

청정실⁽¹⁾인 경우, 청정실내의 특정장소에서 오염입자의 발진이 있게 되거나 청정실 천정필터에 흠이 생겨 오염입자의 누설이 발생되면 오염입자는 수직방향의 기류유동에 의해서 하방으로 확산하며 흘러 나가게 된다. 청정실의 이와같은 상황에서 오염입자가 비교적 좁은 영역만을 오염시키면서 하부로 빠져나가기 위해서는 기류제어가 필요하며, 이때 청정실내의 기류유동은 가능한한 천정필터로부터 수직방향으로

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 공과대학 기계공학과

*** 생산기술연구원

**** 한국캠브리지필터(주)

평행성을 유지하여야 한다.⁽²⁾

수직층류형 청정실에서는 청정실 바닥을 구성하고 있는 access panel의 하부에 설치된 하부 플레넘의 형상에 의해 천정에 설치된 필터를 통과한 공기가 하류로 갈수록 수직방향으로부터 휘어질 수도 있다. 실무에서는 청정실 공기의 기류분포를 제어하고, 실내 양압을 유지하기 위해서 access panel의 개폐를 흔히 이용한다. Maeda 등⁽³⁾, Tanaka 등⁽⁴⁾은 단순화된 2차원 청정실에서 유동특성과 수치적 해석을 시도하여 청정실의 형상변화, 바닥 access panel의 개폐, 하부 플레넘의 높이변화에 따른 공기의 유동특성에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이들은 다공성 매질 모델을 도입하여 access panel을 포함한 공간내의 유동을 연구하였으며, access panel의 개폐가 전체 기류특성에 많은 영향을 준다고 발표하였다. 국내에서는 강신형⁽⁵⁾등이 천정의 필터가 없는 단순한 형태의 청정실에서 access panel의 유동저항을 고려한 실내기류 유동에 관한 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 천정 필터가 존재하는 청정실에서 바닥에 설치된 access panel의 개폐에 따른 기류분포의 영향을 상세히 고찰하고자 한다.

2. 모델의 설정

본 연구에서 고찰하고자 하는 2차원 청정실의 모델과 기준좌표계 x, y 는 Fig.1에 나타난 바와 같다. 연구모델에 관한 계산영역은 $W \times H$ (1.16 m \times 0.404m)이다. 모델의 상부에는 $W_1 \times H_1$ (1.135 m \times 0.04m)인 상부 플레넘이 존재하고 상부 플레넘으로부터 청정실까지는 $W_2 \times H_2$ (0.068m \times 0.027m)인 수직통로가 존재한다. 수직통로로부터 하부방향으로 H_3 (0.067m)인 지점에는 유동저항이 서로 다른 2종류의 ULPA필터(필터 A, 필터 B)가 4개 배치된 필터층이 설치되어 있다. 필터층에서 좌측에 배치된 2개 필터의 크기는 각각 $W_3 \times L_1$ (0.036m \times 0.005m)이고 우측에 배치된 2개 필터의 크기는 각각 $W_3 \times L_2$ (0.036m \times 0.01m)이다. 필터와 필터사이에는 두께가 0.002m인 필터받침대가 설치되어 유동을 제한하고 있다. 필

터 하부면으로부터 아랫방향으로 H_4 (0.203m)인 지점인 청정실바닥에는 각각 $W_4 \times L_3$ (0.04m \times 0.007m) 크기인 access panel이 4개 존재한다. 각 access panel의 명칭은 좌측으로부터 우측으로 AC1, AC2, AC3 그리고 AC4로 지칭하기로 한다. 청정실내부 유동특성을 간결히 설명하기 위하여 각 access panel층의 좌측에서 우측으로 각 access panel의 상부에 해당하는 청정실공간을 zone1, zone2, zone3 그리고 zone4로 지칭한다. access panel하부에는 $W \times H_5$ (1.16m \times 0.067m)인 하부 플레넘이 존재한다. 따라서, 상부 플레넘입구로부터 유입되는 공기는 청정실의 천정에 설치된 4개의 필터를 통하여 청정실내로 유입된후 청정실바닥인 access panel을 통하여 하부 플레넘으로 유출된다. 이때 상부 플레넘 입구로 유입되는 공기는 아래와 같은 완전발달한 층류(fully developed laminar flow) 속도분포를 가진다고 가정한다.

$$V(x) = 1.5V_m \left[1 - (4/H^2) (x - H/2)^2 \right] \dots (1)$$

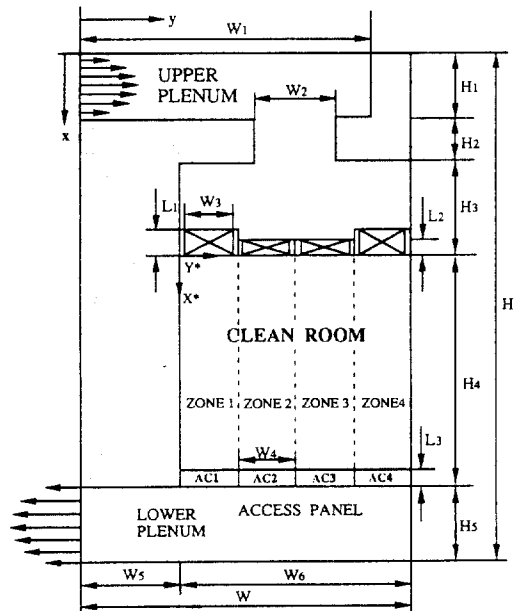


Fig.1 Schematic of the present investigation

여기서 V_{in} 은 상부 플레넘의 평균유입속도를 의미하며 본 연구에서는 1m/sec로 가정하였다. 또한 H_1 은 상부 플레넘의 높이이다.

3. 지배방정식

계산영역의 공기의 밀도, 점성계수 등의 물성치가 일정하며 유동은 비압축성 층류 2차원적인 것으로 가정할 때, 다공물질의 분산압력저항에 의한 운동량 소멸항(momentum sink term)이 포함된 무차원 연속방정식과 무차원 운동량방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

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

운동량방정식 :

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

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

상기 무차원방정식에서 사용된 무차원수 및 무차원 변수의 정의는 아래와 같다.

$$x = X/H_L, \quad y = Y/H_L, \quad u = U/V_{in}, \quad v = V/V_{in}$$

$$p = P/\rho V_{in}^2, \quad s_u = S_u(H_1/\rho V_{in}^2), \quad s_v = S_v(H_1/\rho V_{in}^2),$$

$$Re = \frac{\rho V_{in} H_1}{\mu} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 대문자는 차원이 있는 값을 표시하고, Re, ρ, μ, U, V 그리고 P 는 각각 레이놀즈수, 공기의 밀도, 공기의 점성계수, X 방향 속도, Y 방향 속도 그리고 압력이다. 또한 s_u 및 s_v 는 무차원 운동량 소멸항을 의미한다. 전술한 지배방정식과 함께 정의되는 무차원 경계조건은 다음과 같다.

$$u=0, v=0 \quad \text{at all walls}$$

$$u=0, v=1.5-6(0.5-x)^2 \quad \text{at } y=0 \text{ and } 0 \leq x \leq$$

$$\partial u/\partial x = \partial v/\partial y = 0 \quad \text{at } y=0 \text{ and } H_6/H_1 \leq x \leq H/H_1$$

$$\dots\dots\dots (6)$$

여기서 $H_6 = H - H_5$ 이다.

3.1 운동량 소멸항의 처리

본 연구에서는 필터와 access panel에서 유동저항을 묘사하기 위하여 다공물질의 총압력강하요인이 다공물질의 전체체적에 고르게 분산되어 있다고 간주하는 분산압력저항(distributed pressure resistance)개념⁽⁶⁾을 도입하였다.

Raber⁽⁷⁾에 따르면 공기유동방향에 수직인 다공물질에서의 압력강하량 ΔP 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = C_1 \mu U_m \dots\dots\dots (7)$$

여기서 C_1 은 주어진 다공물질의 분산압력저항계수이고, μ 는 공기의 점성계수, 그리고 U_m 은 다공물질에서 공기의 평균통과속도이다. 식(7)을 이용하여 다공물질에서의 단위 두께당 압력강하인 압력구배 $\Delta P/T$ 를 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{T} = \frac{C_1 \mu U_m}{T} \dots\dots\dots (8)$$

여기서 T 는 다공물질의 두께이다.

전술한 1차원적인 논의는 2차원 유동에 확장시킬 수 있으며 2차원 다공물질 주위에서의 압력구배는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta X}\right)_i = \left[\frac{C_1 \mu U(X, Y)}{T}\right] \dots\dots\dots (9)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta Y}\right)_j = \left[\frac{C_1 \mu V(X, Y)}{T}\right] \dots\dots\dots (10)$$

여기서 하첨자 f 는 다공물질을 뜻하며, $U(X, Y)$ 와 $V(X, Y)$ 는 다공물질내 임의의 위치(X, Y)에서의 국소속도이다. 식(9)과 (10)을 무차원하여 운동량방정식 (3)과 (4)에 포함된 소멸항에 대해 표시하면 다음과 같다.

$$s_u = \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_f \right] = \frac{C_1 H_1 u}{(t \cdot Re)} \dots\dots\dots (11)$$

$$s_v = \left[\left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_f \right] = \frac{C_1 H_1 v}{(t \cdot Re)} \dots\dots\dots (12)$$

여기서 무차원 다공물질의 두께 t 는 T/H_1 이다. 본 연구에서 사용한 다공물질의 두께 T 의 값은 필터종류 A에서는 L_1 이고 필터종류 B에서는 L_2 이다. 그리고 access panel에서의 T 값은 L_3 이다.

분산압력저항계수 C_1 의 값은 정격풍량에 대한 압력강하량이 알려진 기존의 실제필터와 기존의 실제 access panel의 자료를 식(7)에 대입하여 구하였다. 본 연구에서 Fig.1에 나타난 필터종류 A, 필터종류 B 및 access panel의 분산압력저항계수 C_1 값은 각각 $4.019 \times 10^7 [m^{-1}]$, $2.115 \times 10^7 [m^{-1}]$, $1.920 \times 10^6 [m^{-1}]$ 이다. 식(11)과 식(12)로 표시되는 운동량 소멸항은 다공물질이 존재하는 곳에서만 존재하며 그외의 영역에서는 0으로 간주한다.

4. 수치 해석 방법

기본방정식 (2)-(4)는 Patankar⁽⁸⁾에 의해서 제안된 제어체적방법을 기본으로 하여 이산화되었으며 해를 구하기 위하여 SIMPLER알고리즘이 이용되었다.

상부 플레넘의 유입구로부터 필터가 존재하는 부분까지는 물리량의 변화가 급격할 것으로 예측되므로 비교적 조밀한 격자를 배치하였다. 또한 필터가 존재하는 곳에서의 Y방향으로는 균일한 간격으로 격자를 형성하여 전체 계산영역을 82×60 개의 격자망으로 구성하였다. 수치계산에서 사용된 속도 U 및 V 에 대한 하향이완계수는 0.22에서 0.3사이이며 압력 P 는 이완시키지

않았다. 그리고 다공물질내에서의 정확한 속도를 구하기 위하여, 대수방정식을 풀때 수렴을 촉진시키는 block correction은 수행하지 않았다. 1회 반복계산시마다 해의 수렴성을 알기 위하여 제어체적내로 유입되는 유량과 유출되는 유량의 차이를 조사하였고 그 차이가 $10^{-7}(kg/sec)$ 이하 일때의 값을 수렴값으로 간주하였다. 본 연구에서 선택된 대부분의 계산에서 5000~7000회의 반복계산후 해가 수렴되었다.

5. 결과 및 고찰

공학적인 관점에서 볼때, access panel의 개폐는 하강기류의 유동특성에 영향을 줄 것으로 사료가 되므로 청정실 운전상 중요한 인자가 된다. 그러므로 본 연구에서는 아래와 같은 사항을 조사하였고 논의의 편의를 위하여 4개의 access panel이 모두 열려있는 경우를 전개된(all opened) 경우로 지칭하기로 한다.

우선, 청정실에서 access panel이 없는 경우와 전개(all-opened)된 access panel이 존재하는 경우에 관하여 유동특성을 비교함으로써 청정실에서 access panel의 역할을 고찰하였다.

이어서, AC1, AC2, AC3, AC4순으로 한개의 access panel만이 닫힌 경우에 관한 청정실내부 전체 기류분포와 청정실 중간높이에서의 속도 벡터 분포를 고찰하였다. 그리고 청정실높이에 따라 각 zone에서의 통과유량특성을 고찰하였다.

마지막으로, 본 연구의 수치계산 방법으로 구한 필터에서의 평균압력강하량과 필터통과 평균속도를 전기회로 유사성을 이용한 1차원적 방법에 의해서 구한 값과 비교하였다.

5.1 계산방법의 타당성 검토

본 연구의 수치계산 방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 충분히 긴 2차원 유로 중앙에 수직으로 필터가 존재하는 모델을 선정하여 본 연구에서의 수치해석방법을 적용하였다. 이때 사용된 필터는 C사의 표준형 HEPA필터(모델 1-1000)이고 필터로 유입되는 유입유량은 정격유량인 $32[m^3/min]$ 이다. 수치계산에서 얻은 압

력강하량은 245[Pa]이며 이 수치는 C사의 실험 자료와 정량적으로 잘 일치하였으므로 본 연구에서의 수치계산방법의 타당성을 입증할 수 있었다.

5.2 Access panel 존재에 따른 유동특성

청정실에서 access panel의 존재에 따른 유동 특성을 고찰하기 위하여 access panel이 없는 경우의 유선분포를 Fig.2에 나타내었다. 그리고 이와 비교하여 전개된 4개의 access panel이 존재하는 청정실에서의 유선분포와 압력분포를 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다.

Fig.2에서는 유동의 가시화를 위하여 30개의 유선을 나타내었다. 이때 유선과 유선사이의 유량은 일정하다. 그림에서 보면 공기는 상부 플레넘으로 유입되어 우측으로 이동하다가 수직 통로에서 휘어져 하강하고 있다. 필터상부에 도달한 공기는 필터상부 경계면부터 수직으로 하

강한다. 우측 2개의 필터(필터종류 B)를 통과하는 유선이 좌측 2개의 필터(필터종류 A)를 통과하는 유선보다 조밀하므로 좌측필터보다 우측필터를 통하여 많은 유량이 통과함을 알 수 있다. 이것은 각 필터의 상부에 도달한 공기가 필터를 통과하면서 서로 다른 저항특성으로 인하여 각기 서로 다른 유속을 갖기 때문이다. 필터하부면을 통과한 수직하강 기류는 출구의 존재로 인하여 좌측으로 휘어져 들어간다. 이때 청정실의 좌측벽과 하부 플레넘의 인접한 코너 부근에 있는 유선분포는 조밀하고 코너로부터 청정실 우측벽으로 갈수록 유선은 성긴분포를 갖는다. 그러나 access panel이 존재하는 경우인 Fig.3에서 청정실내의 유선은 하부로 갈수록 좌측으로 밀집되어지는 정도가 완만해 지며 각 access panel을 통과하는 유량은 균일하여진다. 따라서 access panel의 존재는 청정실내부의 기류를 수평방향으로 균일하게 만드는 역할을 한다.

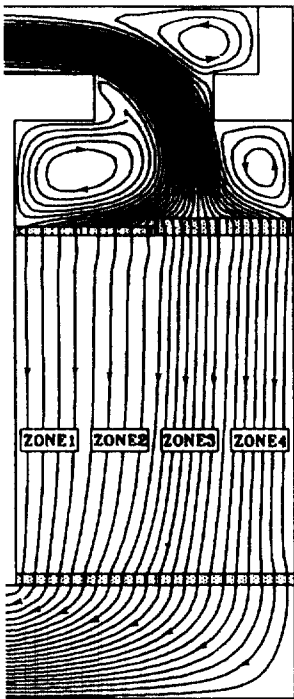


Fig.2 Visualization of flow characteristics : Distributions of stream lines without access panel

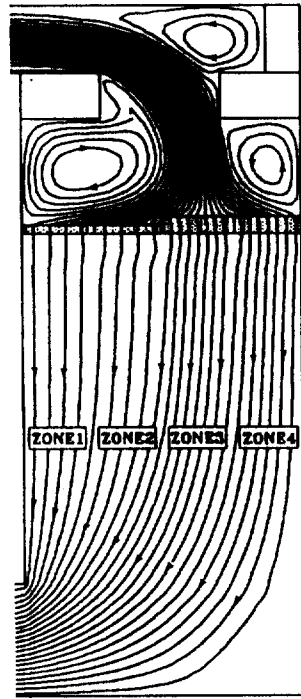


Fig.3 Visualization of flow characteristics : Distributions of stream lines with access panels(all-opened)

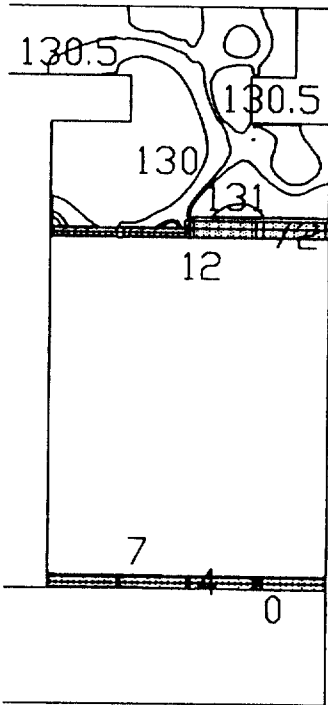


Fig.4 Visualization of flow characteristics : Distributions of isobars with access panels (all-opened)

이러한 현상은 Fig.4의 압력분포로써 설명할 수 있다. 필터층의 상부에서는 비교적 고압의 복잡한 압력대가 형성된다. 그러나 공기가 필터를 통과하면서 압력분포는 수평방향으로 균일화된다. 필터내부에서의 압력은 공기가 필터를 통과함에 따라 수직방향으로 선형적인 감소를 하게 되며, 필터층 하부경계면 근처에서 필터의 종류와는 상관없이 수평방향으로 동일한 압력값을 갖는다. 이와 같은 필터에서의 압력특성으로 인하여 공기는 필터를 통과하면서 수직으로 하강하는 일방향성 속도를 갖게된다. 필터에서와 마찬가지로 access panel에서의 압력특성도 공기가 panel을 통과함에 따라 수평적으로 균일화된다. 본 연구모델에서 채택한 access panel은 모두 같은 종류이므로 분산압력저항계수는 어느 것이나 동일하다. 그러므로 본 연구모델의 access panel층에서는 수평위치와 무관하게 어느 access panel에서나 거의 동일한 양의 공기가 통과한다.

5.3 Access panel의 개폐에 따른 유동특성

본 연구에서 access panel의 개폐에 따른 유동특성을 고찰하기 위하여 Fig.5, Fig.6, Fig.7, Fig.8에 각각 AC1, AC2, AC3 그리고 AC4만 닫힌 경우의 기류분포를 도시하였다. 이때 닫히지 않은 나머지 3개의 access panel은 충분히 열려있다고(full opened) 가정하였다. 본 연구에서 주된 관심사는 청정실내 기류분포이므로 필터와 access panel사이의 유동특성에 관해서만 논하고자 한다. Fig.5에서 zone3과 zone4의 기류는 수직으로 하강하고 zone1에서는 필터로부터 수직하강하던 기류가 청정실 중간높이 이하부터는 AC1이 닫힌 영향으로 우측으로 편향되어 하강한다. 나머지 access panel에서는 통과하는 유선의 간격이 거의 동일하므로 거의 동등한 유량을 통과시킨다고 볼 수 있다. Fig.6에서는 우측 2개의 필터(필터종류 B)로부터 유출된 공기가 수직으로 하강하다가 AC2가 닫힌 영향으로 대부분 AC1을 통하여 유출되고 있다. 이때에도 AC1이 닫힌 경우와 마찬가지로 zone3과 zone4의 기류는 수직으로 하강한다. AC3가 닫힌 Fig.7에서는 zone4의 유선분포에서 공기의 수직하강성은 어느정도 유지가 되지만, zone1, zone2, zone3에서는 청정실 중간높이 이하의 유선이 AC1, AC2방향으로 균일하게 밀집하려는 경향을 가지므로 이 지역의 기류는 전반적으로 좌측으로 편중되어 있다. Fig.8에서의 유동특성은 하부 플레넘의 유출구로부터 가장 멀리 떨어진 AC4가 닫힘으로 인하여 청정실내의 전반적인 기류분포가 수직성을 크게 상실하고 있다.

유동특성의 더욱 상세한 관찰을 위하여 청정실의 중간높이인 X^* 가 0.1m에서의 속도벡터분포를 Fig.9 (a), (b), (c), (d), (e)에 나타내었다. Fig.9 (a)는 access panel이 전개(all opened)된 경우이며 Fig.9 (b), Fig.9 (c), Fig.9 (d), Fig.9 (e)는 각각 AC1, AC2, AC3, AC4가 닫힌 경우이다. 청정실의 중간높이에서의 속도벡터 분포형태는 Fig.9 (a), Fig.9 (b), Fig.9 (c)에서 거의 유사하게 나타난다. 즉 access panel이 전개된 경우와 AC1, AC2가 닫힌 경우에 있어서 천정필터로부터 청정실의 중간높이까지의 공기의 속도벡터 분포는

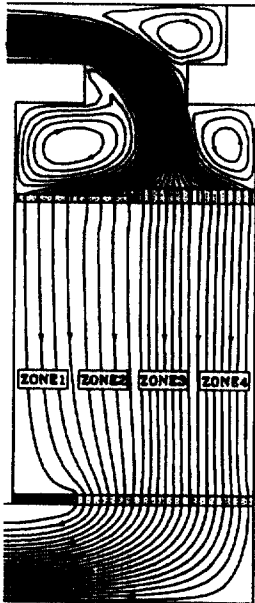


Fig.5 Visualization of flow characteristics : Distributions of stream lines with access panels(AC1-closed)

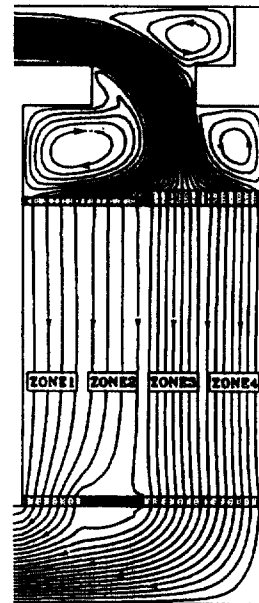


Fig.6 Visualization of flow characteristics : Distributions of stream lines with access panels(AC2-closed)

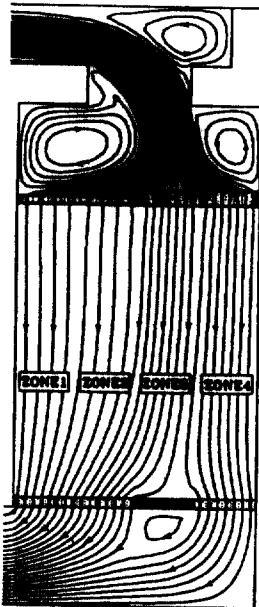


Fig.7 Visualization of flow characteristics : Distributions of stream lines with access panels(AC3-closed)

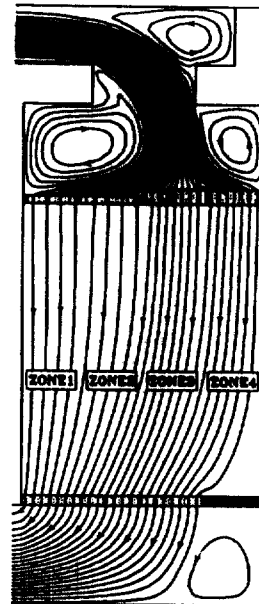


Fig.8 Visualization of flow characteristics : Distributions of stream lines with access panels(AC4-closed)

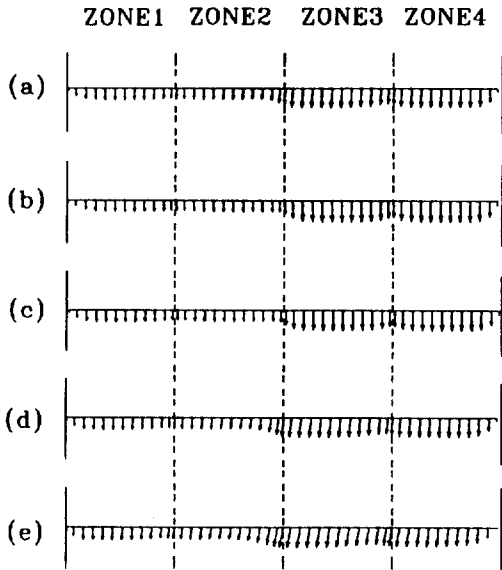


Fig.9 Distributions of velocity vector profiles at $X^*=0.1m$:
 (a) all opened : (b) AC1-closed :
 (c) AC2-closed : (d) AC3-closed :
 (e) AC4-closed

정성적으로 access panel개폐의 영향을 거의 받지 않는다고 생각된다. 그러나 AC3가 닫힌 Fig.9 (d)에서는 zone3, zone4의 속도벡터가 좌측방향으로 휘는 경향이 나타나며 AC4가 닫힌 Fig.9 (e)의 경우에는 zone3, zone4에서는 물론 zone2에서도 속도벡터가 좌측방향으로 휘는 경향을 나타낸다.

Fig.10은 AC1이 닫힌 경우의 청정실 필터하부 경계면으로부터 하류방향길이인 X^* 의 증가에 따른 각 zone에서의 평균유량 Q 의 변화량을 나타내었다. zone1과 zone2의 평균유량을 살펴보면, 필터의 하부면을 나타내는 X^* 가 0인 지점으로부터의 유량은 X^* 가 0.075m까지는 거의 일정하다. 그러므로 이 지점까지의 유량은 정량적으로 access panel의 개폐에 관한 영향을 거의 받지 않는다고 할 수 있다. 그러나 zone1의 유량이 감소된 이후부터는 상대적으로 zone2의 유량이 점차로 증가하여 zone3, zone4의 유량과 같아진다. zone3과 zone4를 통과하는 유량 Q 는 거의

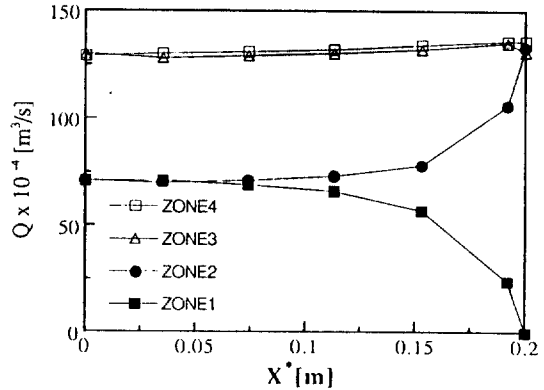


Fig.10 Distributions of average flow rate Q along the distance from the filter layer

동일한 양이며 X^* 가 증가함에 따라서 약간 증가하는 경향을 갖는다. 이상으로부터 AC1이 닫히는 영향을 받는 유동영역은 zone1과 zone2에서는 하부 2/3정도이고 zone3과 zone4는 영향을 받지 않는다.

5.4 2차원 해석결과와 1차원 해석결과와의 비교

Table 1에서는 본 연구의 2차원적 해석방법을 사용하여 access panel이 전개된 경우와 AC1, AC2, AC3, AC4순으로 닫힌 경우에 관하여 필터에서의 평균 압력강하량 ΔP_m 과 각 zone에서 $X^*=0.1m$ 인 지점의 평균속도 \bar{U} 를 나타내었다. 그리고 이와 비교하여 전기회로 유사성을 이용하는 1차원적 해법으로 구한, 필터에서의 평균 압력강하량과 평균 필터통과속도도 아울러 나타내었다. 이때 1차원 해석⁽⁹⁾에 사용된 수식은 다음과 같다.

$$\Delta P_m = \mu V_m \left(\frac{H_1}{W_3} \right) \left(\frac{2}{C_{l,A}} + \frac{2}{C_{l,B}} \right)^{-1} \dots \dots \dots (13)$$

$$\bar{U}_{z1} = \bar{U}_{z2} = \frac{\Delta P_m}{\mu \cdot C_{l,A}} \dots \dots \dots (14)$$

$$\bar{U}_{z3} = \bar{U}_{z4} = \frac{\Delta P_m}{\mu \cdot C_{l,B}}$$

여기서 ΔP_m 은 4개 필터에 의한 압력강하량의 산술평균이다. 그리고 \bar{U} 는 평균 필터통과속도를 뜻하며, 하첨자 z1은 zone1을 뜻한다. 하첨자 A와 B는 필터종류 A와 필터종류 B를 의미한다.

먼저, 필터에서의 압력강하량을 살펴보면, access panel이 전개된 경우에는 124[Pa]로써 1차원적 결과인 142[Pa]보다 13% 정도 작다. 그리고 AC1, AC2, AC3 및 AC4가 닫힌 경우에는 각각 129[Pa], 136[Pa], 131[Pa] 및 137[Pa]로써 각각 1차원적 결과보다 12%, 4%, 7%, 3% 정도 작게 나타났다.

$X^*=0.1m$ 인 지점의 평균속도를 살펴보면, access panel이 전개된 경우에는 \bar{U}_{z1} , \bar{U}_{z2} , \bar{U}_{z3} 및 \bar{U}_{z4} 가 0.155[m/s], 0.158[m/s], 0.269[m/s], 0.268[m/s]로써 1차원적 결과인 0.19[m/s], 0.19[m/s], 0.362[m/s], 0.362[m/s]보다 각각 19%, 17%, 25%, 26% 작게 나타났다. 그외의 나머지 경우중에서, AC4가 닫힌경우에 zone4의 평균 필터통과속도 \bar{U}_{z4} 는 1차원적 예측결과에 비하여 최대 30% 정도의 차이가 난다.

Table 1 Comparison pressure drop[ΔP_m] and average velocity[\bar{U}_z] between 2-D analysis and 1-D analysis.

Run	ΔP_m [Pa]	\bar{U}_{z1} [m/s]	\bar{U}_{z2} [m/s]	\bar{U}_{z3} [m/s]	\bar{U}_{z4} [m/s]
1-D Approx.	142	0.191	0.191	0.362	0.362
All - Opened	124	0.155	0.158	0.269	0.268
AC1- Closed	129	0.143	0.153	0.275	0.279
AC2- Closed	136	0.148	0.149	0.276	0.277
AC3- Closed	131	0.155	0.159	0.269	0.266
AC4- Closed	137	0.158	0.171	0.269	0.252

6. 결 론

본 연구에서는 청정실에서 access panel이 없는 경우와 access panel이 전개(all-opened)된 형태로 존재하는 경우에 관하여 유동특성을 비교함으로써 청정실에서 access panel의 역할을 고찰하였다. 이어서, access panel이 전개된 상태에서 좌측으로부터 한개의 access panel만이

닫힌 경우에 관한 청정실 내부 기류분포와 청정실 중간높이에서의 속도벡터분포를 고찰하였다. 청정실높이에 따라 각 zone에서의 평균유량특성을 고찰하였다. 마지막으로, 본 연구의 수치계산 방법에 의해서 해석된 필터에서의 평균 압력강하량과 각 zone에서의 평균 필터통과속도를 전기회로 상사성을 이용한 1차원적 결과와 비교하였다. 본 수치계산을 통하여 얻은 결과물 토의후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Access panel이 존재하는 청정실내에서, 유선은 하류로 갈수록 하부플레넘의 출구측으로 밀집되어지는 정도가 감소되고 각 access panel을 통과하는 유량은 균일하여진다. 따라서 access panel의 존재는 청정실내부 기류속도를 수평방향으로 균일화시키는 역할을 하여 하부플레넘의 출구영향을 배제시켜준다.
2. 청정실내 access panel층에서 access panel이 전개된 경우와 좌측으로부터 첫번째가 닫힌 경우, 그리고 두번째 것이 닫힌 3가지 경우에, 청정실 중간높이에서의 속도벡터분포는 거의 유사하게 수직하강하는 것으로 나타나지만, access panel층의 좌측으로부터 세번째, 네번째 것이 닫힌 경우에는 속도벡터가 하부 플레넘을 향하여 좌측으로 휘는 경향이 보인다.
3. 청정실높이에 따라 각 zone에서의 평균유량특성을 고찰한 결과, access panel층에서 좌측으로부터 첫번째 access panel이 닫힌 경우에, access panel이 닫힌 영향을 받게 되는 유동영역은 zone1과 zone2에서는 하부 2/3정도 이고 zone3과 zone4는 거의 영향을 받지 않는다.
4. Access panel이 전개된 경우에 필터에서의 압력강하량은 124[Pa]로써 1차원적 결과인 142[Pa]보다 13% 정도 작다. 그리고 $X^*=0.1[m]$ 인 지점에서 access panel이 전개된 경우에 각 zone을 통과하는 속도는 좌로부터 0.155[m/s], 0.158[m/s], 0.269[m/s] 및 0.268[m/s]로써 1차원적 결과인 0.191[m/s], 0.362[m/s], 및 0.362[m/s]보다 각각 19%, 17%, 25% 및 26% 정도 작게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 이광수, 1990, "CLEAN ROOM 기술과 응용", pp.86~92.
2. 오명도, 1990, "클린룸 오염입자 및 기류제어 기술", 클린룸기술과 오염입자에 관한 국제 심포지움, 서울, pp.69~121.
3. Maeda, M., Takenami, T. and Tanaka, A., 1986, "Studies on Rationalizing Air Flow in Clean Room(Part 1) : Air Flow Pattern in a Vertical Laminar Flow Type Clean Room", the 5th Proc. of JACA, pp.115~118.
4. Tanaka, A., Maeda, M. and Saiki, A., 1986, "Studies on Rationalizing Air Flow in Clean Room(Part 2) : Simulation Technique of Predicting Air Flow in Vertical Laminar Flow Type Clean Room by Porous Medium Formulation", the 5th Proc. of JACA, pp.119~122.
5. 강신형외, 1990, "클린룸 access panel 유동의 시뮬레이션", 서울대학교 부설 공학연구소 연구보고서, pp.6~10.
6. Patankar, S.V. and Spalding, D.B., 1978, "Computer Analysis of the Three Dimensional Flow and Heat Transfer in a Steam Generator", Forsch. Ingenieurwes., Vol. 44, pp.47.
7. Raber, R. R., 1982, "Pressure Drop Optimization and Dust Capacity Estimation for Deep-Pleated Industrial Air Filter Using Small Sample Data", Proc. of 3rd World Filtration Congress, pp.508~511.
8. Patankar S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill, New York.
9. 이재현, 박명식, 안강호, 김정호, 1992, "서로 다른 성능의 필터가 존재하는 청정실의 유동 특성에 관한 수치적 연구", 대한기계학회춘계학술대회논문집, pp.192~197.