

〈論 文〉

초청정 클린룸 난류유동장내에서의 오염입자 비정상 전파거동에 관한 연구

오명도*, 임학규**, 배귀남***

(1989년 9월 29일 접수)

Study on the Unsteady Contaminated Particle Transportation in the Flow Field for the Super Clean Room

M. D. Oh, H. K. Lim and G. N. Bae

Key Words: Clean Room (클린룸, 청정실), Contaminated Particle(오염입자), Recirculation Zone(재순환영역), Transportation Length(전파거리), Nondimensionalized Recovery Time(무차원 회복시간)

Abstract

Steady state turbulent airflow and unsteady characteristics of generation, transportation, and recovery behavior of contaminate particles in the simplified 2 dimensional Vertical Laminar Flow (VLF) type clean room was numerically simulated using the low Reynolds number $k-\epsilon$ turbulent model. Characteristics of airflow in VLF type clean room are greatly affected by the recirculation zone around working surface. The recirculation zone must be considered at the time of clean room design because the recirculation zone whose area increases with increment of inlet velocity exerts bad influence upon the performance of clean room in terms of particle contamination. The location of maximum particle concentration changes from the location of particle source to the recirculation zone, while averaged particle concentration is reduced exponentially with time. Recovery time of clean room with spontaneous particle generation source is inversely proportional to inlet velocity. We introduce nondimensionalized recovery time through the dimensional analysis, which can indicates the general performance of clean room with design structure change. It was identified that τ is independent of inlet velocity and background concentration. Therefore τ can be the simple factor to compare the different structure of clean room in terms of dynamic response to contamination and becomes larger with better structure of clean room.

기 호 실 명

C : 입자 농도(개/㎥)	g : 중력 상수(m/s ²)
C_o : 배경 농도(개/㎥)	k : 난류 운동 에너지(㎥ ² /s ²)
D : 입자 확산 계수(㎥ ² /s)	p : 평균 압력(Pa)
	s_i : 입자 발생원(개/㎥·s)
	T_d : 감쇠시간(s)
	T_i : 발진최고 농도 시간(s)
	T_{re} : 회복시간(s)

*정회원, 생산기술연구원 연구개발본부

**미국 UCLA

***한국과학기술연구원 기계공학부

- U : 기류의 X 방향 평균속도(m/s)
 V : 기류의 Y 방향 평균속도(m/s)
 u, v : X, Y 방향의 변동속도(m/s)
 V_{in} : 입구에서의 기류속도(m/s)
 X_i : i 방향의 좌표
 ϵ : 난류에너지의 소산률(m^2/s^3)
 $\bar{\epsilon}$: 난류에너지의 벽보정 소산률(m^2/s^3)
 μ : 분자점성 계수($kg/m \cdot s$)
 μ_t : 난류점성 계수($kg/m \cdot s$)
 ρ : 공기밀도(kg/m^3)
 σ_i : 유효 난류 프란틀 수
 σ_ϕ : ϕ 의 이동에 대한 유효 난류 프란틀 수
 τ : 무차원 회복시간
 i, j : 직교좌표계에서 방향을 나타냄

1. 서 론

수년 전부터 반도체 산업의 급속한 발전으로 초청정 Class 1의 클린룸 개발이 요구되어 왔다. 이러한 초청정 클린룸에서는 설정된 클린룸의 등급을 만족하기 위한 평균적인 오염입자 농도를 제어하는 기술뿐만 아니라 클린룸내의 어느 지점에서 갑자기 발전하여 확산되는 입자를 제어하는 기술도 중요하다. 고성능 필터의 급속한 발전으로 클린룸의 정상 운전 상태에서 나타내게 되는 일정한 수준의 배경입자농도는 제어할 수 있게 되었다. 그러나 클린룸 내부에서 발생하게 되는 오염입자에 대하여는 빠른 시간안에 그 전파를 막고 클린룸 밖으로 배출시키는 기술이 아직 초청정 클린룸에 대하여 확립된 바가 없기 때문이다.

이러한 오염입자의 동적 거동을 고려한 클린룸의 설계과정에서는 클린룸내 유동장 및 오염입자의 전파과정에 대한 비정상적 해석 또는 실험이 필요하며 이를 통해서 그 현상을 이해하고 예측하여야 한다. 실제 클린룸내의 형상은 생산기기 등 유동 장애물이 설치되어 있으므로 기본설계 단계에서는 복잡한 형상의 클린룸 내부를 단순화하여 여러가지 설계변수를 고려하게 된다. 그러나 실험적 방법은 기술적 어려움이 있고 비용면에서도 경제성이 없기 때문에 주로 수치해석 방법을 통한 오염입자 전파과정을 예측하는 기술을 개발하여 설계 및 성능평가에 활용하고 있다. 클린룸내의 복잡한 3차원 점성유동은 주로 $k-\epsilon$ 난류모델을 채택한 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석이 시도되고 있으

며 계산 결과는 특정실험과 잘 일치하는 것으로 알려져 있으나⁽¹⁾, 이러한 계산은 계산시간 및 기억용량의 제한때문에 일반적으로 이용할 수 없으며 따라서 2차원적인 유동특성을 주로 연구하여 실제에 활용하려는 노력이 많다.

현재 클린룸내의 공기유동에 관한 연구는 Jinno⁽²⁾, Kuehn⁽³⁾, 이재현⁽⁴⁾, 오명도⁽⁵⁾등에 의하여 행하여졌으며, 입자확산에 관한 연구는 Fujii⁽⁶⁾, Murakami⁽⁷⁾, 오명도⁽⁸⁾ 등이 정상상태에 대하여 하였으며, 비정상상태에 대하여는 Fujii⁽⁹⁾, Socih⁽¹⁰⁾, Nobuyuki⁽¹¹⁾등이 난류확산 계수에 대한 단순한 가정을 도입하여 유동장을 해석하였다.

본 연구에서는 지금까지 수행된 연구결과를 더욱 발전시켜 순간발진에 관하여 저 레이놀즈 수(low Reynolds number) $k-\bar{\epsilon}$ 난류모델을 이용한 오염입자 전파에 관한 비정상 해석을 시도하였으며, 오염입자의 전파거리, 클린룸내 전체 오염입자수 등을 시간에 따른 변수로 하여 연구하였다. 이와같이 클린룸내 오염입자 전파에 관한 비정상 해석을 함으로써 생산공정중 클린룸내 오염의 주된 형태인 순간적인 입자 발생에 따른 청정도 특성을 분석하여 클린룸의 동적인 특성을 규명하였고, 이를 통해서 클린룸 연구의 궁극적 목표인 초청정 공간의 설정청정도 유지 및 제품의 생산수율 향상을 달성할 수 있을 것이다.

2. 수치해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 좌우대칭의 한쪽부분을 나타낸 단순화된 수직 층류형의 2차원 클린룸내의 오염입자 전파과정을 계산하였다. 수직층류형 클린룸은 높은 청정도가 요구되는 클린룸의 일반적 형태로서 청정공정이 이루어지는 작업대와 물자 및 작업인원이 이동하는 통로로 구성되어 있으며, 작업대에는 복잡한 형상의 공정기기가 놓여지게 된다. 고성능(HEPA 또는 ULPA) 필터를 통과한 후의 유동은 저속이지만 난류강도가 크므로 유동장은 정상상태의 비압축성 난류유동으로 가정하고, 유동장애물에 장애물이 있는 경우에도 유동장을 잘 예측하는 저 레이놀즈 수 $k-\bar{\epsilon}$ 난류모델을 사용하였다. 오염입자의 거동이 유동장에 직접적인 영향을 미치지 않는다고 가정하면 유동장은 농도장에 대하여 독립적이기 때문에 먼저 유동장을 계산한 후, 계산된 유동장 결과를 이용하여 농도장을 계산하였다.

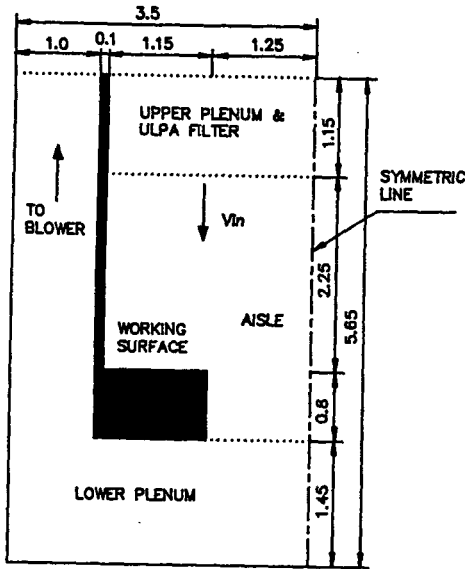


Fig. 1 Schematic diagram of vertical laminar flow (VLF) type clean room

2.1 유동장 지배 방정식

정상상태 비압축성 2차원 난류유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \tag{2}$$

여기서 $\overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력(turbulent shear stress)이며, 운동량 방정식을 풀기 위하여 난류 모델링이 요구되는 항이다.

2.2 난류모델

$k-\epsilon$ 난류 모델은 2방정식 난류모델(two-equation model)로서 일반적으로 높은 레이놀즈수의 2차원 유동에 대하여 상당히 정확한 해를 주는 모델이다. 이 모델은 Boussinesq의 와점성계수(eddy viscosity) 개념에서 출발하여 레이놀즈 응력이 평균속도구배에 비례한다고 가정하였다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{3}$$

여기서 난류점성계수 μ_t 는 특성 속도 $k^{1/2}$ 와 특성길

$$\text{이 } k^{3/2}/\epsilon \tag{4}$$

이때 유동의 레이놀즈수가 충분히 커서 난류점성계수가 국소 등방성(local isotropy)이라고 가정하면 난류 운동에너지와 소산률은 다음과 같은 이동 방정식으로 부터 구할 수 있다⁽¹²⁾.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \rho(P - \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \frac{\rho \epsilon}{k} (C_1 P - C_2 \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \tag{6}$$

난류 생성항 P 는 다음과 같이 표시된다.

$$P = \frac{\mu_t}{\rho} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \tag{7}$$

이러한 $k-\epsilon$ 난류 모델은 모델링 과정에서의 높은 레이놀즈수 가정때문에 레이놀즈수가 낮은 벽면 근처의 난류 경계층내에서는 난류성분의 감소와 분자점성효과의 상대적 증가로 모델 자체의 타당성을 잃게 된다. 이러한 벽면효과를 고려하기 위한 방법으로는 wall function method와 low Reynolds number turbulent model등이 있다. 본 연구에서는 복잡한 계산형상과 프로그램의 변환성을 고려하여 low Reynolds number turbulent model을 채택하였다. 이 모델로 수정된 k, ϵ 의 이동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \rho(P - \bar{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - 2\mu \left[\partial \frac{\sqrt{k}}{\partial x_j} \right]^2 \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \bar{\epsilon}) = \frac{\rho \bar{\epsilon}}{k} (C_1 P - C_2 \bar{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_j} \right] + \frac{2\mu\mu_t}{\rho} \left[\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \right]^2 \tag{9}$$

식 (9)의 마지막항은 벽면근처에 점성효과와 난류 운동에너지의 변화를 고려하는 항이며, 식 (8)의 마지막항은 벽면에서의 $\bar{\epsilon}$ 값을 0으로 하기 위하여 예측되는 벽면근처에서의 난류에너지 소산률의 값과 동일한 크기의 값으로 보정하는 역할을 한다. 따라서 이 모델에서는 교체영역에서의 $k, \bar{\epsilon}$ 값을 모두 0으로 주어도 벽면효과가 올바르게 유동장에 전달된다. 이상의 저 레이놀즈 수 $k-\bar{\epsilon}$ 모델에 사용된 계수는 다음과 같다^(13,14).

$$C_\mu = 0.09 \exp \left[\frac{-3.4}{(1 + R_t/50)^2} \right] \tag{10}$$

$$C_1 = 1.44$$

$$C_2 = 1.92[1 - 0.3 \exp(-R_i^2)]$$

$$R_i = \rho \frac{k^2}{\mu \bar{\epsilon}}$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

2.3 농도장 지배방정식

Class 1의 초청정 클린룸에서 주된 관심의 대상이 되는 입자의 크기는 $0.5\mu\text{m}$ 이하이다. 이러한 작은 입자들은 입자의 관성수가 작고 입자의 전파는 유동장속의 가스상물질의 전파와 유사하므로 따라서 입자의 전파는 유동장에 직접적인 영향을 주지 않는다고 가정하고 다음의 비정상상태 농도장 지배방정식을 유도하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(U_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] + S_j \quad (11)$$

식 (11)에서 난류확산계수 D 는 난류 동점성계수와 동일한 값을 갖는다는 constant eddy diffusivity model을 이용하면 다음과 같다⁽¹⁵⁾.

$$D = \frac{1}{\rho} \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right], \sigma_c = 1.0 \quad (12)$$

S_j 는 단위 체적당 오염입자의 발생량을 의미한다. 즉 S_j 는 계산영역중 오염입자 발생영역에서만 오염입자 발생량에 해당하는 값을 가지며 그 밖의 영역에서는 0을 갖는다.

2.4 경계 조건

이상의 지배방정식은 타원형 편미분 방정식이며, 이를 해석하려면 다음과 같은 경계조건이 필요하다.

(1) 입구

필터를 통과하여 클린룸내로 유입되는 유동의 조건은 수직방향 속도 $V = V_{in}$, 수평방향 속도 $U = 0$ 으로 하였고, k 와 $\bar{\epsilon}$ 의 조건은 Murakami등의 실험⁽¹¹⁾을 측정된 $k = 0.005\text{m}^2/\text{s}^2$ 과 $l = 0.03\text{m}$ 로 하여 계산하였다. 계산영역중 필터에 해당되는 영역에서는 변수들이 입구조건을 갖도록하여 실제 입구조건이 적용되는 위치는 필터 아랫면이 되도록 하였다. 그리고 농도장의 경우는 클린룸의 배경농도를 입구에서의 오염농도로 하고 입구 경계면에서의 확산은 무시하였다.

(2) 출구

$U = 0$ 으로 하고 나머지 변수는 Y 방향으로 구배가 0인 Neumann조건을 사용하였다.

(3) 벽면, 교체영역 및 대칭면

벽면과 교체영역에서는 U, V 의 경우 no slip

condition을 적용하였으며, k 와 $\bar{\epsilon}$ 에 대하여는 0으로 주었다. 그리고 농도장에서는 난류확산계수 $D = 0$ 으로 주었다. 대칭면에서는 U 를 0으로 주고 나머지 변수는 Y 방향의 구배를 0으로 주었다.

(4) 농도장의 경우 초기 조건

클린룸의 배경농도에 해당하는 농도를 전체 계산 영역에 초기조건으로 주었다.

2.5 수치 계산 방법

각 변수에 대한 이동 방정식을 미소 검사체적에 대해 적분하여 차분화된 대수 방정식을 구한다. 대류항의 처리를 위하여서는 power law scheme을 사용하였으며, 압력구배항은 SIMPLE 알고리즘으로 해결하였다. 입자농도장의 경우에는 시간에 대하여 해가 안정되게 나오는 fully implicit 방법을 사용하였다. 격자계는 41×50 으로 속도 U, V 와 기타 변수의 격자점 위치가 서로 엇갈려 있는 Staggered 격자점을 사용하였으며, Fig. 2와 같이 경계와 내부 물체근방에서는 조밀히 격자점을 배치하였다. 이렇게 차분화된 지배방정식은 TDMA에 의하여 반복적으로 계산하여 해를 구한다⁽¹⁶⁾. 농도장 해석시는 이미 해석되어진 유동장을 이용하기 때문에 농도장만을 시간에 따라 계산하면 된다. 오염입자 발생원의 위치는 실제 클린룸에서 작업중 오염입자가 많이 발생하는 위치인 작업대 상부에서 0.3m, 벽면에서 0.6m 떨어진 곳에 전체 1000개/초

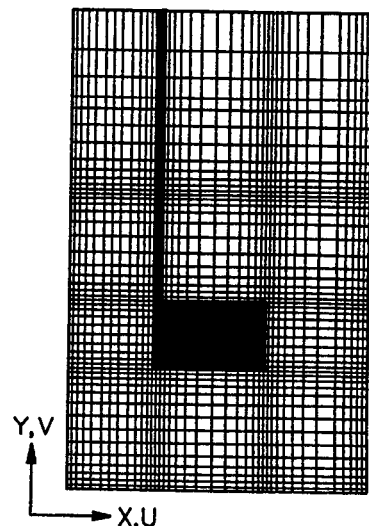


Fig. 2 Grid distribution of computational domain

의 일정 발생량을 가지는 발생원을 놓았다. 오염입자 발생영역은 편의상 계산영역의 한 검사체적으로 하였으며, 순간적으로 발생하는 오염입자를 묘사하기 위하여 오염입자를 오염입자 발생원으로부터 1초동안 발생되게 하였다. 계산 시간간격은 초기 5초까지는 0.1초 간격으로 하였고 이후에는 0.5초로 하였다. 농도장 계산시의 수렴조건은 유동장에서와 같이 일정 시간에서 residual source의 최대절대값이 10^{-4} 이하로 하였고, 수렴조건을 만족시키면 시간 간격을 증가시켜 다음 시간의 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 토론

본 연구는 정상상태의 유동장내에서 오염입자의 비정상적 전파거동에 대하여 계산을 수행하였다. 청정공기의 유입속도 V_{in} 을 0.2-0.6m/s로 변화시키면서 오염입자의 순간발진에 대하여 연구하였다.

3.1 유동 특성

본 연구의 대상인 수직층류형 클린룸내에서 유입속도 V_{in} 이 0.5m/s일때 유선분포는 Fig. 3(a)와 같으며 작업대와 벽면 사이에 비교적 넓은 재순환영역이 발생하며 유입속도의 증가에 따라 그 면적이 증가한다. Table 1에서 유입속도의 변화에 따른 재순환영역의 크기는 유입속도 0.2m/s일때의 크기를 1로 잡고 그 상대적인 크기로 표시하였다. 이러한 재순환영역은 오염입자의 제어를 어렵게 하며 따라서 수직층류형 클린룸의 경우에는 재순환영역이 발생되지 않도록 기류의 평행성을 유지하도록 클린룸의 구조를 설계하는 것이 다른 형태의 클린룸보다 중요하다. 기본계산 모델에서 오염입자의 확산계수는 계산된 난류점성계수와 동일한 값을 갖는 것으로 가정하였으므로 난류점성계수의 경향을 분석하면 오염입자의 확산 특성도 정성적인 분석이 가능할 것이다. 계산된 난류점성계수는 유입속도가 클수록 크며, Fig. 3(b)와 같이 재순환 영역에서 최소값을 갖고 클린룸 중심부(대청축 부근)에서 최대값을 갖는다. 특별히 청정작업이 이루어지는 작업대 상부영역에서 오염입자 전파에 영향을 미치는 평균 난류점성계수가 유입속도 변화에 따라 Table 2에 나타나 있다. 이와같은 경향은 난류점성계수가 유입속도의 커짐에 따라 재순환영역 근처에서는 작아지고 클린룸 중심부에서는 커지기 때문이며, 따라서 유입속도 V_{in} 이 0.3-0.4m/s일때는 속도에

따라 평균 난류점성계수가 연속적으로 증가하지 못한다. 또한 유입기류의 입구와 출구사이의 압력차는 출구를 빠져나간 기류가 재순환팬에 의해서 압력차만큼 가압되어 다시 유입되므로 팬의 동력소모

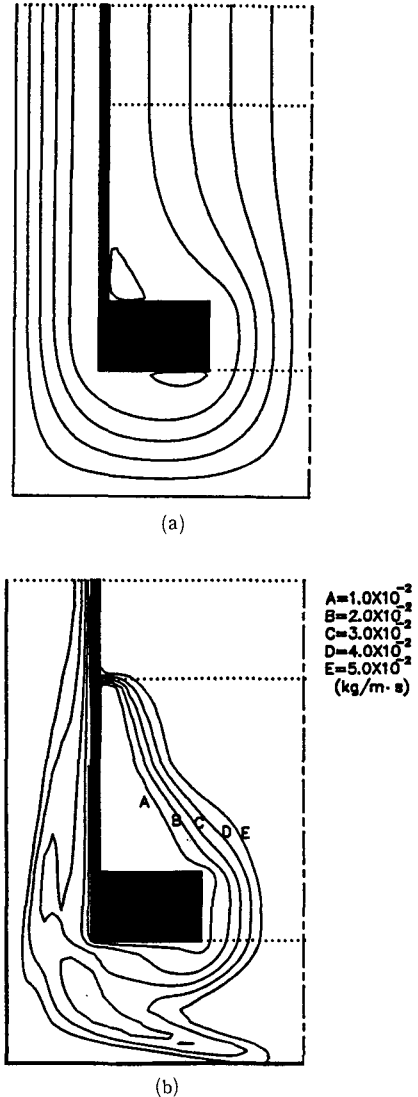


Fig. 3 (a) Distribution of stream lines in clean room at $V_{in}=0.5m/s$ (b) Distribution of turbulent viscosity in clean room at $V_{in}=0.5m/s$

Table 1 Relation between the inlet velocity and the area of recirculation zone

Inlet velocity (m/s)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Relative area	1.00	1.05	1.10	1.14	1.18

Table 2 Relation between the inlet velocity and the mean turbulent viscosity in upper region of working table

Inlet velocity (m/s)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Mean turbulent viscosity (kg/m·s)	8.553×10^{-3}	1.634×10^{-2}	1.636×10^{-2}	2.561×10^{-2}	2.939×10^{-2}

Table 3 Relation of the inlet velocity to the pressure difference between inlet and outlet

Inlet velocity (m/s)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Pressure difference (Pa)	0.14483	0.32139	0.56233	0.8686	1.2479

량과 밀접한 관계가 있다. 따라서 입출구 사이의 압력차에 대한 자료는 클린룸 운전비의 중요한 부분을 차지하는 팬동력비를 예측할 수 있는 데이터가 될 수 있다. 입출구 사이의 압력차는 Table 3 과 같이 유입속도의 증가에 따라 그 제곱에 비례하여 증가함을 보여주고 있다.

3.2 오염입자의 확산 특성

오염입자의 확산 특성은 클린룸에서 발생하기 쉬운 순간발진에 대하여 클린룸의 오염입자의 배경농도를 1, 10, 100 개/m³로 변화시켜가며 계산하여 시간에 따라 오염특성을 확산거리, 전체 오염입자 갯수, 최고 오염농도 등으로 살펴보았으며, 회복시간 및 무차원화된 회복시간을 도입하여 클린룸의 평가에 활용하여 보았다. 여기서 배경농도는 필터의 포집능력에 따라 결정되는 값이며 일반적으로 클린룸에서 정의하는 class개념과 동일하다.

클린룸내의 오염입자 발생은 대부분의 경우 지속적인 발생이 아니라 작업중 순간적으로 오염입자가 wafer나 공정기기, 사람 등으로부터 떨어져 나감으로써 일어나는 경우가 대부분이다. 따라서 이러한 순간적인 오염입자의 발생을 고려하여 1초간 입자를 일정량으로 발생시키는 순간발진 모델을 사용하였다.

배경농도와 유입속도의 변화에 따른 오염입자 전파의 정성적인 차이는 없으므로 유입속도 0.5m/s, 배경농도 1개/m³인 경우 시간에 따른 오염입자의 등농도선을 대표적으로 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)의 ● 표시는 발진원의 위치를 나타낸다. 오염입자는 기류를 따라 확산되어 가고, 작업대 윗면에서는 기류를 거슬러 재순환영역으로도 전파된다. 이러한 오염입자의 전파는 유동방향과 반대이기 때문에 순수한 확산이라 할 수 있다. 따라서 클린룸 설계시에는 유동장내에서의 재순환영역을 배제하여

야 하며 어쩔 수 없이 재순환영역이 존재할 때에는 이 영역으로의 오염입자 전파를 방지하기 위해서 작업대 상부에서의 확산량이 작아야 한다. 즉 이 영역에서의 난류확산을 가능한 억제하여야 한다.

클린룸내의 최고 오염농도의 변화에 대하여 Fig.

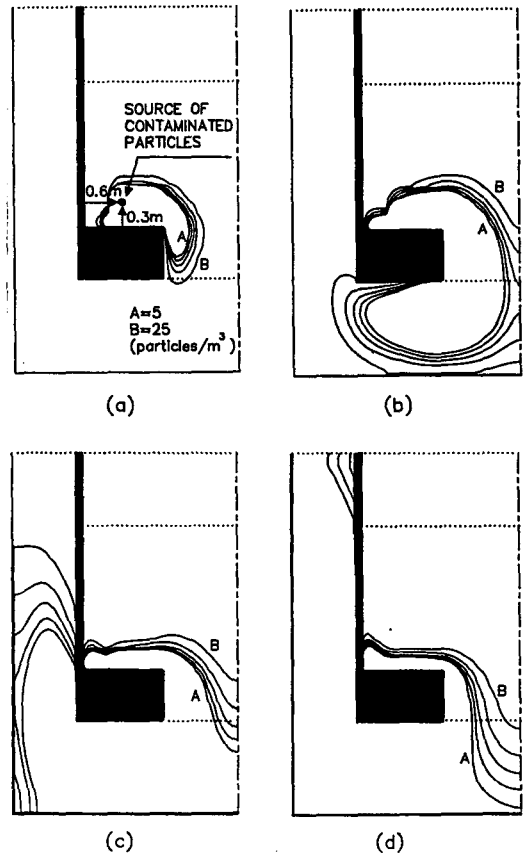


Fig. 4 Transient distribution of contaminated particle concentration in clean room at $V_{in}=0.5m/s$ after particle generation (a) 1 second (b) 3 second (c) 5 second (d) 7 second

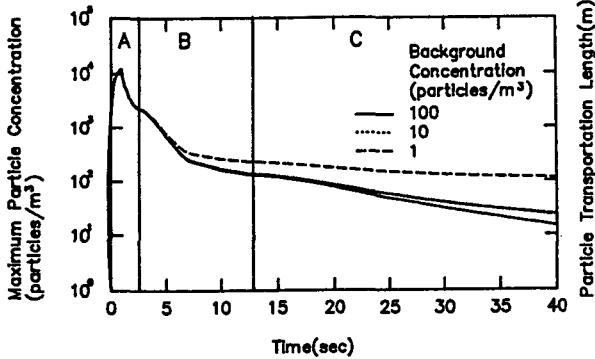


Fig. 5 Variation of maximum particle concentration with time at $V_{in}=0.5m/s$

5에 표시하였다. 최고 오염농도의 위치는 시간에 따라 발진원에서부터(A 시간영역) 작업대 윗면을 따라 움직이다가(B 시간영역) 일정시간이 지나면 작업대 상부의 재순환영역으로 이동하게 된다(C 시간영역), 즉 재순환영역으로 들어간 오염입자는 유동이 안정되어 있는한 클린룸 밖으로 배출시키기 어렵다는 것을 알 수 있다.

순간발진에 따른 오염이 있을 때, 청정공정 내지는 반도체 wafer에 영향을 미치는 입체오염농도를 가정한 일정 농도까지의 전파거리를 오염입자 전파거리로 정의하였다. 발진원 근처에서는 배경농도에 비하여 높은 농도를 유지하게 되므로 오염입자 발생초기에 배경농도의 변화에 따른 전파거리의 차이는 없다. 따라서 유입속도의 변화에 따른 전파거리의 차이를 배경농도 1개/m³인 경우에 대해서 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에 표시한 오염입자의 통로방향으로의 전파거리는 오염입자 발생이 멈춘 후에도 증가하여 유입속도가 빠를수록 최대전파거리에 도달하는 시간이 빨라지나 그 전파거리는 짧아진다. Fig. 6(b)에 표시한 벽면으로의 전파는 유동에 의하여 거의 제어됨을 알 수 있으며 다만 확산에 의한 전파가 약간 있을 뿐이다.

클린룸내의 전체 오염입자의 갯수를 Fig. 7에 나타내었다. 전체 오염입자의 갯수는 클린룸내의 체적이 일정하므로 상대적인 평균 입자농도의 개념과 유사하다. 여기서 평균 입자농도란 클린룸내의 전체 오염입자의 갯수를 클린룸 내부의 체적으로 나눈 것을 의미한다. 본 연구에서는 Fujii⁽⁹⁾의 회복시간 정의를 이용하여 평균 입자농도의 변화로 오염농도장의 회복시간, T_{re} 를 구하였다. 즉 Fig. 7에

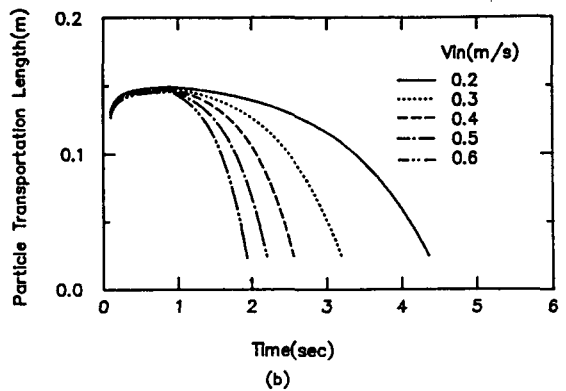
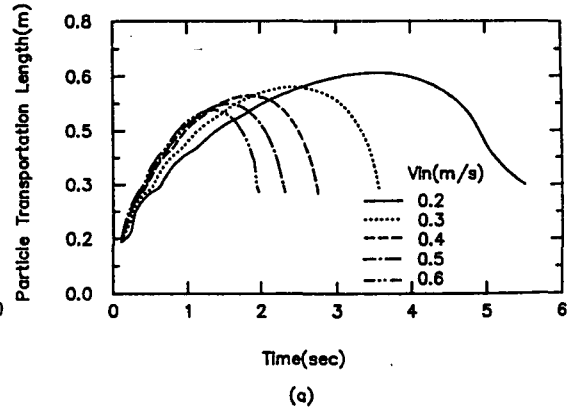


Fig. 6 (a) Variation of particle transportation length to aisle at background concentration 1. (b) Variation of particle transportation length to wall at background concentration 1

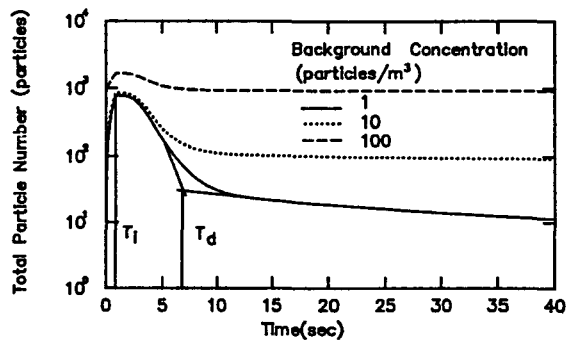


Fig. 7 Variation of total particle number in clean room with time at $V_{in}=0.5m/s$

서 급격히 감소하는 입자농도곡선의 접선과 감소후 일정농도로 근접해가는 직선과의 교점시간 T_d 와 발진 최고농도 시간 T_i 의 차이인 $T_d - T_i$ 를 회복시

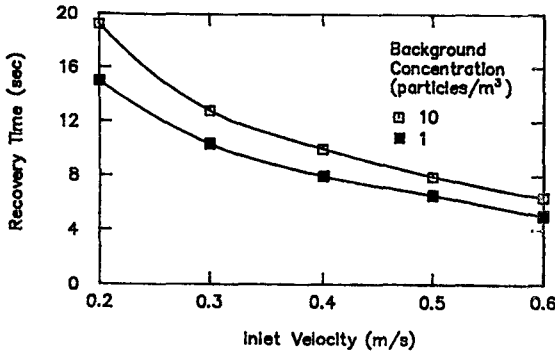


Fig. 8 Variation of recovery time with inlet velocity

간이라 정의하였다. 일반적으로 회복이라함은 오염입자의 농도가 규정농도이하로 떨어지는 상태를 의미하나 계산에서는 오염 초기에 대류에 의하여 오염입자가 급격히 감소하며 이러한 과정이 클린룸의 오염입자의 배출능력을 나타내기 때문에 규정배경농도 이상이라도 급격한 감소 후의 상태를 회복이라 보았다. 유입속도와 회복시간의 관계는 Fig. 8과 같이 유입속도가 증가하면 오염된 영역이 다시 청정하게 회복되는 특성을 나타내는 회복시간이 감소하게 된다. 이때 회복시간 이후의 평균 입자농도는 원래의 배경농도에서 크게 벗어나지 않고 더 시간이 지나게 되면 배경농도에 수렴하게 된다.

유입속도와 회복시간과의 관계를 나타내는 무차원화된 수를 도입하여 클린룸의 성능을 대표하고자 다음과 같은 변수를 도입하여,

$$C^* = \frac{C}{C_0}, \quad t^* = \frac{t}{T_{re}}, \quad U^* = \frac{U}{V_{in}} \quad (13)$$

$$x_i^* = \frac{x_i}{T_{re} V_{in}}, \quad S_i^* = \frac{S_i}{C_0 / T_{re}}$$

다음과 같이 입자 농도장 방정식을 무차원화 하였다.

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} (U_j^* C^*) = \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left[\frac{1}{\tau} \frac{\partial C^*}{\partial x_j^*} \right] + S_j^* \quad (14)$$

$$\tau = \frac{T_{re} V_{in}^2}{D}$$

이때 τ 를 무차원화된 회복시간이라 정의하였으며 D 는 작업대 상부에서의 평균 확산계수이다. τ 는 특성길이($T_{re} V_{in}$)에 대하여 오염입자의 대류(V_{in})와 확산(D)과의 비라고 해석할 수 있다. 즉 일정 위치에서 오염이 발생하였을 때 오염입자가 특성길이만큼 이동하는 동안 유동이 오염입자를 확산시키지 않고 대류에 의해서 클린룸 밖으로 얼마나 잘 배출시키려는가를 의미하며, 따라서 τ 가 클수

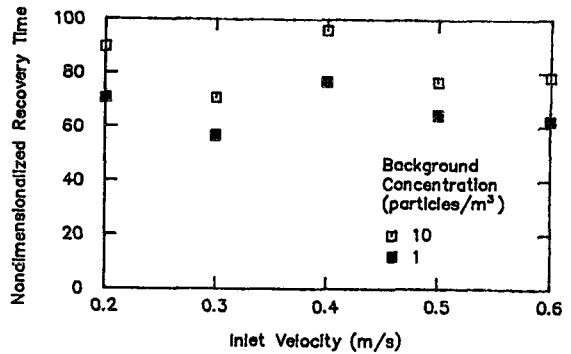


Fig. 9 Variation of nondimensionalized recovery time with inlet velocity

록 좋은 오염입자 제어성능을 갖는 클린룸 구조이다. 유입속도 및 배경농도에 따른 무차원 회복시간을 Fig. 9에 표시하였다. 유입속도에 따라 τ 가 약간씩 변화하는 것은 유입속도와 오염입자 확산을 지배하는 난류점성계수와와의 관계가 앞에서 언급한 바와 같이 일정한 관계가 없기 때문인 것으로 생각되며, 배경농도가 낮을 수록 τ 가 작은 값을 갖는 것은 T_d 이후의 입자 거동이 배경농도에 영향을 받기 때문이다. 즉 본 연구에서 사용한 회복시간은 원래 일반적으로 정의된 회복시간(클린룸내에 오염입자 발생후 어느 위치에서도 규정 농도이하로 유지될때까지 걸리는 시간)이 아니기 때문에 배경농도가 높을수록 실제보다 회복시간이 짧게 측정되기 때문이다. 클린룸의 구조에 따른 τ 값의 변화를 보기 위하여 성능이 우수한 것으로 알려진 클린터널형 클린룸에 대하여 $V_{in}=0.5\text{m/s}$ 의 경우를 비교하였을 때⁽¹⁷⁾, 클린터널형은 τ 가 167로 수직층류형 클린룸보다 큰 값을 갖게되는 우수한 구조임을 알 수 있다. 결론적으로 말하면 여기서 도입된 무차원 수 τ 는 형상이 고정된 클린룸의 동적 오염특성을 나타내는 변수라기보다는 클린룸의 형태 또는 내부구조가 바뀌었을때의 오염입자 제어성능을 판단할 수 있는 무차원 변수이다.

마지막으로 클린룸내에서 작업중 있을 수 있는 지속적인 오염입자 발생의 경우를 계산하여 유입속도에 따라 정상상태에 도달하는 시간을 Table 4에 나타냈다. 이러한 경우 유입속도에 따라 약간의 차이는 보이지만 전체적으로 14초에서 23초가 지난후 전체오염입자 개수는 정상상태의 95%이상의 값을 갖는다. 계산된 결과를 분석하여 보면 유입속도가 빠를수록 재순환 영역의 크기는 증가하며 재순환

Table 4 Relation between the inlet velocity and the arrival time to steady state

Inlet velocity (m/s)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Arrival time (sec)	16.5	22.5	14.0	17.5	15.5

영역에서 오염입자 분포의 정상상태 도달은 느려지게 된다. 또한 오염입자의 통로구역으로의 전파는 유입속도가 빠를수록 빨리 정상상태에 도달한다. 따라서 유입속도의 증가에 따른 정상상태에 도달하는 시간의 변화는 앞에서 언급한 두가지 상반된 경향 때문에 일정한 경향을 갖지 못한다. 오염과정은 순간발진의 경우와 같이 작업대 상부를 따라 재순환영역으로 오염입자가 전파되어 가며, 지속적인 발진이기에 때문에 순간발진의 경우보다 재순환영역의 오염문제는 더욱 심각하다.

4. 결 론

단순화된 2차원 클린룸에 대하여 청정도에 따라 유입속도를 변화시켰을 때 비정상 오염입자의 발생, 회복 특성을 수치해석적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 수치해석은 정성적으로 합리적인 결과를 나타낸다. 그러나 추후 계산결과와 신빙성을 확보하기 위하여는 실험과 병행되어 연구되어야 한다.

(2) 수치충류형 클린룸에서는 유입속도가 빠를수록 클린룸내의 재순환영역이 넓어지므로 설계시 기류의 평형성 유지에 관심을 기울여야 한다.

(3) 순간발진의 경우 최고 오염농도의 위치는 시간에 따라 이동하여 일정시간 이후에는 재순환영역으로 이동되며, 따라서 설계시 가능한 재순환영역 발생을 억제하고 이의 제거를 위한 특별한 방법이 도입되어야 한다.

(4) 본 연구에서 도입한 무차원 회복시간 τ 는 순간적인 오염시 어떠한 클린룸의 구조가 청정도 회복에 적합한가를 평가할 수 있는 무차원 수이며, 이 값이 클수록 오염입자제어 성능이 우수한 클린룸 구조라고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발

사업의 일부로서 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 포함한다.

참 고 문 헌

- (1) Murakami, Kato and Suyama, 1986, "Study on Air Velocity Distribution in Conventional Flow Type Clean Room", The 5th Proceedings of JACA, pp. 21~32.
- (2) Jinno, N., 1986, "Study of Airflow Pattern in Clean Room for Manufacturing Semiconductors", The 32nd Proceedings of IES, pp. 556~564.
- (3) Kuehn, Liu and Shanmugavelu, 1987, "Numerical Simulation of Flow Fields in Clean Room", The 33rd Proceedings of IES, pp. 298~303.
- (4) 이재현, 이진원, 이상렬, 1986, "작업대가 있는 청정실내의 유동특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제10권, 제6호, pp. 852~860.
- (5) 오명도, 이춘식, 1987, "클린룸에서의 입자제어용 충류 및 난류 유동분배에 관한 연구", 1987년도 공기조화냉동공학회 하계 학술대회 초록집, pp. 47~54.
- (6) Fujii and Hayakawa, 1985, "Theoretical Studies in Particulate Behavior in Laminar Airflow Room", The 31st Particulate Behavior in Laminar Airflow Room", 31st Proceedings of IES, pp. 70~73.
- (7) Murakami, Kato and Suyama, 1987, "Experimental and Numerical Analysis of Flow Field and Diffusion Field in Room with Obstacles", The 6th Proceedings of JACA, pp. 165~187.
- (8) Oh, M.D., Yang, H.C. and Lee, C.S., 1988, "Numerical Simulation of Air Flow and Contamination Diffusion in a Clean Tunnel Type Clean Room", The 7th Annal Mtg. of American Assosiation for Aerosol Research, Chapel Hill, North Carolina, Oct. 10~13.
- (9) Fujii and Boelman, 1987, "Space Clean-Up Characteristics of a Conventional Airflow Clean Room", The 33rd Proceedings of IES, pp. 331~336.
- (10) Soichi, Nobuyuki, Hiroshi and Koji, 1986, "Study on Cleanliness in Conventional Flow Clean Room (No.2)", The 5th Proceedings of JACA, pp. 5~8.
- (11) Nobuyuki, Soichi, Hiroshi and Koji, 1987, "Study on Cleanliness in Conventional Flow Clean Room (No.3)", The 6th Proceedings of JACA, pp. 205~208.
- (12) Launder and Spalding, 1972, "Lectures in Mathematical Models of Turbulence", Academic Press.
- (13) Jones and Launder, 1973, "The Calculation of Low-Reynolds Number Phenomena with a Two Equation Model of Turbulence", Int. J. of Heat and

- Mass Transfer, 16, pp. 1119~1130.
- (14) Patel, Rodi and Scheuerer, 1985, "Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flow: A Review", AIAA Journal, 23, pp. 1308~1319.
- (15) Rodi, W., 1984, "Turbulence Models and their Application in Hydraulics-a State of the Art Review", IAHR-Section.
- (16) Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw Hill.
- (17) Oh, M.D., Lim. H.K and Lee. C.S., 1988, "Numerical Modeling of Air Flow and Contaminated Particle Diffusion in Clean Room Environments with Internal Heat Source", Proceedings of 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Seoul, Korea, Vol. 1, pp. 450~455.