초청정 클린룸 공조방식에 따른 기류특성에 관한 수치해석

노 광 철, 이 승 철*, 오 명 도**†
서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, *동해대학교 자동차공학과, **서울시립대학교 기계정보공학과

A Numerical Analysis on the Airflow Characteristics in Super Cleanrooms with Different Design Types

Kwang-Chul Noh, Seung-Chul Lee*, Myung-Do Oh**†
Graduate School of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea
**Department of Automotive Engineering, Donghae University, Donghae 240-713, Korea*
***Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea*

(Received April 28, 2003; revision received August 7, 2003)

ABSTRACT: We performed the numerical analysis on the airflow characteristics in the two type of cleanroom systems, which are the axial fan type (AFT) and the fan filter unit (FFU). A computational fluid dynamic model was applied to investigate and compare the nonuniformity, the deflection angle and the air ventilation effectiveness of the two designs of cleanrooms when dampers are adjusted and not adjusted. And the flow-resistance models of the various components were used in this simulation. We know that the airflow characteristics of the cleanrooms are largely affected by damper adjusting. And we also find out that the FFU system is superior to the AFT system through the comparison of the cleanroom performance indices.

Key words: Cleanroom(클린룸), Axial fan type system(축류팬시스템), Fan filter unit system (팬필터유닛시스템), Deflection angle(편향각), Nonuniformity(비균일도), Ventilation effectiveness(환기효율)

기 호 설 명

E_a : 환기효율
K : 투과율 [kg/m^{2}s^2]
NU : 비균일도
P : 압력 [N/m^2]
u : 속도 [m/s]

그리스 문자

α : 압력강하특성계수
β : 압력강하특성계수
θ : 편향각 [°]
τ : 국소평균연령 [s]
τ_n : 명목시간상수 [s]

하첨자

i : 방향지표
ave : 평균

† Corresponding author
Tel.: +82-2-2210-2756; Fax: +82-2-2248-5110
E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

1. 서 론

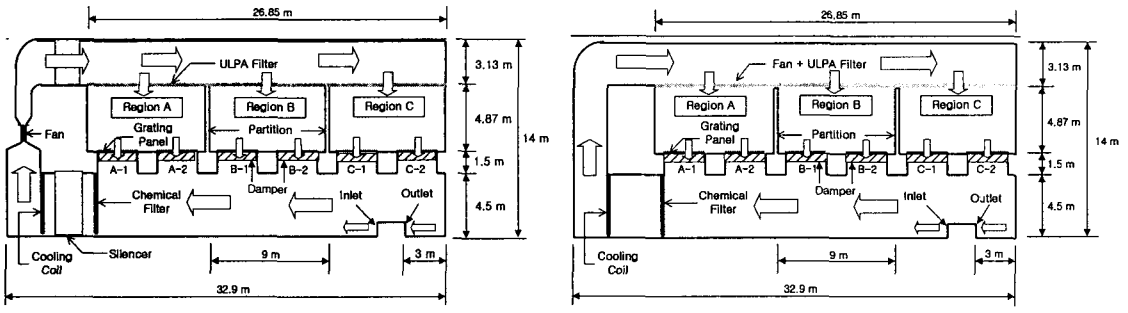
최근 들어 반도체용 웨이퍼(wafer)의 대구경화, 초고집적화, 패턴의 미세화가 추구됨에 따라 클린터널형(clean tunnel module) 시스템, 축류팬형(Axial Fan Type, 이하 AFT로 칭함) 시스템, 팬필터유닛형(Fan Filter Unit, 이하 FFU로 칭함) 시스템, 국소환경(mini-environment) 시스템 등과 같은 다양한 형태의 클린룸이 개발되어 현재 적용되고 있다. 이러한 초청정 클린룸 공조방식은 그 방식에 따라 반도체의 생산수율과 상당히 밀접한 연관성이 있기 때문에 그 중요성이 더욱 커지고 있고 GIGA급 시대의 도래로 더욱 다양한 공조방식들이 제안되고 있다.[1]

초청정 클린룸 공조에 있어서 많은 방식들이 제안되어지고 있으나 이에 대한 평가는 주로 시공 후, 많은 시간과 노력을 통한 실험적 방법으로 이루어지고 있다. 그러나 클린룸의 중요 평가인자인 기류와 청정도에 대해서는 방법상의 문제 등으로 실질적인 평가가 쉽지가 않을 뿐만 아니라 각각의 방식이 적용되어도 사용목적과 운전특성, 오염발생 정도가 각 시스템에 따라 다르기 때문에 상호간의 비교분석은 더욱 어렵게 된다.[1,2] 이러한 이유로 인하여 10여년 전부터 전산유체역학(CFD) 기법을 이용한 클린룸의 기류 및 오염확산분포 등에 대한 종합적인 비교, 평가기법이 개발되고 있으며 이에 대한 다양한 연구들이 계속 진행되고 있다.

국내의 반도체 산업이 급속히 발전하면서 1980년 후반부터 MEGA급 층류형 클린터널(clean tunnel) 클린룸에 대해서 유동특성과 오염입자의 확산특성,[3] 그리고 수치적인 연구에 사용되는 난류모델들에 대한 평가[4] 등의 연구가 수행되었고 클린룸 청정구역에서 유동특성을 예측해 보고 향상시키기 위하여 여러 가지 설계변수를 고려한 실험적인 연구[5,6]와 수치적인 연구[7]가 계속해서 진행되었다. 최근 장영철[8]은 FFU가 설치된 클린룸에서 내부의 열원이 존재하는 경우, 열 및 기류특성을 실험적, 수치적인 방법으로 고찰하였다. 또한 이 논문에서 수치해석적 결과가 대부분 실험적인 결과와 잘 일치하는 것을 보여주어 클린룸 연구에 있어서 전산유체역학적인 방법의 효용성을 높여 주었다.

국외에서는 최근 들어 Hu and Chuah[9]에 의해 일방향성 유동의 클린룸시스템에서 클린룸 공조방식(AFT와 FFU 시스템) 및 크기에 유동특성 및 환기특성 등을 수치적인 방법으로 비교, 분석함으로써 초청정 클린룸에 대한 연구를 수행하였다. 또한 클린룸의 작업영역에서 GIGA급 국소환경시스템(mini-environment system)의 사용이 증가함에 따라, 국소환경 내부와 주위에서의 유동 및 압력특성, 유해가스의 확산특성 등에 관한 연구들이 수행되었다.[10,11] 그러나 이상에서 서술한 바와 같이 국내에서는 수퍼클린룸과 GIGA급 클린룸시스템에 대한 연구가 아직까지 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 초청정 클린룸시스템으로 분류되는 AFT 시스템과 FFU 시스템에 대해서 전산유체역학 기법을 도입하여 2차원 유동특성을 해석하였다. 또한 구해진 기류분포 결과들을 이용하여 클린룸 기류분포 평가지표인 편향각(deflection angle), 비균일도(nonuniformity), 환기효율(ventilation effectiveness)을 기준으로 평가하였고 두 시스템에 대한 비교, 분석을 수행하였다.



(a) AFT system (b) FFU system

Fig. 1 System design of super cleanroom models.

2. 클린룸시스템 해석모델

2.1 AFT 시스템

AFT 시스템은 Open Bay 방식이라고도 하며 0.12 μm의 입자에 대해 Class 1~100 정도의 청정도를 필요로 하는 반도체 공장에 적용되고 있는 방식으로 에너지 절약 및 대응성을 동시에 해결할 수 있는 방식이다. 클린룸 필터 위의 천정공간에 하나의 Open Bay를 형성시키고 대형 축류팬에 의한 순환공기를 이용하여 청정시키는 공조방식이다.[1,2] Fig. 1(a)는 본 연구에서 모델로 이용한 AFT 시스템의 구성을 보여준다. 모델로 사용된 2차원 클린룸 전체의 크기는 66 m(L)×14 m(H)이지만 중앙부를 중심으로 대칭형상이기 때문에 수치적 모델에서는 왼쪽부분의 반만을 고려하였다. 모델에서 상부플레넘(upper plenum) 클린룸, 하부플레넘(lower plenum)의 높이는 각각 3.13 m, 4.87 m, 6 m이다. 클린룸은 세 영역으로 나누어진 것으로 가정하였고, 이후 결과논의의 편의를 위하여 각각의 영역에서 유출구를 1, 2로 구분하여 표기하였다. 압력강하의 원인이 되는 ULPA 필터, 패널(panel), 화학필터(chemical filter), 소음기(silencer), 냉각코일의 위치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 그림의 좌측 하단에 위치하고 축류팬은 리턴덕트 내에 위치한다.

2.2 FFU 시스템

FFU 시스템은 축류팬 설치공간 및 기타의 부대시설의 설치공간이 절약되고 대응성도 뛰어나며 에너지 절약 측면에서도 우수한 시스템으로 알려져 있다. 이 방식은 1990년도 초반부터 도입되어 최근에 신설되는 중·대규모의 초청정 클린룸에 많이 적용되고 있는 시스템으로 필터 상부측의 플레넘 압력이 클린룸 내부보다 낮기 때문에 천정면의 필터를 제외한 부분에서 공기유출의 염려를 줄일 수 있는 특징이 있다. 순환공조계통은 AFT 방식과 동일하나 공기의 유동이 필터의 상부에 개별적으로 설치된 팬에 의하여 공급되어진다는 점에서 다른 방식과 구별되고 입경 0.05~0.12 μm의 입자를 기준으로 Class 1~100 정도의 청정도가 유지된다. 부분적인 유속의 변경이 가능하며 시공 후의 레이아웃(layout)을 변경하기가 용이한 장점을 가지고 있다.[1,12] Fig. 1(b)는 본 연구에서 모델로 이용한 FFU 시스템의 구성을 보여준다. 시스템의 크기와 구성은 AFT 시스템과 거의 동일하다. 다만 팬과 필터가 유닛으로 구성되어 있어 리턴덕트 내에 축류팬이 존재하지 않기 때문에 하부 플레넘과 상부 플레넘에 소음기가 없는 점이 다르다. FFU 클린룸에서의 공기순환용 팬은 FFU의 특성을 고려하여 ULPA 필터와 동일한 위치에 설치되어 있는 것으로 가정하였다.

3. 평가지표

일반적으로 클린룸을 평가하는 지표로는 청정도, 기류분포, 환기횟수, 풍속, 온·습도, 실내·외 압력차, 소음, 진동, 조도 등이 있다.[2,13] 이중에서 유동특성에 관한 평가지표(performance indices)로는 비균일도(Non-Uniformity, NU), 편향각(deflection angle, θ), 환기효율(ventilation efficiency, E_a)의 3가지가 일반적으로 사용된다.[9]

3.1 비균일도

클린룸 공간에서 일방향성 유동(unidirectional flow)에 대한 또 다른 성능평가지표로 비균일도가 있다. 비균일도는 클린룸 필터 하부에서의 유동특성으로 이는 클린룸 기류분포에 중요한 영향을 미친다.[9] 따라서 본 연구에서는 이러한 특성을 분석하기 위하여 ULPA 필터의 하부와 클린룸 내에서 실제 작업이 수행되는 위치, 즉 클린룸 바닥패널에서 위로 1.5 m 상부에서 유동의 비균일도를 산정하였다. 비균일도는 평균속도($|\vec{u}_{ave}|$)에 대한 측정점에서의 표준편차의 비로서 정의되고 식(1)과 같이 표현된다.

$$NU = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(|\vec{u}|-|\vec{u}_{ave}|)^2/(n-1)\right]^{1/2}}{|\vec{u}_{ave}|} \quad (1)$$

여기서, n은 측정점의 총개수를 나타낸다. ISO[13]의 규격에 따르면 클린룸에서 비균일도는 20% 이내로 유지되어야만 하는 것으로 되어 있다.

3.2 편향각

편향각은 클린룸 작업영역(working area)에서 수직방향에 대한 공기유동의 편향된 각, 즉 공기의 편평도(air parallelism)로서 일방향성 유동에 대한 특성을 나타낸다. 편향각은 클린룸 바닥에서 1.5 m 상부에서 측정되고 편향각의 크기는 주유동방향($-y$축 방향)을 기준으로 시계방향은 (−)값을, 반시계방향은 (+)값을 갖는다. 편향각은 교차오염(cross contamination)을 방지하기 위하여 작은 값을 가져야 하고 ISO[13]의 규격에 따르면 클린룸에서 14° 이내로 제한되어야 하는 것으로 되어 있다.

3.3 환기효율

앞서 논의한 유동의 편향은 공기의 이동경로를 변화시키고 이로 인하여 클린룸 특정위치에서의 환기효율이 바뀌게 된다. 이러한 환기효율은 실(room)의 공기가 얼마나 빨리 대체되는가를 나타내는 지표가 된다.[14] 환기효율은 명목시간상수(τ_n)과 공기교환시간(τ_r)의 비로써 구할 수 있다. 여기서 명목시간상수는 실의 공기교환율의 역수로서 실의 체적(V)을 공기유량(Q)으로 나눈 값과 같다. 그리고 공기교환시간은 실평균 공기연령(room mean age of air)의 두 배의 값과 같다. 이로부터 환기효율은 식(2)와 같이 계산된다.

$$E_a = \frac{(V/Q)}{2\tau} \tag{2}$$

여기서, $\langle\tau\rangle$는 실평균 공기연령으로 국소평균연령(local mean age)의 평균값을 나타낸다. 국소평균연령은 실로 급기된 공기가 실내의 임의의 점에 도달하는 데 걸리는 평균시간을 나타낸다.[14]

일반적으로 계산되는 환기효율은 급기부에서 실내로 공기를 배분하는 능력을 나타낸다. 그러나 클린룸에서는 외기량이 내부의 공기순환량에 비해 무시할 만큼 작고 대상영역이 클린룸 작업영역으로 한정되기 때문에 급기부를 그대로 적용할 수 없다. Hu and Chuah[9]는 팬의 위치를 중심으로 급기부를 정의하였으나 클린룸 방식에 따라 팬의 위치와 크기가 달라지기 때문에 이러한 방법을 그대로 적용하여 시스템들과의 비교는 매우 어렵게 된다. 또한 상부플레넘에서의 기류분포가 클린룸의 환기효율과 상당히 밀접한 관련성이 있는 것으로 알려져 있기 때문에,[5,6] 본 연구에서는 상부플레넘과 리턴덕트의 연결부를 급기의 출발점으로 하여 공기교환시간과 환기효율을 계산하였다. 유동이 완벽한 일방향성이라면 환기효율은 100%가 되기 때문에[9] 이를 이용하여 계산된 결과들을 정량적으로 비교 · 분석하였다.

4. 수치해석이론 및 방법

본 연구에서는 초청정 클린룸 AFT와 FFU 시스템에 대해서 클린룸의 깊이 방향으로 충분히 길기 때문에 계산영역을 2차원으로 가정하여 클린룸을 세 영역으로 분할하고, 실제와 같이 클린룸 바닥패널 하단에 댐퍼가 설치되어 기류를 조정하는 것으로 모델링하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 지배방정식

클린룸 시스템에서의 유동특성을 기술하는 정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식이며 이러한 방정식을 수식으로 표현하면 Table 1과 같다. 본 연구에서는 실내 열 및 유동해석에서 8가지 다른 2방정식 난류모델(two equation turbulence model)을 사용하여 예측한 Chen의 연구에 의해 RNG $k-\varepsilon$ 모델의 사용이 다른 모델에 비해 좀더 우수하게 예측된 결과[15]에 근거하여 RNG $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였으며, 각 식들에서의 기호선정은 일반적인 교과서에서의 예를 따랐다.[16,17]

환기효율을 구하기 위해서는 모든 위치에서의 국소평균연령을 구해야 한다. 국소평균연령을 구하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 체강법(step-down method)[14]을 적용하였고 식(3)을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left| u_i\tau - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\mu}{\sigma_l}+\frac{\mu_t}{\sigma_t}\right)\frac{\partial\tau}{\partial x_i}\right| = 1 \tag{3}$$

식(3)을 풀기 위하여 상부 플레넘과 리턴덕트의 연결부를 입구로 하고 클린룸 바닥패널을 출

Table 1 Governing equations and model coefficients

Continuity equation: $\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0$

Momentum equation: $\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right\}+S_{u_i}$

Turbulence kinetic energy equation: $\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\frac{\mu+\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right\}+G_k-\rho\varepsilon$

Turbulence dissipation rate equation: $\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\frac{\mu+\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right\}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-\rho R$

where, $\mu_t=\frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$, $G_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$, $R=\frac{C_\mu \eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $\eta=\frac{Sk}{\varepsilon}$,

$S=(2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$, $S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$, $C_\mu=0.085$, $C_{1\varepsilon}=1.42$, $C_{2\varepsilon}=1.68$

$\sigma_k=0.719$, $\sigma_\varepsilon=0.719$, $\sigma_l=1.0$, $\sigma_t=1.0$, $\beta=0.012$, $\eta_0=4.38$

구로 하여 식(4)와 같은 경계조건을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \tau &= 0 \quad ; \text{inlet} \\ \frac{\partial \tau}{\partial x_i} &= 0 \ ; \text{outlet} \end{aligned} \tag{4}$$

4.2 경계조건

Fig. 1은 각각 전체 클린룸시스템의 절반의 단면을 보여주고 있다. 클린룸의 형상이 중앙을 중심으로 대칭이기 때문에 중앙단면을 대칭경계조건으로 처리하였다.

본 연구에서는 클린룸 ULPA 필터 하부에서 유속 0.35 m/s를 기준으로 계산을 수행하였다. 이를 위하여 AFT 시스템의 경우, 축류팬을 모멘텀 소스로 처리하였고 클린룸 필터 하단에서의 평균 유속이 약 0.35 m/s가 되도록 하였다. FFU 시스템의 경우, 팬필터유닛은 팬과 필터를 한 유닛으로, 즉 모멘텀 소스와 압력강하요소가 동시에 존재하는 것으로 처리하였고 팬의 유속은 0.35 m/s로 처리하였다. 이때 클린룸 전체유량은 두 시스템 모두 약 33,000 CMH이다. 외부로부터의 급기되는 양은 클린룸의 유동특성에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 순환유량의 약 5%가 유입되는 것으로 처리하였다. 배기량은 출구경계조건으로 처리하여 유동의 방향과 크기가 질량보존의 결과로 인하여 결정될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 지배방정식과 함께 사용된 경계조건의 상세한 내용은 Table 2에 나열하였다.

그리고 클린룸 상부의 필터, 하부의 패널, 화학필터, 소음기, 냉각코일에서의 압력 강하량은 Darcy's law를 이용한 식(5)를 이용하여 계산하였고,[16] 이때 사용된 계수값들은 Table 3과 같다. Table 3의 계수값들은 참고문헌[7,8,18]에 나와 있는 내용을 근거로 작성된 것이다.

Table 2 Boundary conditions

Inlet: $u_{in}=0.92$ m/s, $k_{in}=\frac{3}{2}(u_{in}\cdot I)^2$, $\varepsilon_{in}=C_\mu^{\frac{3}{4}}k^{\frac{3}{2}}/l$

Outlet: $\frac{\partial u}{\partial x}=0$, $\frac{\partial k}{\partial x}=0$, $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}=0$

Wall: $u=v=w=0$, $\frac{\partial k}{\partial x}=\frac{\partial k}{\partial y}=\frac{\partial k}{\partial z}=0$, $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}=\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}=\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=0$

where, $I=0.05$, $l=0.1\times D_h$

Table 3 Characteristic coefficients of the pressure drop for the system components

Components	α_i	β_i
ULPA filter	0	3,600
Chemical filter	0	760
Silencer	0	17.5
Panel	18.4	0.02
Cooling coil	0	155
Damper, region A	25	0.02
Damper, region B	13	0.02
Damper, region C	4	0.02

$$-K_i u_i = \frac{\partial P}{\partial x_i}, \quad K_i = \alpha_i |\vec{u_i}| + \beta_i \qquad (5)$$

이때 클린룸 상부에 있는 ULPA 필터 내에서의 난류량은 난류강도 0.1, 길이척도 0.01의 값을 사용하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서는 AFT 시스템과 FFU 시스템에서 압력강하요소의 유무에 따른 유동특성변화를 평가하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 클린룸 패널 하단부에 압력강하요소(댐퍼)가 설치되어 조정된 것으로 가정하였다. 이때 댐퍼에 의한 압력강하량의 처리도식(5)을 이용하였고, 각각에 대한 압력특성계수는 Table 3에 제시되어 있다. 이때 압력강하요소는 각 영역에서 클린룸 하단 출구의 왼쪽에만 설치되어 있는 것으로 처리되었고 AFT 시스템과 FFU 시스템 모두 동일한 값이다.

4.3 수치해석방법

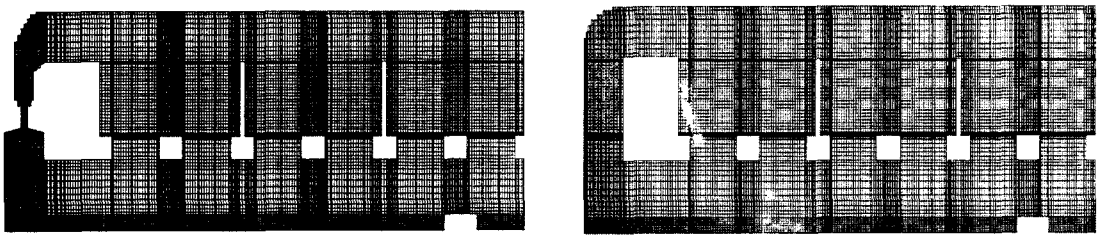
본 연구에서는 Table 1에 나열된 지배방정식을 풀기 위하여 상용 CFD 코드인 STAR-CD[16]를 사용하였다. 지배방정식의 대류항을 수치적으로 계산하기 위해서 상류차분도식(upwind differencing scheme)을 사용하였고, 속도장을 얻기 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘을 사용하였다.[17] 계산시 수렴판정조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하일 때로 정하였다. 계산에 사용한 제어체적의 수는 AFT 시스템 19,318개, FFU 시스템 19,923개로 비균일격자계를 사용하였다. Fig. 2는 계산에 이용된 제어체적의 형상을 보여준다. 그리고 제어체적의 개수를 x, y축 방향으로 2배씩 늘려 기류분포해석을 수행한 결과에서도 각각의 위치에서 1% 이내의 오차를 보여 초기의 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결과 및 고찰

5.1 기류분포 및 비균일도

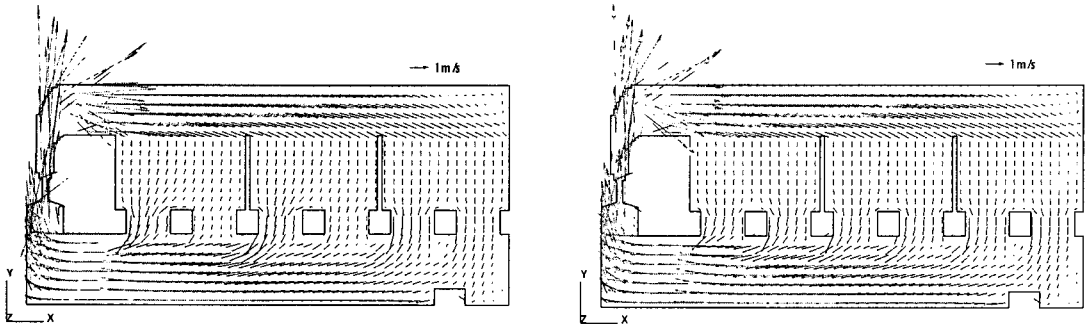
Fig. 3과 Fig. 4는 각각 AFT 시스템과 FFU 시스템에서의 정상상태 기류분포를 나타낸다. (a)는 댐퍼가 설치되어 있지 않은 경우이며, (b)는 댐퍼가 설치되어 조정된 세 영역(Fig. 1의 region A, B, C)에서 유량이 ±1% 이내로 맞추어진 경우이다. Table 4에서 보는 바와 같이 댐퍼가 없는 경우에는 세 영역에서의 질량유량이 3.78 kg/s으로 비슷한 것을 볼 수 있고 각 영역에서는 2개의 유출구 중 좌측의 유출구로 더 많은 유량이 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 다음에서 논의할 비균일도(nonuniformity)와 편향각을 통해서도 확인된다.

Fig. 5는 x방향 거리에 따른 클린룸 바닥패널 상부 1.5 m인 위치와 ULPA 필터의 하단에서 계



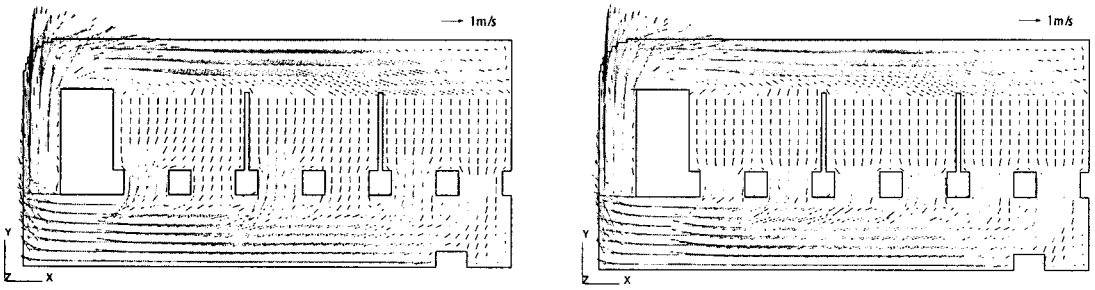
(a) AFT system (b) FFU system

Fig. 2 Grid patterns.



(a) Without damper adjusting (b) With damper adjusting

Fig. 3 Velocity distributions of the AFT system.



(a) Without damper adjusting (b) With damper adjusting

Fig. 4 Velocity distributions of the FFU system.

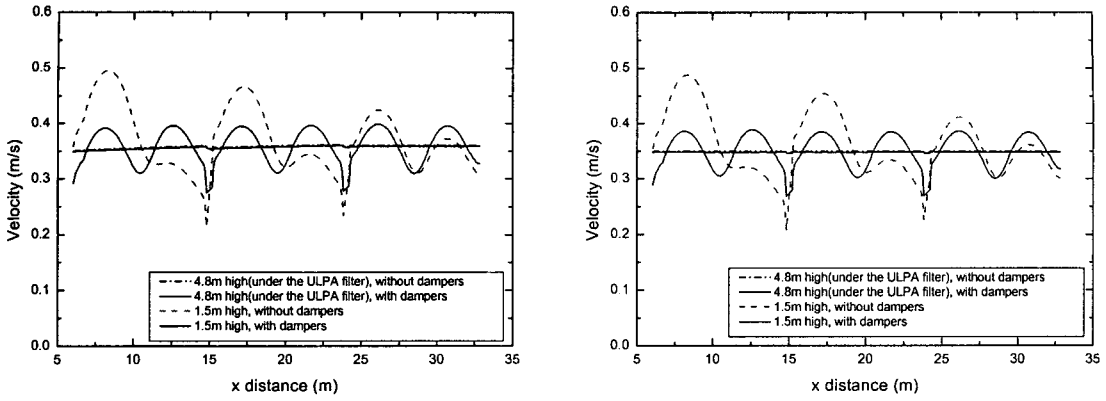
Table 4 Mass flowrate at the exit of cleanroom

System type	Damper installation	Mass flowrate (kg/s)					
		A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2
AFT	No	2.684	1.113	2.435	1.335	2.117	1.666
	Yes	1.899	1.895	1.885	1.886	1.901	1.883
FFU	No	2.638	1.094	2.371	1.299	2.052	1.618
	Yes	1.865	1.867	1.834	1.835	1.840	1.830

산된 속도분포의 결과이다. 여기서 x방향의 거리는 Fig. 1에서 왼쪽 아래의 모서리를 원점으로 기준한 거리이다. AFT 시스템의 경우, 댐퍼조정의 여부와 상관없이 ULPA 필터의 하단에서는 평균 속도가 0.359 m/s로 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 그러나 댐퍼가 설치되지 않은 경우, Table 4에서 알 수 있듯이 클린룸 바닥패널의 1.5 m 상부에서는 유동의 쏠림현상으로 인하여 유속의 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 특히 각 영역의 좌측 유출구로 유량이 크게 흐르는 것을 볼 수 있다. 이것은 각 영역에서 유량이 좌측으로 쏠리는 현상을 보여주는 결과로서 클린룸에서 유동의 균일도를 확보하기 위한 댐퍼의 설치위치와 조정의 정도를 알려 주는 것이다.

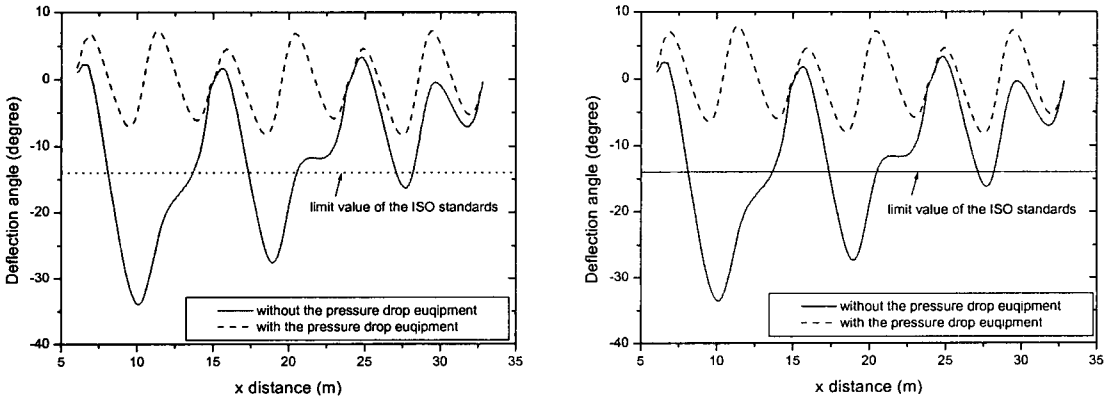
본 연구에서는 식(5)와 Table 3의 압력강하특성계수(α_i, β_i)를 이용하여 댐퍼가 설치되어 조정되는 것처럼 모델링을 하였고, 계산결과로 클린룸의 세 영역에서 거의 동일한 유량이 흐르는 것을 볼 수 있었다. 클린룸 바닥패널 상부 1.5 m인 곳에서의 유속은 0.359±0.5 m/s 이내로 매우 균일한 것을 나타났고 이는 댐퍼가 설치되지 않은 경우(0.27~0.49 m/s)보다 훨씬 우수한 결과이다. Fig. 5에서 속도가 0.3 m/s 이하로 나타나는 부분은 칸막이(partition)가 위치한 부분이다.

FFU 시스템의 경우에서도 댐퍼조정의 여부에 관계없이 ULPA 필터의 하단에서는 평균 속도가 0.350 m/s로 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. AFT 시스템에서와 마찬가지로 댐퍼가 설치되지 않은 경우에는 A-1, B-1, C-1 순으로 많은 유량이 흐르는 것을 볼 수 있지만 댐퍼가 설치되어 조정된 경우에는 세 영역에서 거의 동일한 유량이 흐르는 것을 볼 수 있었다. 클린룸 바닥패널



(a) AFT system (b) FFU system

Fig. 5 Velocity distribution for x distance in the two type cleanrooms.



(a) AFT system (b) FFU system

Fig. 6 Deflection angle of vertical flow for x distance in the two type cleanrooms.

로부터 1.5 m 상부에서 계산된 유속은 0.350±0.5 m/s로 매우 균일하게 나타났고 이는 댐퍼가 설치되지 않은 경우(0.26~0.48 m/s)보다 우수한 결과이다.

그리고 Fig. 5의 (a), (b)를 통하여 기류분포 평가지표의 하나인 비균일도를 측정해 볼 수 있다. 비균일도는 클린룸 ULPA 필터 하단에서 평균속도에 대한 속도 표준편차의 비로서 평가되는데 AFT 시스템에서는 댐퍼조정의 여부에 따라 각각 7.1×10^{-3}, 7.86×10^{-3}으로 측정되었고, FFU 시스템에서는 각각 9.06×10^{-4}, 10.57×10^{-4}으로 측정되어 FFU 시스템이 AFT 시스템보다 10^{-1} order 정도 우수한 것으로 측정되었다. 이러한 결과들은 모두 ISO 기준치[13]인 0.2를 만족하는 것으로 나타났다.

5.2 편향각

Fig. 6은 x방향 거리에 따른 클린룸 바닥패널 위로 1.5 m 상부에서의 편향각(deflection angle)을 나타낸다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 두 시스템 모두 x방향 거리에 따라서 비슷한 경향을 보이는데 이는 시스템의 길이가 커지면서 편향각이 비슷하게 나타나는 Hu and Chuah[9]의 결과와 잘 일치한다. 그러나 댐퍼가 조정되면 편향각은 상당히 달라지게 된다. AFT 시스템의 댐퍼가 없는 경우에는 유동의 쏠림현상 때문에 세 영역 모두에서 유동이 좌측으로 향하는 것을 볼 수 있고, 이때 A-1, B-1, C-1에서의 편향각은 각각 −34°, −28°, −17°을 갖는 것으로 나타났다. 댐퍼가 설치되어 조정된 경우에는 각 영역에서 중앙 지지

대를 중심으로 좌우대칭의 형상이 나타났고 편향각은 −8.4~7.2° 이내의 값을 갖는다. FFU 시스템의 댐퍼가 설치되지 않은 경우에도 유동의 쏠림현상 때문에 각 영역에서 유동이 좌측으로 편향되는 것을 볼 수 있었고, A영역에서 가장 큰 편향각(−33.6°)을 갖는 것으로 나타났다. 그러나, 댐퍼가 설치되어 조정된 경우에는 AFT 시스템에서와 같이 각 영역에서 가운데의 지지대를 중심으로 좌우대칭의 유동형상이 나타났지만 편향각은 −8.0~8.0 이내의 값으로 AFT 시스템보다 약간 작은 값을 보였다.

그리고 두 시스템 모두 댐퍼가 조정된 경우에는 ISO[13] 규격인 14° 이내를 만족하고 있지만 댐퍼가 설치되지 않은 경우에는 ISO 기준치를 훨씬 초과하는 것으로 나타났다.

5.3 환기효율

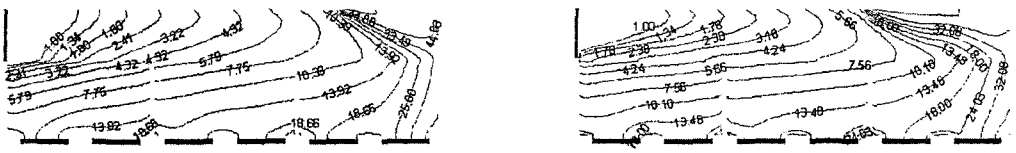
Fig. 7은 댐퍼가 설치되어 조정된 AFT 시스템과 FFU 시스템에서 공기의 국소평균연령의 분포이다. 이는 상부 플레넘의 입구로 유입된 공기가 클린룸의 임의의 위치까지 도달하는 데 걸리는 시간을 나타낸다. 본 연구에서 계산된 클린룸에서의 실평균 공기연령과 환기효율(ventilation effectiveness)은 AFT 시스템, 댐퍼가 조정된 경우에는 13.87초, 48.93%, 댐퍼가 없는 경우에는 14.10초, 48.13%, FFU 시스템, 댐퍼가 조정된 경우에는 13.93초, 49.94%, 댐퍼가 없는 경우에는 14.13초, 49.24%로 계산되었다. 클린룸에서의 실평균 공기연령과 환기효율은 댐퍼의 유·무에 따라 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

그리고 Fig. 7에서의 등고선(contour line)은 A, B영역에서 AFT 시스템보다 FFU 시스템이 더 완만한 경사를 보이는데 이는 공기의 국소평균연령 분포가 더 균일한 것을 의미한다. 따라서 A, B영역까지는 AFT 시스템보다 FFU 시스템이 환기가 잘 이루어져 오염이 발생되더라도 확산은 작을 것으로 예측된다. 또한 두 종류의 시스템 모두 A, B, C영역 순으로 공기의 국소평균연령이 짧은 것을 볼 수 있다. 또한 두 시스템 모두 C영역 상부의 상부 플레넘에서는 공기가 충분히 도달하지 못하여 국소평균연령이 상당히 큰 것을 볼 수 있었고 이곳에서의 공기연령 최대값은 약 64초 정도로 측정되었다. 이 결과로부터 C영역에서 오염물질이 발생한다면 쉽게 환기가 되지 않아 오염의 확산이 장시간 지속될 것으로 예측할 수 있다.

Table 5 Calculated system performance indices for velocity

Case	System type	Damper installation	θ (deg.)	NU ($\times 10^{-4}$)	E_a (%)
1	AFT	No	−34 ~3.4	78.6	48.13
2		Yes	−8.4 ~7.2	71.0	48.93
3	FFU	No	−33.6 ~3.3	10.57	49.24
4		Yes	−8.0 ~8.0	9.06	49.94

Table 5는 이상에서 논의한 AFT 시스템과 FFU 시스템의 결과들을 기류분포에 대한 평가지표를 기준으로 정리한 것으로 2차원 해석에 의한 결과들을 보여준다. 앞서 논의한 바와 같이 결과 값들이 크게 차이가 나는 것은 아니지만 Hu and Chuah[9]의 연구에서처럼 시스템의 길이가 작아지면 성능지표들은 현저한 차이를 보일 것으로 판단된다.



(a) AFT system (b) FFU system

Fig. 7 Distribution of local mean age of air in the two type cleanrooms with damper adjusting.

6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 두 종류의 초청정 클린룸에 대한 수치적인 유동특성 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에 사용된 두 가지 시스템에서 유동이 좌측으로 쏠리는 현상을 관찰할 수 있었으며 이는 압력강하량이 조절된 댐퍼의 수치적 모델링을 통하여 균일한 유동특성을 갖도록 제어할 수 있었다.

(2) 클린룸 필터의 하단과 바닥패널 1.5 m 상부에서 계산된 속도분포의 관찰을 통하여 두 시스템 모두 비균일도는 ISO 기준치(20%)를 만족하는 것으로 측정되었고 댐퍼조정의 여부에 따라 속도분포의 결과가 현저한 차이를 보였다.

(3) 편향각은 두 시스템 모두 비슷하게 관찰되었으며 댐퍼가 설치되어 조정되기 전에는 ISO 기준치(14°)를 만족시키지 못하였으나 설치된 후에는 ISO 기준을 만족하였으며 각 영역에서 중앙지지대를 중심으로 좌우대칭의 형상을 나타냈다.

(4) 공기연령의 개념을 도입하여 계산된 환기효율은 댐퍼조정의 여부에 따라 약 1.5% 정도로 큰 차이는 없었으나 등고선의 기울기를 통하여 A, B영역까지는 FFU 시스템의 성능이 AFT 시스템보다 더 우수한 것으로 나타났다.

(5) 클린룸에서 기류분포에 대한 평가지표를 기준으로 평가한 결과 본 연구에 사용된 두 시스템 중 FFU 시스템의 성능이 AFT 시스템보다 약간 우수한 것으로 관찰되었다.

현재까지의 정상상태 유동특성 해석과 이에 대한 평가는 클린룸 설계를 위한 기본 정보는 제공할 수 있지만, 클린룸 운전 중에 동적으로 발생하는 입자의 오염확산이나 GIGA급 반도체 생산에서 문제가 되는 가스의 오염확산에 대한 평가는 상당히 어렵다. 따라서 이에 대한 평가를 위해서는 교차오염(cross contamination), 확산거리(propagation distance), 회복시간(recovery time) 등의 오염확산 평가지표를 도입하여 클린룸 동적 특성에 대한 체계적인 평가가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. Oh, M. D., 2002, A trend of GIGA level cleanroom technology, International Symposium on Clean Technology and Management for Indoor Air, Korea Air Cleaning Association, pp. 17-62.
2. Kim, K. Y., 1995, Next generation cleanroom technology and air quality control, Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 24, No. 1, pp. 33-43.
3. Yang, H. C., Oh, M. D. and Lee, C. S., 1987, Study on the characteristic of the air flow and particle diffusion in the cleanroom, Preceedings of the SAREK 1987 Winter Annual Conference, pp. 60-65.
4. Oh, M. D. and Lee, C. S., 1987, Study on the laminar and turbulent flow sharing for the particle control in the cleanroom, Preceedings of the SAREK 1987 Summer Annual Conference, pp. 47-54.
5. Bae, G. N., Lim, H. K. and Oh, M. D., 1989, A experimental study on the airflow characteristics for clean tunnel type cleanroom design, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 1, No. 1, pp. 32-45.
6. Oh, M. D., Bae, G. N., Kim, S. C. and Lee, S. C., 1989, Airflow characteristic experiments for the upper plenum design of clean room, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 1, No. 4, pp. 276-289.
7. Kang, S. H., Jeon, W. P. and Oh, M. D., 1990, Effects of the floor panel on flows in a vertical laminar flow type clean room, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 2, No. 4, pp. 303-315.
8. Chang, Y. C., 1998, Study on the thermal and fluid characteristic in the cleanroom, Society of Air-Conditioning and Refrigeration-Lecture on the Industrial equipments, pp. 43-55.
9. Hu, S. C. and Chuah, Y. K., 2003, Deterministic simulation and assessment of air-recirculation performance of unidirectional-flow cleanrooms that incorporate age of air concept, Building and Environment, Vol. 38, No. 4, pp. 563-570.

10. Jancoski, C. A. and Sinclair, J. D., 1997, High isolation minienvironment for process involving toxic substances, Proceedings-Institute of Environmental Sciences, pp. 117-121.
11. Hu, S. C., Chuah, Y. K. and Yen, M. C., 2002, Design and evaluation of a minienvironment for semiconductor manufacture process, Building and Environment, Vol. 37, pp. 201-208.
12. Cho, S. J., 1997, Cleanroom and contamination control, Society of Air-Conditioning and Refrigeration-Lecture on the Refrigeration, pp. 3-15.
13. ISO 14644-1, 1999, Cleanrooms and associated controlled environments-Part 1: Classification of air cleanliness, ISO, Geneva.
14. Sandberg, M., 1983, Ventilation efficiency as a guide to design, ASHRAE trans., Vol. 89, Pt. 2B, pp. 455-479.
15. Chen, Q., 1995, Comparison of different k-ε models for indoor airflow computations, Numerical Heat Transfer, Part B, Vol. 28, pp. 353-369.
16. Computational Dynamics Ltd., STAR-CD Version 3.15 User Manual, 2002, Computational Dynamics Ltd.
17. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, DC.
18. Pui, Y. H., 2000, Filter pleating designs, International Symposium on Air Cleaning Technology, Korea Air Cleaning Association, Part 3, pp. 1-47.