

# 광식각공정이 있는 클린룸에서의 3차원 기류 및 동적교차오염에 관한 연구

노광철\* · 오명도† · 이승철\*\*

(2003년 12월 18일 접수, 2004년 3월 26일 심사완료)

## A Study on the 3-D Airflow and Dynamic Cross Contamination in the Photolithography Process Cleanroom

Kwang-Chul Noh, Myung-Do Oh and Seung-Chul Lee

**Key Words:** Cleanroom(클린룸), Fan Filter Unit(팬필터유닛), Dynamic Cross Contamination(동적교차오염), Photolithography Process(광식각공정)

### Abstract

We performed the numerical study on the characteristics of the 3-D airflow and dynamic cross contamination in the photolithography process cleanroom. The nonuniformity, the deflection angle and the global cross contamination were used for analyzing the characteristics and performances of cleanroom. From the numerical results, we knew that the airflow characteristics of the cleanrooms are largely affected by the porosity of panel and the adjustment of dampers and the global cross contamination varies with the location of source and the passage of time through the concentration ratio.

#### 기호설명

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

#### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\alpha$  : 압력강하특성계수 I  
 $\beta$  : 압력강하특성계수 II

$\theta$  : 편향각 [°]

#### 하첨자

$i$  : 방향지표  
 $in$  : 입구

### 1. 서론

GIGA급 클린룸 시대의 도래로 인하여 클린룸 내부에서의 오염은 입자뿐만 아니라 가스상 오염 (airborne molecular contamination)이 더욱 심각한 문제로 대두되고 있다. 클린룸에서의 유해가스는 반도체공정 중에 발생하는 경우뿐만 아니라, 공정장비, 인체, 클린룸 벽체, 외기, 필터재료 등에 의해 발생한다. 이러한 유해가스는 단선, 쇼트선의 결함을 일으키는 입자와 함께 실리콘 웨이퍼의 표면과 막형성 후의 계면에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히 광식각공정(photolithography

† 책임저자, 회원, 서울시립대학교 기계정보공학과  
E-mail : mdoh@uos.ac.kr

TEL : (02)2210-2547 FAX : (02)2248-5110

\* 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

\*\* 회원, 동해대학교 자동차공학과

process)에서는 암모니아(NH<sub>3</sub>) 가스가 화학증폭형 포토레지스트의 선쪽에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다.<sup>(1)</sup>

클린룸에서 이러한 가스오염확산에 대한 영향은 클린룸 특성상 실제적인 평가가 어렵기 때문에 전산유체역학(CFD) 기법을 이용하여 기류 및 오염확산분포 등에 대한 연구들이 많이 수행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 국내에서는 MEGA급 클린룸 내에서의 2차원 유동 및 오염입자의 확산특성, 난류모델들에 대한 평가 등의 연구가 수행되었고,<sup>(4-6)</sup> 최근 들어 수퍼클린룸에서 2차원 가스오염 분석에 대한 비교 연구가 수행되었다.<sup>(3)</sup> 국외에서는 일방향성 유동의 초청정 클린룸시스템에서 클린룸 공조방식과 크기에 따른 유동 및 환기특성 등을 2차원적으로 해석하고 그 결과를 비교, 분석한 연구가 수행되었고, GIGA급 국소환경 시스템(mini-environment system)의 사용이 증가함에 따라 클린룸의 작업영역에서 국소환경 내부와 주위에서의 유동 및 압력 특성 등에 관한 연구들이 수행되고 있다.<sup>(7-9)</sup> 그러나 이상에서 서술한 바와 같이 국내에서는 클린룸에 관한 대부분의 수치적 연구들이 2차원만을 고려하여 3차원 효과에 대한 영향을 평가하지 않았으며, 국외에서도 반도체용 클린룸에서 가스오염 확산에 대한 연구가 아직까지 미미한 실정이다.

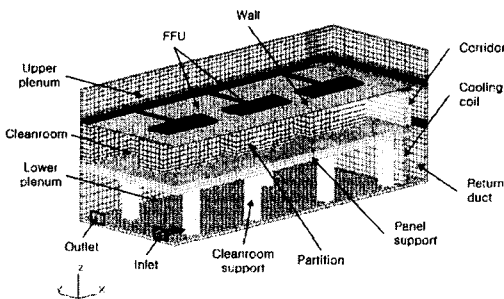
따라서 본 연구에서는 반도체 제조공정 중 가스오염 확산이 큰 문제가 되고 있는 광식각공정 클린룸에 대해서 전산유체역학 기법을 도입하여 비정상 3차원 기류 및 오염확산분포 해석을 수행하였다. 계산에서 구해진 기류분포와 오염확산분포 결과들을 이용하여 클린룸 평가지표를 기준으로

기류 및 동적교차오염(dynamic cross contamination) 특성을 분석하였다.

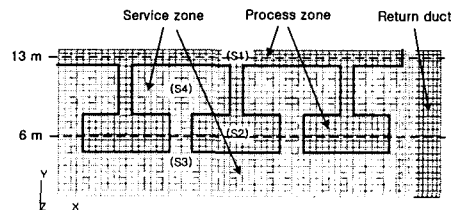
## 2. 클린룸 모델

실제 반도체 클린룸 공장은 반도체의 생산수율과 사이클 타임(cycle time)에 대한 성능요구 사항을 만족시킬 수 있도록 설계가 이루어진다. 따라서 각 공정마다 클린룸 내부의 형태가 다르고 가스오염에 대한 기준치가 다르게 된다. 본 연구에서는 여러 가지 클린룸 중 클린룸 공장에서 가스오염이 발생했을 때, 공정상에서 가장 심각한 문제를 일으킬 수 있는 광식각공정 클린룸을 모델로 설정하였다. Fig. 1은 현재 적용되고 있는 광식각공정의 클린룸 시스템의 한 모델을 나타낸 것이다. 전체적인 공조방식은 상부 플레넘에서 팬필터유닛(Fan Filter Unit, 이하 FFU라 칭함)을 사용하여 공기를 순환시키는 방식이다. 이 방식은 Class 1~100 정도의 청정도가 유지되고 부분적인 유속의 변경이 가능하며 시공 후에 레이아웃(layout)을 변경하기 쉬운 장점을 가지고 있어 많이 적용되고 있는 방식이다.<sup>(2,3)</sup>

본 연구에서 대상으로 한 클린룸 모델은 국내에 적용되고 있으며 1 GIGA급 반도체 생산을 위한 광식각공정이 이루어지고 있는 초청정 클린룸이다. 그 크기는 34.8m(L)×28.3m(D)×14.3m(H)으로 전체 클린룸이 y축 뒷면(y=14.3m인 x-z단면)을 중심으로 대칭이기 때문에 전체크기의 절반을 대상으로 모델을 구성하였다. Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 FFU 클린룸은 높이방향으로 상부플레넘(3.6m), 클린룸(4.2m), 하부플레넘(6.5m)의 3부분으



(a) Schematic design



(b) Process zone and service zone

Fig. 1 Cleanroom layout of photolithography process zone

로 나누어지고 그 외 복도, 리턴덕트, FFU, 파티션(partition), 패널 지지대(panel support) 등으로 구성되며, 클린룸 내부에서 우수한 기류분포를 형성시키기 위하여 클린룸 바닥에 패널과 그 하부에 댐퍼가 설치된다. 여기서 파티션은 클린룸 내부에서 서비스 영역(service zone)과 프로세스 영역(process zone)을 구분하는 것으로 사용된다. 그리고 급기와 배기가 이루어지는 부분은 좌측면(리턴덕트의 반대면)에 위치한다. Fig. 1(b)는 클린룸 패널로부터 z=1.5m 위인 위치에서 서비스 영역과 프로세스 영역의 구조를 평면도로 보여주고 있다. 클린룸 공간에서 웨이퍼의 이동이 빈번하여 고청정도를 유지해야 하는 프로세스 영역은 그림에서 붉은 실선 안쪽부분으로 모든 부분에 팬필터유닛이 설치되고 장비들이 위치한 서비스 영역은 전체 단면의 30% 정도만 팬필터유닛이 설치되어 있다. 또한 이후의 클린룸에서의 기류 특성은 프로세스 영역에서만 ISO 규격<sup>(10)</sup>의 제한을 받기 때문에 이에 대한 결과 논의를 위하여 프로세스 영역인 y=6m와 13m를 대표위치로 정하였고, 동적교차오염에 대한 결과 논의를 위하여 프로세스 영역(S1, S2)과 서비스 영역(S3, S4)에서 각각 2곳의 오염발생 대표위치를 정하였다.

### 3. 클린룸 평가지표

기존의 클린룸에 대한 수치적 연구에서는 동적 교차오염이 기류 및 압력분포에 의해 큰 영향을 받는 것으로만 알려져 있었고 이러한 이유로 클

린룸의 평가지표로 비균일도(non-uniformity, *NU*), 편향각(deflection angle,  $\theta$ ), 환기효율(ventilation effectiveness) 등의 기류분포 특성만이 사용되었다.<sup>(7)</sup> 그러나 클린룸에서의 동적교차오염은 오염원이 존재하는 클린룸 영역 내에서만 영향을 미치는 것이 아니라 그 양에 따라 전체 클린룸시스템의 다른 영역까지 영향을 미칠 수 있다는 연구결과<sup>(3)</sup>가 발표되었다. 따라서 본 연구에서는 장비가 배치되지 않은 클린룸에서 사용되는 평가지표인 비균일도와 편향각, 동적교차오염의 개념을 사용하여 클린룸을 평가하였다.

비균일도는 클린룸 필터 하부에서의 유동특성으로 ISO 규격<sup>(10)</sup>에 따르면 20%이내로 유지되어야만 한다. 이러한 비균일도는 평균속도에 대한 측정점에서의 표준편차의 비로서 정의되고 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, *n*은 측정점의 총개수를 나타낸다.

편향각은 클린룸 프로세스영역에서 기류의 편평도(air parallelism)로서 클린룸 바닥으로부터 1.5m 위에서 측정된다. ISO 규격<sup>(10)</sup>에 따르면 교차오염을 방지하기 위하여 클린룸에서 14° 이내로 제한되고 있다. 동적교차오염은 특정 영역의 오염원에서 발진된 오염물질들이 다른 영역에 확

Table 1 Governing equations and model coefficients

Continuity equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Momentum equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right\} + S u_i$$

Turbulent kinetic energy equation:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \mu + \mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} + G_k - \rho \epsilon$$

Dissipation rate equation of Turbulent kinetic energy:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \left( \mu + \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right\} + G_k C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

where,

$$C_\mu = 0.09, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}, G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 0.9, \sigma_j = 1.0, \sigma_i = 1.0$$

산되어 오염시키는 것을 나타낸다. 동적교차오염은 국소교차오염(local cross contamination)과 전역교차오염(global cross contamination)으로 구분된다. 국소교차오염은 오염이 발생된 클린룸 내에서 얼마나 영향을 미치는지를 평가하는 지표로 주로 난류강도로 표현된다. 전역교차오염은 한 영역 내에서 발진한 오염물질이 다른 클린룸 영역으로 확산되는 정도를 평가하는 지표로 임의의 측정위치에서 총 발진농도에 대한 측정된 농도의 비로서 구한다.

#### 4. 수치해석

##### 4.1 지배방정식

클린룸에서의 유동특성을 기술하는 비정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지지방정식, 난류운동에너지 소산율방정식이며, 이러한 방정식을 수식으로 표현하면 Table 1과 같다. 본 연구에서는 클린룸 해석에서 많이 사용되는 표준  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였으며, 각 식들에서의 기호선정은 일반적인 예를 따랐다.<sup>(12)</sup>

##### 4.2 경계조건

Fig. 1에서 보는 바와 같이 클린룸의 형상이 중앙과 후면, 정면을 중심으로 대칭이기 때문에 각 부분들을 대칭경계조건으로 처리하였다.

본 연구에서는 FFU는 팬과 필터를 한 유닛으로, 즉 운동량생성과 압력강하요소가 동시에 존재하는 것으로 처리하였다. 클린룸 전체 순환유량은 두 시스템 모두 약 102,352 CMH이다. 외부로부터 유입되어 급기되는 공기량은 순환유량의 약 30%이다. 배기량은 출구경계조건으로 처리하

여 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, 냉각코일, 댐퍼에서의 압력강하량은 Darcy's law를 이용한 식 (2)를 이용하여 계산하였고<sup>(11)</sup> 사용된 계수값들은 참고문헌<sup>(3,13,14)</sup>을 근거로 하였다.

$$-K_i u_i = \frac{\partial P}{\partial x_i}, \quad K_i = \alpha_i |\vec{u}_i| + \beta_i \quad (2)$$

클린룸 바닥패널은 다공도(porosity)로 모델링하였고 사용된 값은 이전의 연구<sup>(14)</sup>를 바탕으로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 바닥패널의 다공도는  $x=18m$ 를 중심으로  $x<18m$ 인 영역에서는 25%,  $x \geq 18m$ 인 영역에서는 10%로 2가지를 사용하였습니다.<sup>(14)</sup> 식 (1)에 의해 표현되는 압력강하량은  $0m < x < 11m$ 인 영역에서는  $\alpha_i=4, \beta_i=0.02$ ,  $11m \leq x < 22m$ 에서는  $\alpha_i=13, \beta_i=0.02$ ,  $22m \leq x$ 에서는  $\alpha_i=25, \beta_i=0.02$ 를 사용하였다.<sup>(3)</sup> 본 연구에서는 동적교차오염을 해석하기 위하여 암모니아를 오염물질로 하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 확산계수는 온도 298K일때 공기 중에서 암모니아의 확산계수인  $0.28 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였다.<sup>(15)</sup> 오염발생위치는 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 클린룸 패널에서 1.8m 상부로 4개의 위치(S1~S4)를 선택하였고, 이때의 발생량은 광식각공정에서 Bases 물질<sup>(16)</sup>의 허용기준치인 1 ppb(약  $8.0 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^3$ )의 104배이며 10초 동안 지속되는 것으로 가정하였다.

##### 4.3 수치해석방법

본 연구에서는 Table 1에 나열된 지배방정식을 풀기 위하여 상용 CFD코드인 STAR-CD(11)를 사용하였다. 지배방정식의 대류항을 수치적으로 계산하기 위해서 1차의 상류차분도식(upwind differencing scheme)을 사용하였고, 비정상상태의 속도장, 농도장을 얻기 위하여 PISO 알고리즘을 사용하였다.<sup>(11)</sup> 비정상상태 해석시 시간간격은 우수한 수렴성을 위하여 0.01~1초의 간격으로 다양하게 사용하였다. 이때 1초의 시간간격을 사용한 경우에는 시간간격을 1/2, 1/4로 하였을 때의 결과와 비교하여 그 차이는 무시할 만 하였다. 계산시 수렴판정 조건

Table 2 Boundary conditions applying at the calculation domains

Inlet :	$u_{in} = 1.458 \text{ m/s}, k_{in} = \frac{3}{2} (u_{in} \cdot I)^2,$ $\epsilon_{in} = C_u \frac{3}{4} k^{\frac{3}{2}} / l$
Outlet :	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$
Wall :	$u = v = w = 0, \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial z} = 0,$ $\frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0$
where,	$I = 0.01, l = 0.5 \times D_h$

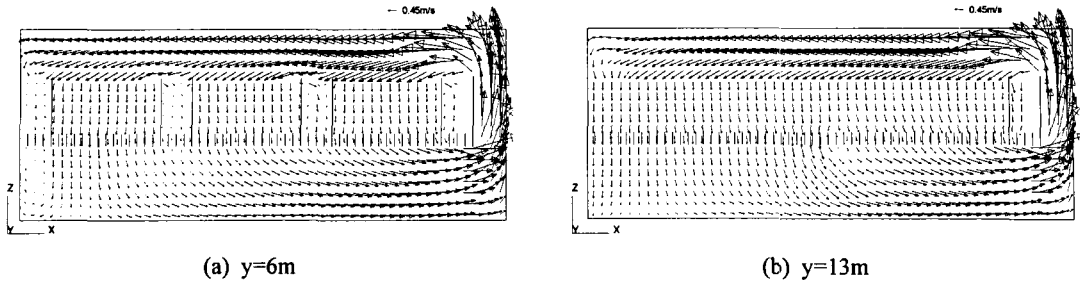


Fig. 2 Vertical velocity distributions of x-z section of cleanroom

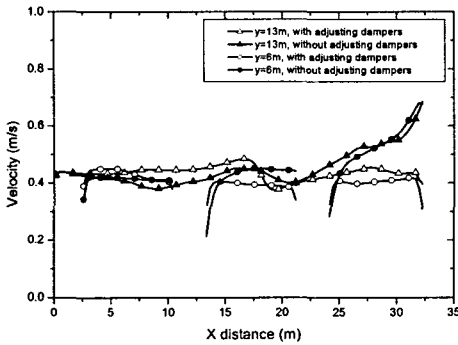


Fig. 3 Vertical velocity profiles with x distance

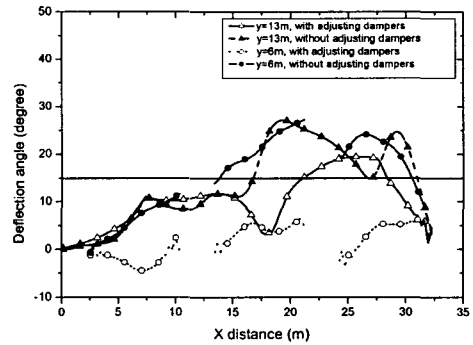


Fig. 4 Vertical deflection angles with x distance

으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 셀 (cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10-3이하일 때로 정하였다. 계산에 사용된 계산격자수는 약 430,000개로 비균 일격자계가 사용되었다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 기류분포

클린룸에서 대부분의 작업은 프로세스 영역에서 이루어지기 때문에 이 부분에서의 속도분포는 매우 중요하다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서 사용한 클린룸의 경우에는 프로세스 영역의 구조가 일반적인 형태의 클린룸과 다르기 때문에 프로세스 영역이 있는 단면에서의 속도분포도 위치마다 다르게 나타난다. Fig. 2는 y=6m와 13m인 x-z 단면에서의 속도분포를 보여주고 있고 프로세스 영역이 있는 단면에서 속도분포가 다른 것을 확인할 수 있다. y=6m인 x-z 단면의 프로세스 영역에서 대부분의 기류는 수직하방으로 흐르지만 y=13m인 x-z 단면에서는 x가 증가하는 리턴

덕트 방향으로 갈수록 유동방향이 우측으로 편향되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 클린룸 중앙부분에서 하부플레넘으로 흐르는 유량이 많아 속도벡터가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 클린룸 속도분포를 균일하게 하기 위하여 Noh et al.<sup>(3)</sup>과 Cheng et al.<sup>(14)</sup>의 연구를 근거로 x=18m인 지점을 중심으로 좌측과 우측에 다른 바닥패널의 다공도를 사용했기 때문이다. 4.2m<y<7.8m인 프로세스 영역의 단면에서는 Fig. 2(a)의 기류분포와 거의 유사하였고, 12.6m<y≤14.1m인 프로세스 영역에서는 Fig. 2(b)와 거의 유사하였다.

Fig. 3은 x방향 거리와 댐퍼의 조정유무에 따른 프로세스 영역의 바닥패널로부터 1.5m인 상부의 속도분포를 보여준다. 바닥패널 하부에 댐퍼가 설치되어 조정된 경우와 설치되지 않은 경우의 속도분포는 상당히 다르게 나타났다. 댐퍼가 조정되지 않는 경우에는 x방향 거리가 증가할수록 속도의 크기도 점차 증가하는 경향을 보이지만 댐퍼가 조정된 경우에는 벽이나 파티션의 경계층 영역을 제외한 y=6m인 단면의 프로세스 영역에

서  $0.41 \pm 0.3m/s$ 의 속도분포를 나타냈고,  $y=13m$ 인 단면의 프로세스 영역에서  $0.43 \pm 0.5m/s$ 의 균일한 속도분포를 나타내었다. 그리고 필터하단에서 계산된 비균일도는  $y=6m$ 인  $x-z$  단면에서 13%,  $y=13m$ 인  $x-z$  단면에서 5%이었고, 이 값들은 모두 ISO 기준치(10)인 20%이내를 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 x방향 거리와 댐퍼의 조정유무에 따른 프로세스 영역에서의 수직기류의 편향각을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 댐퍼가 조정되지 않은 경우에는 단면의 위치에 관계없이 x가 13~31m인 부분에서 ISO 기준치를 초과하는 것으로 나타났지만 댐퍼가 조정된 경우에는  $y=13m$ 인  $x-z$  단면에서만 x가 20~28m인 지점에서 ISO 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 댐퍼가 설치되지 않은 경우에는 약 28m 이상인 지점부터 편향각이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 클린룸 내부에 있는 파티션에 의해 기류의 편향이 억제되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이  $y=13m$ 인  $x-z$  단면에서는 다공도와 댐퍼를 조정 한 경우에도 편향각이

최대  $19.5^\circ$ 로 ISO 기준치를 초과하는 것을 볼 수 있다. 이는 하부플레넘에서의 기류 속도가 리턴덕트에 가까워지면서 급격히 커지고 반대로 압력강하량은 급격하게 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그리고  $y=6m$ 인  $x-z$  단면에서의 편향각의 최대값은  $6.5^\circ$ 로 모든 위치에서 ISO 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

5.2 동적교차오염

본 연구에서는 광식각공정 클린룸에서의 동적교차오염을 시간변화에 따라 총 발진농도에 대한 계산된 농도의 비(concentration ratio)를 이용하여 분석하였다. 이는 오염원에서 발진된 오염물질이 임의로 정해진 위치에 어느 정도의 영향을 미치는가를 나타내는 것이다. Fig. 5에 보는 바와 같이 모니터링 위치는 클린룸 바닥패널에서 1.5m 상부( $z=8m$ )인  $x-y$  단면에서 9곳의 프로세스 영역에 설정하였다. Fig. 1(b)와 같이 프로세스 및 서비스 영역의 오염원에서 발진된 물질이 프로세스 영역에 미치는 영향의 정도를 기준으로 동적교차오염을 평가하였다.

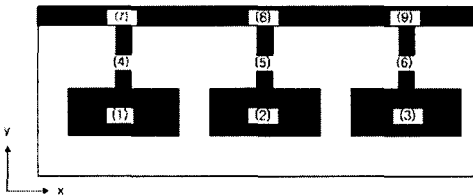
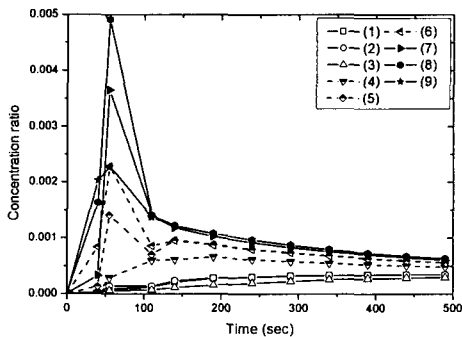


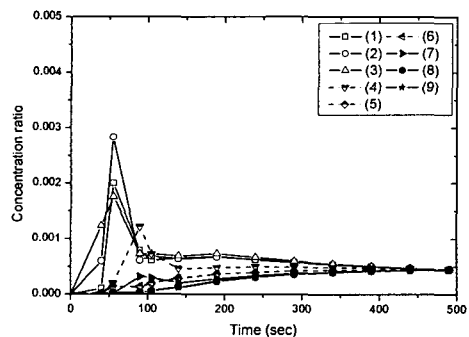
Fig. 5 Monitoring points for investigating global cross contamination ( $z=8.5m$ )

5.2.1 프로세스 영역에서 프로세스 영역으로의 동적교차오염

Fig. 6은 4곳의 오염원 중 프로세스 영역인 Fig. 5의 (8)번 위치인 S1과 (2)번 위치인 S2에서 암모니아가 발생된 경우 시간에 따른 농도비의 변화를 보여주고 있다. 오염원이 S1과 S2인 경우 모두 오염물질이 발진하고 약 60초가 지난 후에 오염물질이 발진한 위치와 동일한 위치에서 농도비



(a) Source : S1



(b) Source : S2

Fig. 6 Variation of concentration ratio at monitoring points when  $NH_3$  is generated in the process area

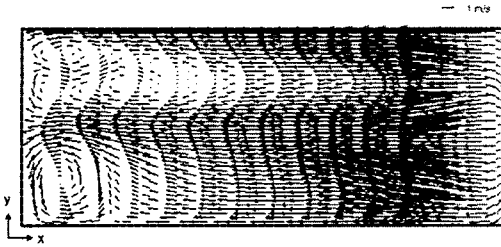


Fig. 7 Horizontal velocity distribution of x-y section at  $z=13\text{m}$  in the upper plenum

가 최대값을 나타냈다. 이는 클린룸 공간에서 공기가 1회 순환된 경우에는 오염원 근처로 가장 많은 오염물질이 통과하고 동적교차오염의 정도도 그리 크지 않다는 것을 의미한다.

오염원이 S1인 경우에는 오염발진 초기에 주유동방향인 x축 방향으로의 동적교차오염이 지배적으로 나타났다. 오염원이  $y=13\text{m}$ 인 x-z 단면을 중심으로 오염발진 후 약 40초가 지나면 리턴덕트에 가까운 프로세스 영역에서 농도비가 가장 크게 나타났고, 약 60초가 지난 후부터는 오염발생위치(8), 왼쪽 벽 부근(7), 리턴덕트(9)에 가까운 프로세스 영역의 순서로 농도비가 크게 나타났다. 약 110초가 지난 이후에는 주유동방향인 x축 방향의 프로세스 영역 (7)-(9)에서 측정된 시간대별로 농도비가 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 시간이 지남에 따라 오염물질이 순환되며 y축 방향으로 확산되어 동적교차오염이 일어나는 것을 볼 수 있다. 특히 (1)-(3) 프로세스 영역에서의 농도비는 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 S1에서 발생한 오염물질이 점차 y축 방향으로 확산되기 때문이다.

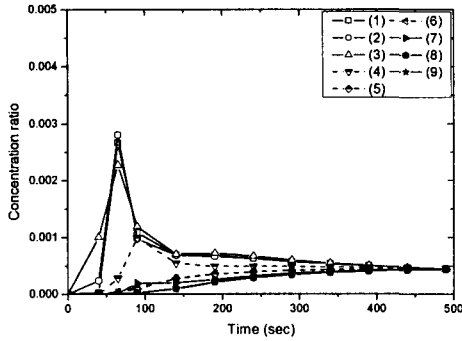
이렇게 시간이 지남에 따라 y축 방향으로의 동적교차오염이 증가되는 이유는 상부플레넘에서의 유동특성 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7에서 보듯이 프로세스 영역 위쪽의 상부플레넘으로 많은 유량이 흐르다가 왼쪽 벽에 충돌하여 y, z축으로 향하는 2차 유동(secondary flow)이 발생하고 그 영향으로 인해 y축 방향으로 오염이 확산되는 것이다.

오염원이 S2인 경우에도 오염발진 초기에는 주유동방향으로의 동적교차오염이 지배적으로 나타났다. 즉, 오염원이 있는  $y=6\text{m}$ 인 x-z 단면을 중심으로 x축 방향으로만 동적교차오염이 발생하는

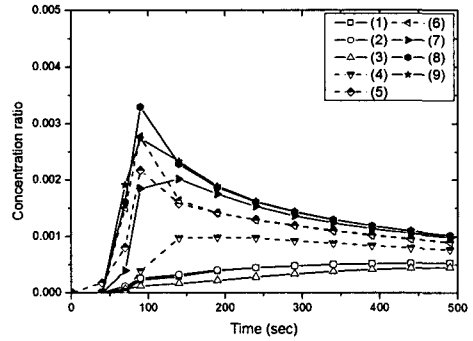
것을 볼 수 있었고 동적교차오염의 경향은 S1인 경우와 비슷하게 나타났다. 오염발진 후 약 40초가 지나면 리턴덕트에 가까운 프로세스 영역에서 농도비가 가장 크게 나타났고, 약 60초가 지난 후부터는 오염발생위치(2), 왼쪽 벽 부근(1), 리턴덕트(3)에 가까운 프로세스 영역의 순서로 농도비가 크게 나타났다. 약 110초가 지난 이후에는 주유동방향인 x축 방향의 프로세스 영역 (1)-(3)에서 측정된 시간대별로 농도비가 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 시간이 지남에 따라 동적교차오염이 전체 프로세스 영역으로 확산되어 가는 것을 볼 수 있다. 특히 (7)-(9) 프로세스 영역에서의 농도비는 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 S2에서 발생한 오염물질이 순환되며 점차 y축방향으로 확산되기 때문이다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 상부플레넘에서의 유동특성 때문인 것으로 판단된다. 그리고 오염원이 S1인 경우에 비해 S2인 경우에 시간이 지남에 따라 y축 방향으로의 동적교차오염이 빨리 진행되는 것을 볼 수 있다. 이는 상부플레넘에서 좌측벽에 형성되는 2차 유동이 y축 상부로 흐르는 유량에 의한 영향보다 중심부로 흐르는 유량에 의한 영향이 크기 때문에 S2가 오염원인 경우 더 빠른 y축 동적교차오염이 발생하는 것으로 판단된다.

### 5.2.2 서비스 영역에서 프로세스 영역으로의 동적교차오염

Fig. 8은 Fig. 1(b)에 표시된 4곳의 오염원 중 서비스 영역인 S3과 S4에서 오염이 발생한 경우 시간에 따른 농도비의 변화를 보여주고 있다. 프로세스 영역에서 오염이 발생한 경우와 달리 오염원이 S3과 S4의 서비스 영역인 경우 오염물질 발진 후 약 70초 만에 오염원과 가장 근접한 프로세스 영역에서 농도비가 최대값을 나타냈다. 이와 같이 서비스 영역에서 발진한 오염물질이 프로세스 영역에서 가장 큰 농도비를 나타내는 이유는 Fig. 9에서 보듯이 하부플레넘에서 클린룸 지지대와 농도에 따른 분압차 등의 영향 때문인 것으로 판단된다. 서비스 영역에서 발진하여 하부플레넘으로 유입된 오염물질이 상대적으로 유속이 큰 프로세스 영역의 하부플레넘으로 압력에 의해 유입되고 유동경로를 따라 순환하여 오염원 근처의 프로세스 영역으로 동적교차오염을



(a) Source : S3



(b) Source : S4

Fig. 8 Variation of concentration ratio at monitoring points when NH<sub>3</sub> is generated in the service area

6. 결 론

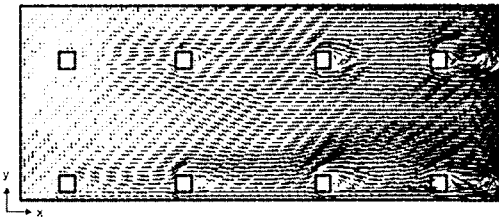


Fig. 9 Horizontal velocity distribution of x-y section at z=4.3m in the lower plenum

일으키는 것이다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 서비스 영역이 오염원인 경우에도 프로세스 영역이 오염원인 경우와 동일하게 오염발진 초기에는 x축 방향의 동적교차오염이 지배적으로 나타났고 오염발진 90초 이후부터는 기류가 순환하며 y축 방향으로 동적교차오염이 확산되어 가는 것을 확인할 수 있었다. 또한 시간에 따른 y축 방향으로의 동적교차오염 확산은 오염원이 S3인 경우가 S4인 경우보다 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 상부플레넘에서 형성되는 2차 유동이 y축 상부에서 흐르는 유량에 의한 영향보다 중심부로 흐르는 유량에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 시간에 따른 농도비 변화의 경향은 오염원이 S3인 경우에는 오염원이 S2인 경우와, 오염원이 S4인 경우에는 오염원이 S1인 경우와 비슷하게 나타났다.

반도체 제조공정 중 암모니아의 확산이 가장 문제가 되는 광식각공정에 대해서 3차원 기류 및 동적교차오염에 대한 수치적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바닥패널 하부에 설치된 댐퍼의 압력강하량이 조절된 경우, 클린룸 하단에서의 속도분포를 통해 계산된 비균일도는 모든 프로세스 영역에서 13% 이내로 산정되어 ISO 기준치(20%)를 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 클린룸의 프로세스 영역에서 측정된 편향각은 4.2m<y<7.8m인 y축 단면에서 최대 6.5°로 ISO 기준치를 만족하였으나 12.6m<y≤14.1m인 y축 단면에서는 x가 20~28m인 지점에서 ISO기준치를 초과하는 것으로 나타났고 이는 클린룸에서의 압력강하량에 의한 영향으로 판단된다.

(3) 프로세스 영역에서 오염물질이 발진한 경우, 발진 초기에는 주유동방향의 동적교차오염이 지배적으로 나타났지만 시간이 경과함에 따라 순환기류에 의하여 y축 방향으로 동적교차오염이 전역으로 증가되었다. 이는 상부플레넘에서 형성되는 2차 유동의 영향 때문이다.

(4) 서비스 영역에서 오염물질이 발진한 경우에도 발진 초기에는 주유동방향의 동적교차오염이 지배적으로 나타났고 시간이 경과함에 따라 y축 방향으로의 동적교차오염이 증가되었지만 발진초기에 오염원과 가장 근접한 프로세스 영역을 동적교차오염 시켰으며 이는 하부플레넘에서의 압



력차에 의한 영향 때문이다.

(5) 시간에 따른 농도비 변화를 통하여 오염원의 위치에 따라 프로세스 영역으로의 전역동적교차오염 특성이 달라지는 것을 확인하였고 이는 상·하부 플레넘의 구조, 각 영역의 구조, FFU의 배치 등의 클린룸 구조적 특성 때문인 것으로 판단된다. 따라서 클린룸을 분석할 때에는 기류분포에 대한 해석뿐만 아니라 오염원에 따른 전역동적교차오염에 대한 분석도 동시에 수행해야만 클린룸의 동적특성분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 서울시립대학교 2003년도 학술연구용 첨단장비사업의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Noh, K. C., Lee, S. C. and Oh, M. D., 2003, "Analysis on the Airflow and the Gas Contamination Characteristics in Super Clean Room," *Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference*, pp. 1117~1122.
- (4) 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," *Proceedings of the SAREK 1987 Winter Annual Conference*, pp. 60~65.
- (5) Oh, M. D., Lim, H. G. and Bae, G. N., 1990, "Study on the Transient Cross Contamination of Contaminated Particles in the Turbulent Flow Field of the Cleanroom," *J. of KSME*, Vol. 38, No. 4, pp. 563~570.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Jancoski, C. A. and Sinclair, J. D., 1997, "High Isolation Minienvironment for Process Involving Toxic Substances," *Proceedings-Institute of Environmental Sciences*, pp. 117~121.
- (9) 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.
- (10) ISO 14644-1, 1999, *Cleanrooms and associated controlled environments-Part 1: Classification of air cleanliness*, ISO, Geneva.
- (11) Computational Dynamics Ltd., 2002, *STAR-CD Version 3.15 User Manual*, Computational Dynamics Ltd.
- (12) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, DC.
- (13) Pui, Y. H., 2000, "Filter Pleating Designs, International Symposium on Air Cleaning Technology," *Korea Air Cleaning Association*, part 3, pp. 1~47.
- (14) Cheng, M., Liu, G. R., Lam, K. Y., Aci, W. j. and Lee, E. L., 1999, "Approaches for Improving Airflow Uniformity in Unidirectional Flow Cleanrooms," *Building and Environment*, Vol. 34, pp. 275~284.
- (15) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Willy and Sons, New York.
- (16) 95052812A-TR, *Forecast of Airborne Molecular Contamination Limits for the 0.25 Micron High Performance Logic Process*, SEMATECH, 1995.