

< 논문 >

국소평균공기연령을 이용한 국소환경시스템의 청정도 평가 및 예측

노광철* · 이현철** · 박정일** · 오명도†
(2007년 1월 3일 접수, 2007년 3월 28일 심사완료)

Evaluation and Prediction of Cleanliness Level in the Mini-Environment System Using Local Mean Air-Age

Kwang-Chul Noh, Hyeon-Cheol Lee, Jung-Il Park and Myung-Do Oh

Key Words: Cleanliness Level(청정도), Cleanroom(클린룸), Contamination Control(오염제어), Local Mean Air-Age(국소평균공기연령), Mini-Environment System(국소환경시스템)

Abstract

A numerical and experimental study on the evaluation and the prediction of cleanliness level in the mini-environment system was carried out. Using the concept of local mean air-age (LMA) and effective flow rate, the new direct method for estimating the mini-environment was developed and compared with the previous performance index of airflow pattern characteristics. It was found out that the airflow pattern analysis is a restricted method to estimate the real performance of the mini-environment. The reason is that the airflow pattern cannot predict the effect of the increment of the ventilation rate on the cleanliness level in the mini-environment. While LMA is capable of showing the effects of the contaminant accumulation caused by turbulent intensity, eddy, and the increment of the effective flow rate. This result showed that LMA is more exact and effective performance index than the previous one like the airflow pattern characteristics.

1. 서론

GIGA급 클린룸 시대의 도래로 인하여 클린룸 내부에서의 오염은 입자뿐만 아니라 가스오염 (airborne molecular contamination, AMC)도 심각한 문제로 대두되고 있다. 이와 같이 오염원의 크기가 작아짐에 따라 클린룸에서의 공조방식도 기존의 CTM(clean tunnel module) 방식, Open-Bay 및 FFU(fan filter unit) 방식처럼 클린룸 전체공간을 청정하게 하는 방식에서 클린룸의 청정도는 Class 100~10,000 수준으로 낮추고 제조장비의 내부를 고청정으로 관리하는 국소환경시스템(mini-environment

system)의 사용이 증가하고 있다.⁽¹⁾ 또한 노광기 등의 제조장비에 대해서도 국소환경시스템의 개념을 도입하여 클린룸보다 고청정도의 Class로 관리하고 있다. 이는 제품의 동선과 가공점을 최대한 보호하여 생산수율을 극대화하고 최근에 대두되고 있는 클린룸에서의 운전에너지 절감을 위한 것이다. 그러나 이와 같이 국소환경시스템의 중요성이 증대하는 것에 비하여 이에 관한 연구는 시스템 종류의 다양성과 기업의 보안유지 등으로 인하여 그리 많지 않은 실정이다.

Schliesser와 Staudt-Fischbach⁽²⁾는 국소환경시스템 내부에서 기판과 상부에서 유입되는 기류의 온도차에 따라 국소환경시스템 내부에 형성되는 기류의 형태를 분석하는 실험적인 연구를 수행하여 아르키메데스(Archimedes) 수에 따른 기류의 형상을 분석하였고 국소환경시스템 내부에서의 유속은 최소 0.3m/s 이상이어야 한다고 주장하였다. Kobayashi 등⁽³⁾은 300mm 웨이퍼의 국소환경

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

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

* 서울시립대학교 산업기술연구소

** 삼성전기 생산기술연구소 MCC TG

시스템에서 사용되는 FOUP(front open unified pod)과 LPU(load port unit)에서 웨이퍼당 침착되는 입자수를 측정하여 FOUP의 개방속도를 최적화시키는 연구를 수행하였고 FOUP의 개방속도가 작을수록 PWP(particles per wafer pass)가 작아진다는 결과를 도출하였다. Zhu⁽⁴⁾는 국소환경시스템 내부에서 가스상 오염의 '메커니즘을 모델화 하였고 가스오염제어의 기술과 성능평가에 관하여 논하였다. Shiu 등⁽⁵⁾은 국소환경과 SMIF(standard mechanical interface format) 시스템에서 입자침착을 최소화할 수 있는 방안을 기류와 압력의 관점에서 분석하였고 구멍과 슬롯을 통하여 와류영역(recirculation zone)를 줄일 수 있다는 결과를 도출하였다. Hu와 Wu⁽⁶⁾는 FOUP/LPU가 있는 국소환경시스템에서 오염원과 웨이퍼의 위치에 따라 입자의 개수를 측정하였고 입자의 오염은 난류강도와 유동패턴에 따라 지배를 받는다는 결과를 도출하였다. 또한 Hu 등⁽⁷⁾은 반도체를 제조하는 국소환경시스템에 대하여 실험과 수치적인 방법으로 난류강도와 압력차, 입자농도를 측정하였고 이를 이용하여 성능평가를 수행하였다. Chuah 등⁽⁸⁾은 LCD 컬러필터 도장기를 국소미니환경으로 제작하였고 기류와 난류강도, 압력, 농도 등을 평가하여 제품위로의 입자침착과 VOC의 배출에 관한 연구를 수행하였다.

국내에서 국소환경시스템에 대한 연구는 아직까지 발표된 바가 없다. 그리고 국외의 연구들은 주로 기류와 난류강도를 이용하여 성능평가를 수행하였으나 이 방법은 국소환경시스템 내부에서 입자 및 가스오염 농도의 변화를 예측하지는 못한다. 따라서 본 연구에서는 국소환경시스템 중의 하나인 노광기(exposure equipment)를 대상으로 급·배기의 위치 및 유량 등의 변화에 따라 입자농도 측정실험을 수행하였고 동일한 구조에 대하여 3차원 기류 및 공기나이에 대한 CFD 계산을 수행하였다. 그리고 이를 통하여 국소환경시스템의 급·배기의 위치와 유량을 변경하였을 때, 오염도의 평가 및 예측을 수행할 수 있는 방법을 제안하였고 실험결과와 CFD 결과의 비교를 통하여 제안한 방법에 대한 적용 가능성을 검증하였다.

2. 국소환경시스템 평가방법

일반적으로 클린룸 내부에서 사용되는 국소환

경시스템들은 실제 제품의 가공점(manufacturing point)이기 때문에 제품 생산공정에서 가장 중요한 위치이지만 평가기준에 있어서 입자상 및 가스상 물질에 대하여 청정도를 측정하는 것과 국소환경시스템과 클린룸간의 차압을 측정하는 것 외에는 현재까지 명확한 기준은 없는 실정이다. 국소환경시스템의 평가기준을 만들기 어려운 이유는 국소환경시스템 내부의 작업로봇과 이송장치 등이 복잡한 구조로 배치되어 있고 이들이 가동되면서 기류 및 오염분포가 쉽게 변하기 때문이다. 이전의 연구⁽⁵⁻⁸⁾에서는 입자의 개수를 직접 측정하거나 CFD를 통하여 청정도를 예측하는 방법으로 사용하였고 기류의 경우에는 주로 CFD를 통하여 난류강도를 계산하는 것으로써 오염이 전파되는 영향을 평가하였다. 또한 일부의 업계에서는 국소환경시스템체계에 대한 가장 큰 와류체적의 비를 정의하여 평가지표로서 사용하는 경우도 있다. 그러나 CFD를 통하여 난류강도나 와류체적비를 이용하여 기류를 평가하는 경우에는 국소환경시스템 내부에서 기류 평행도(parallelism)만을 예측할 수 있을 뿐, 제품의 생산수율에 직접적인 영향을 미치는 청정도에 대한 예측은 불가능하다.

본 연구에서는 환기에서 사용되고 있는 국소평균공기연령(local mean air-age, LMA)과 유효풍량(effective flow rate)의 개념을 도입하여 국소환경시스템 내부에서 기류뿐만 아니라 청정도를 예측하고 평가해 보았다. 공기연령^(9,10)이란 급기구를 통하여 실내로 유입된 공기가 실내의 임의의 점에 도달할 때까지 소요된 시간이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 공기가 실내로 유입되는 시점의 공기연령을 0으로 하면 실내 임의의 점 P에서의

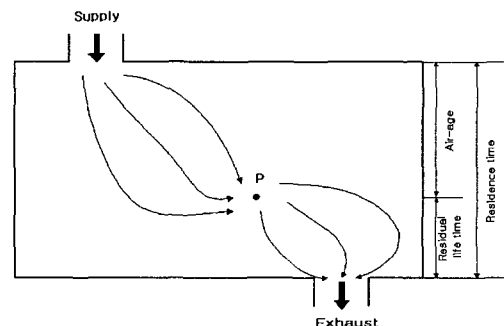


Fig. 1 Definition of different ages

공기연령분포는 통계적으로 산출할 수 있다. 일반적으로 공기는 여러 가지 경로를 통하여 임의의 지점 P까지 도달할 수 있기 때문에 그 지점에서 도달하는 공기연령의 평균값을 국소평균공기연령(local mean air-age)이라 한다. 챔버내부에서의 국소평균공기연령은 신선한 공기가 임의의 점까지 도달되는 능력을 나타낼 뿐만 아니라, 와류에 따른 오염물의 혼합 및 전파 효과를 내포하고 있어 국소환경시스템 내부에서 기류 및 오염물질의 확산을 평가하는데 적합한 지표라 할 수 있다. 그리고 챔버내부에서 오염물질의 발진이 있는 경우에는 유효풍량을 이용하여 오염물질의 농도변화를 예측할 수 있다. 유효풍량이란, 실제적 과 실평균 체류시간(residence time)의 비로서 식 (1)과 같이 정의된다.⁽⁹⁾

$$Q_{eff} = \frac{V}{\tau_r} \quad (1)$$

여기서, Q_{eff} 는 유효풍량(m^3/s), V 는 실체적(m^3), τ_r 은 실평균 체류시간(s)이다. 유효풍량은 물리적인 풍량(physical flow rate)이 아니라 수학적인 풍량(formal quantity)으로서 실내에 형성되는 기류 패턴에 따라 달라지는 값이다. 만약 실내에서 급기되는 환기풍량이 동일하여도 급배기구와 내부 구조물의 위치에 따라 기류의 패턴이 달라지면 급기의 체류시간에 영향을 미치고 실내오염물질의 평균농도는 변하게 된다. 이와 같이 오염물질의 잔류량에 의해 수학적으로 결정되는 값이 유효풍량이다. 따라서 오염물질의 실내 평균농도는 실내오염물질 발생량과 유효풍량의 비로서 다음 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\langle C(\infty) \rangle = \frac{\dot{m}}{Q_{eff}} \quad (2)$$

여기서, \dot{m} 은 실내오염물질 발생량(kg/s 또는 $parts/s$), $\langle C(\infty) \rangle$ 는 오염물질의 실내평균농도(kg/m^3 , $parts/m^3$)이다. 식 (1)과 식 (2)로부터, 실제적이 일정할 때 오염물질의 실내평균농도는 실내오염물질 발생량과 실평균체류시간의 비로서 계산될 수 있다.

$$\langle C(\infty) \rangle = \tau_r \frac{\dot{m}}{V} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 실내오염물질 발생량이 일정한 경우, 오염물질의 실내평균농도는 실평균체류시간과 비례함을 알 수 있다.

이러한 개념을 국소환경시스템의 P를 중심으로 하는 국소제어체적에도 동일하게 적용할 수 있다. P를 중심으로 하는 국소제어체적에 영향을 미치는 단위시간당 오염물질의 양을 $\dot{m}_p(kg/s$ 또는 $parts/s)$, P를 중심으로 하는 국소제어체적을 $V_p(m^3)$, P점에서의 국소평균공기연령을 $\tau_p(s)$ 라 하면, 오염물질의 국소평균농도는 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\langle C_p \rangle = \tau_p \frac{\dot{m}_p}{V_p} \quad (4)$$

급배기구 위치와 풍량 등과 같이 국소환경시스템의 경계조건이 변했을 경우, 식 (4)를 이용하여 P를 중심으로 하는 국소제어체적에서의 국소평균농도를 예측해 볼 수 있다. P점에 영향을 미치는 단위시간당 오염물질의 양과 국소제어체적의 크기가 경계조건 변화에 관계없이 일정하다고 가정하면, P를 중심으로 하는 국소제어체적에서 개선 후 국소평균농도는 다음과 같이 계산된다.

$$\langle C_p \rangle_{after} = \langle C_p \rangle_{before} \cdot \frac{\tau_{p,after}}{\tau_{p,before}} \quad (5)$$

여기서, 하첨자 before는 개선 전, after는 개선 후를 의미한다.

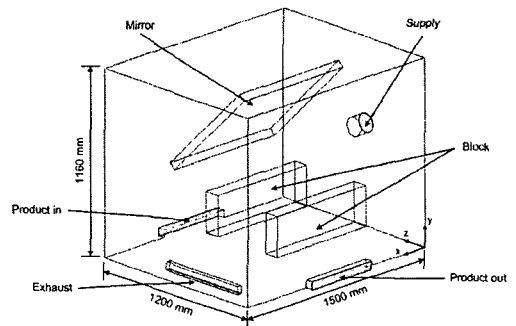


Fig. 2 Original layout of the mini-environment system

3. 연구 모델

Fig. 2는 클린룸 내부에 설치된 국소환경시스템의 한 종류인 노광기로서 현재 사용되고 있는 장비이다. 그 크기는 1.20m(L)×1.50m(D)×1.16m(H)으로 상부에 노광을 하기 위한 반사경이 사선방향으로 기울어져 설치되어 있고 노광기 바닥의 좌우측에는 제품이 유입되고 유출되는 부분이 있다. 국소환경시스템의 후면에는 노광시 발생하는 열량을 제거하고 신선한 공기를 공급하는 급기구가 있고 국소환경시스템의 전면 하부에는 내부에서 발생된 열과 내부 발진 입자 등을 제거하는 배기구가 있다. 급기구는 직경이 0.12m인 원형이고 배기구는 크기가 0.6m(L)×0.03m(D)인 직사각형의 구조이다. Fig. 1의 기존 구조에서 급기구의 위치가 국소환경시스템 후면부 중앙이고 급기구와 배기구의 면적도 매우 작기 때문에 내부에서 발생된 오염물질들이 국소환경시스템 외부로 배

출되기 어려운 구조로 되어 있다.

이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 Fig. 3과 같이 급·배기구의 크기와 위치를 변경한 2가지 경우를 고려하였다. case 1은 급기구의 면적을 0.5m(L)×0.8m(H)로 증가시키고 가이드 베인을 설치하여 청정한 공기가 블록(block)이 있는 가공점 주변으로 공급되도록 하였고 배기구의 면적도 1.0m(L)×0.2m(D)로 증가시켰다. case 2는 청정한 공기가 국소환경시스템의 상부에 있는 1.2m(L)×1.2m(H) 크기의 급기구에서 공급되고 국소환경시스템의 하부에 설치된 배기구도 case1보다 국소환경시스템의 양측면과 후면에서 배기면적이 증가된 구조로 되어 있다.

4. 연구방법

4.1 수치해석

대부분의 국소환경시스템 내부에서의 유동은 난류이기 때문에 수치해석을 수행할 때 standard

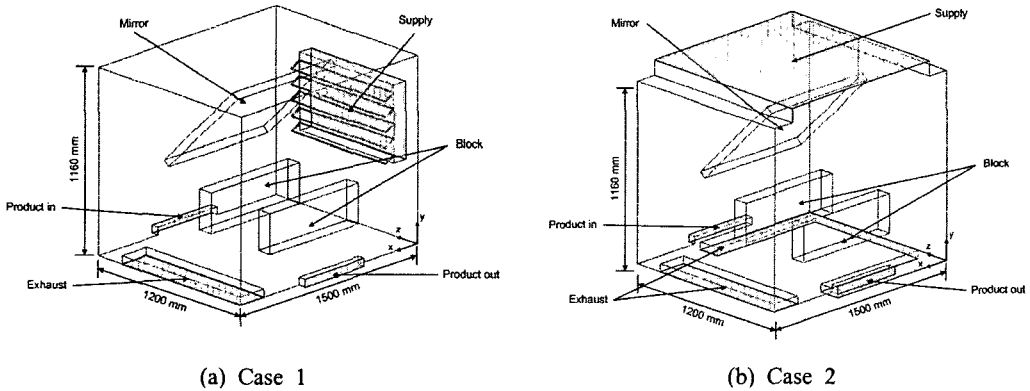


Fig. 3 Layout changes of the mini-environment system for improving the performance

Table 1 Terms, coefficients and constants in Eq.(6)

Equations	Φ	$\Gamma_{\phi,eff}$	S_{ϕ}
Continuity	1	0	0
Momentum	U_i	μ_{eff}	$-\partial P / \partial x_i$
Turbulence kinetic energy	k	μ_{eff} / σ_k	$P_k - \rho \epsilon + G_k$
Turbulence kinetic energy dissipation rate	ϵ	$\mu_{eff} / \sigma_{\epsilon}$	$\epsilon (C_1 P_k - C_2 \epsilon) / k + C_3 G_k \epsilon / k$
Concentration	C	μ_{eff} / σ_C	S_C

$P_k = \mu (U_{ij} + U_{ji}) U_{ij}$, $\mu_{eff} = \mu_t + \mu$, $\mu_t = C_{\mu} \rho k^2 / \epsilon$,
 ($\sigma_k, \sigma_{\epsilon}, \sigma_C, C_1, C_2, C_3$) = (1.0, 1.314, 1.0, 1.44, 1.92, 1.0, 0.09)

$k-\varepsilon$ 난류모델을 사용하였다.^(5,7) 공기유동과 가스 농도 수송방정식은 다음과 같은 정상상태 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다.⁽¹¹⁾

$$\text{div}(\rho U\Phi) - \Gamma_{\phi, \text{eff}} \text{grad} \Phi = S_{\phi} \quad (6)$$

여기서 ρ 는 공기밀도(kg/m³), $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ 는 유효확산계수(kg/m·s), U 는 유속벡터(m/s), S 는 방정식 특성에 기인한 생성항, ϕ 는 각 방향의 속도, 난류에너지, 난류소산에너지, 가스농도를 나타낸다. Table 1에 이에 대한 자세한 내용이 기술되어 있다. 기존 국소환경시스템과 성능이 개선된 case 1과 2의 국소환경시스템에서 급기되는 공기의 유속은 각각 1m/s, 0.45m/s, 0.45m/s이다. 난류에너지의 유입조건을 지정하기 위하여 난류강도를 5~10%로 채택하였다. 이는 유입구의 난류강도가 클린룸 해석 영역에 큰 영향을 미치지 않는다는 이전의 연구결과⁽¹⁴⁾에 기인한다. 그리고 유입구에서의 난류에너지 소산율은 $\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} k^{3/2} / l$ 으로 선정하였고 혼합길이(l)는 유입구 수력직경의 7%로 선정하였다.

국소평균공기연령의 계산은 기존의 연구에서 행한 다음과 같은 정상상태 농도장 계산법을 따랐다.^(12,13)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[U_i \tau - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{\sigma_c} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \right] = 1 \quad (7)$$

여기서 τ 는 국소평균공기연령(s)이다. 국소평균연령을 계산할 때의 급기와 배기에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{inlet: } \tau = 0, \text{ outlet: } \frac{\partial \tau}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

식 (6)의 지배방정식은 SIMPLE 알고리즘⁽¹¹⁾을 적용하고 상용 CFD코드인 STAR-CD를 사용하여 계산이 수행되었다. 그리고 대류항에 대한 계산을 위하여 2차의 상류차분도식(second order upwind scheme)을 사용하였다. 격자는 약 350,000개의 사면체(tetrahedron) 격자계를 사용하였다. 계산시 수렴판정 조건으로는 입구에서의 유입질량률과 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10^{-3} 이하로 하였고, 농도장은 유수의 합이 10^{-7} 이하일 때로 정하였다.

본 연구에서는 기존 구조의 국소환경시스템과 case 1, case 2에 대하여 수치적인 연구를 수행하여 이에 대한 결과를 평가하고 분석하였다.

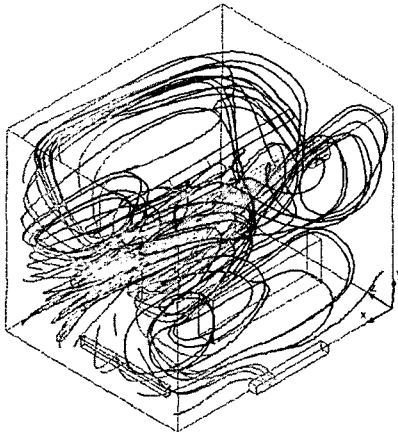
4.2 실험

본 연구에서 제안한 청정도 평가 및 예측의 타당성을 증명하기 위하여 실제 공정이 이루어지고 있는 상태에서 실험을 수행하였다. 개선 전·후의 결과를 비교하기 위하여 Fig. 2의 기존 구조와 Fig. 3(b)와 같이 개선된 구조의 노광기에서 청정도를 측정하였다. 청정도 측정위치는 전면 배기구에서 10cm 상부에 있는 점을 선정하였다. 부유입자의 크기와 계수의 측정은 광학입자계수기(optical particle counter)인 Lighthouse Solair 3100 PLUS를 사용하였다. 입자계수기의 유량은 0.0283m³/min이고, 측정된 입경 채널은 0.3 μ m, 0.5 μ m, 1.0 μ m, 5.0 μ m, 10.0 μ m이다. 측정횟수는 3번 이상이었으며 측정오차가 크지 않아서 이후 결과들은 측정값의 평균치를 사용하여 나타내었다.

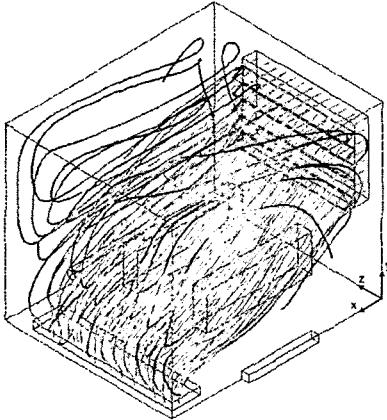
5. 결과 및 고찰

5.1 기류에 의한 평가

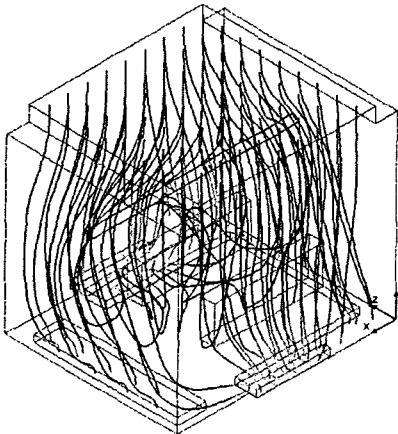
Fig. 4는 기존의 구조와 case 1, 2와 같이 개선된 구조의 국소환경시스템 내부에서 CFD를 통하여 구해진 유선들을 보여주고 있다. 청정한 공기가 국소환경시스템의 후면에서 유입되는 기존의 구조에서는 급기구와 배기구의 면적이 협소하여 국소환경시스템 내부에서 상당히 큰 와류가 형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 영향으로 내부에서 발생된 오염물질은 외부로 배출되기 전에 상당히 긴 시간동안 국소환경시스템 내부에 체류하게 되고 이로 인해 내부의 청정도는 나빠지게 된다. 또한 일부의 기류가 국소환경시스템 좌우측 하단에 있는 제품의 유입·유출구를 통하여 배출되는 것을 확인할 수 있다. 이는 긴 시간동안 체류하여 오염된 공기가 제품의 입·유출단에서 제품에 침착되어 생산수율을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 반면, 개선된 구조의 시스템은 기존의 구조보다 와류가 형성되는 체적이 작아지는 것을 확인할 수 있다. case 1은 국소환경시스템 상부와 하부에서 와류가 형성되지만 대부분의 기류가 확대된 배기구를 통하여 원활히 배출되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과



(a) Original layout



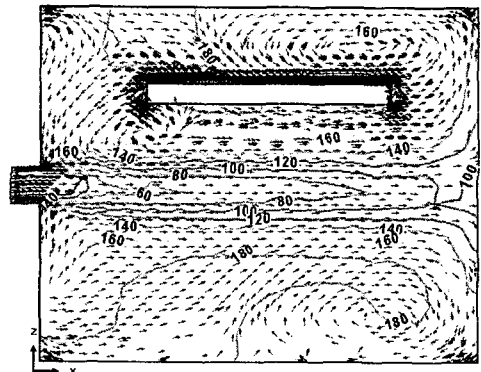
(b) Improved layout : case 1



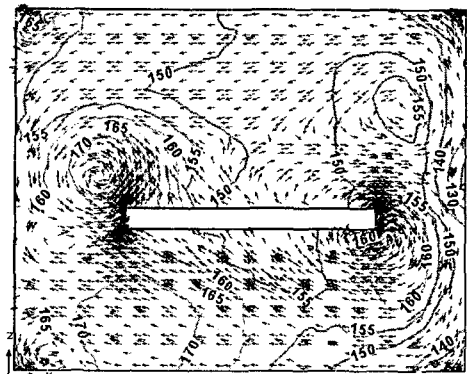
(c) Improved layout : case 2

Fig. 4 Streamlines of the original and improved layouts

는 오염물질의 체류시간이 기존의 구조보다 짧아짐을 의미하기 때문에 국소환경시스템 내부의 청정도는 좋아질 것으로 판단된다. 그러나 오염물질의 발진원이 블록이 있는 국소환경시스템의 하부 중앙에 존재한다면, 그 영역에서 형성된 와류에 의해 오염물질이 누적되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 case 1과 같이 구조로 시스템을 개선하고자 한다면, 본 연구에서와 같은 국소환경시스템의 경우 오염물질의 주요 발진원이 시스템의 하부에 있지 않은 경우에만 가능할 것으로 판단된다. case 2는 대부분의 영역에서 기류가 원활히 배출되는 것을 볼 수 있고 와류의 체적도 다른 경우에 비해 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 case 1에서와 같이 오염물질의 발진원이 국소환경시스템의 하부 중앙에 존재한다면 국소환

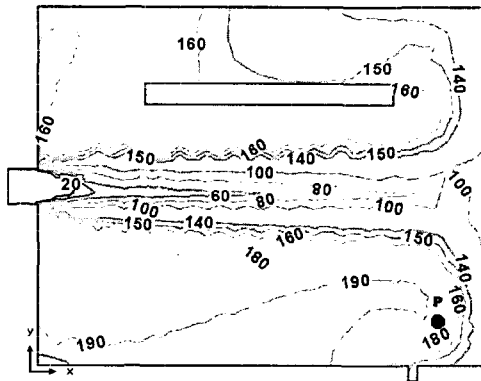


(a) $y=0.52m$

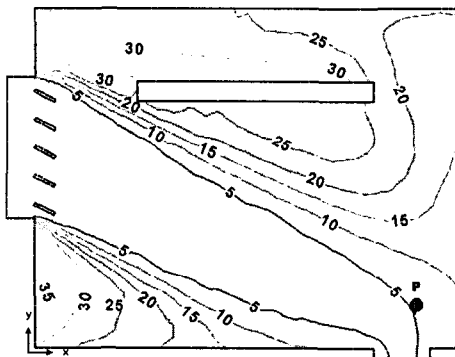


(b) $y=1.0m$

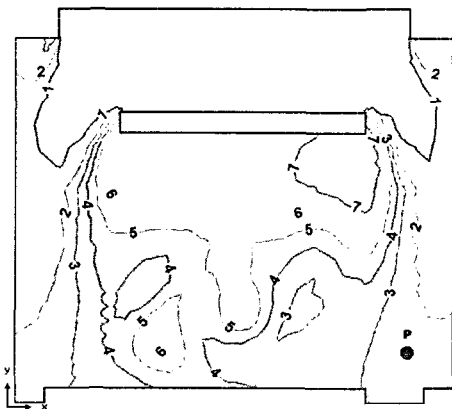
Fig. 5 Velocity vectors and local mean air-age contours of the original layout in the plane of y axis



(a) Original layout



(b) Case 1



(c) Case 2

Fig. 6 Local mean air-age contours of the original and improved layouts in the x-y plane of $z=0.6m$

경시스템의 하단 중앙부에서 형성되는 와류에 의해 오염물질이 누적될 수 있는 문제점이 있다.

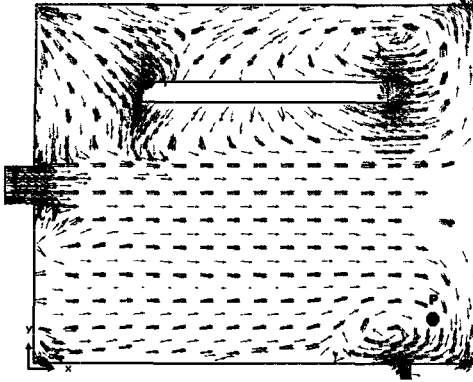
이상과 같이 유선을 통한 와류의 크기로서 국소환경시스템을 평가한 결과, 개선된 구조인 case 1과 2가 기존의 구조보다 오염제어 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 하지만 개선되어진 case 1과 2의 경우에도 가공점 상부에서 와류가 형성되기 때문에 오염물질의 주요 발원인이 국소환경시스템의 하부 중앙에 존재한다면 시스템의 개선이 이루어지지 않았다고 볼 수도 있다. 이는 와류만으로 국소환경시스템을 평가하는 것이 정확하지 않을 뿐만 아니라 정량적인 기준도 될 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 이전의 연구에서 주로 사용한 난류강도도 정량적인 기준으로 사용할 수 없을 것으로 판단되었으며 이로부터 기류 형상분포를 통한 국소환경시스템의 평가는 제한적이라는 것을 알 수 있었다.

5.2 국소평균공기연령에 의한 평가

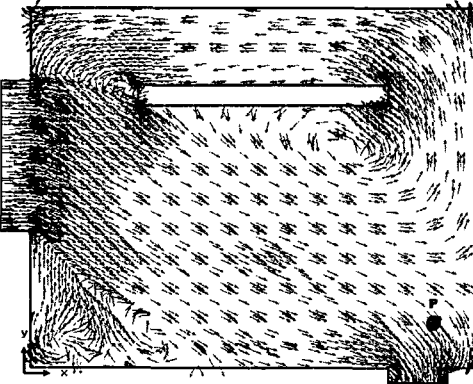
Fig. 5는 기존 구조의 국소환경시스템에서 $y=0.52m$ 와 $y=1.0m$ 인 단면의 속도벡터와 국소평균공기연령을 보여주고 있다. 동일한 단면에서 속도벡터와 국소평균공기연령분포를 관찰한 결과, 와류가 형성되는 영역에서는 주변의 영역에 비해 국소평균공기연령이 다소 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 국소평균공기연령이 와류에 의한 오염물질의 누적을 평가할 수 있는 지표로서 사용할 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 6은 기존 구조와 개선된 case 1, 2의 구조를 갖는 국소환경시스템에서 $z=0.6m$ 인 단면의 국소평균공기연령 분포를 보여준다. 기존의 구조보다 개선된 구조인 case 1과 2에서 국소평균공기연령이 상당히 낮게 나타나고 있다. 이러한 이유는 첫째로 개선된 case 1과 2는 기존의 구조보다 실평균공기연령이 각각 약 1/35, 약 1/76로 감소하면서 청정한 공기의 유효풍량이 증가했기 때문이고, 둘째로는 개선된 case 1과 2는 기존의 구조보다 배기구의 면적이 각각 약 11배, 21배로 증가하여 오염물질의 배출이 원활해졌기 때문이다.

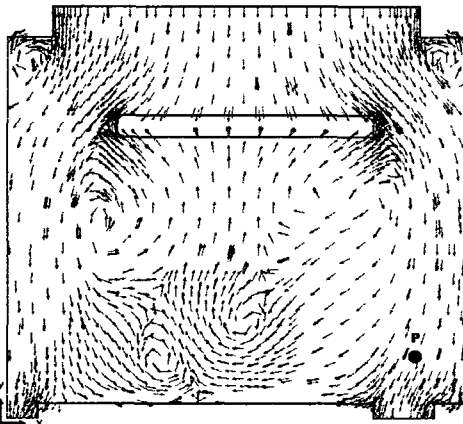
만약 기류만으로 개선 전·후의 결과를 평가한다면 Fig. 7에서 보는 바와 같이 우수한 구조에 대한 평가가 어려워진다. 기존 구조보다 개선된 구조인 case 1은 전체적인 와류의 면적에서는 변화가 거의 없는 것으로 평가되어 개선되지 않은 것



(a) Original layout



(b) Case 1



(c) Case 2

Fig. 7 Velocity vectors of the original and improved layouts in the x-y plane of $z=0.6m$

으로 판단할 수 있고, case 2는 기존의 구조보다 와류의 면적이 작아지기는 하지만 와류가 형성되는 위치가 가공점($y=0m$)에 가까이 있어 오히려 좋지 못한 구조로 판단할 수 있다. 이처럼 기류에 의한 평가는 국소환경시스템 내부에서 유효풍량이 증대되어 나타나는 효과를 예측할 수 없는 문제점을 갖고 있다.

이상의 결과로부터 국소평균공기연령을 이용한 가공점 청정도 평가가 기류를 이용한 평가지표보다 정성적인 면에서 우수한 평가지표인 것으로 판단되었다.

5.3 청정도 평가 및 예측

국소환경시스템 내부에 있는 임의의 국소체적에서 이 위치에 영향을 미치는 단위시간당 오염물질의 양과 국소평균공기연령을 안다면, 식 (4)를 이용하여 오염물질의 국소평균농도를 계산할 수 있다. 그러나 실제 임의의 국소체적에 영향을 미치는 오염원이 다양하기 때문에 오염물질의 농도를 직접 측정하는 것 외에는 청정도를 예측하는 것은 어렵다. 본 연구에서와 같이 국소환경시스템의 급·배기 구조를 개선하고자 한다면, 기존의 구조에서 측정된 청정도 결과를 바탕으로 식 (5)를 이용하여 개선된 구조에서의 청정도를 예측하는 것은 가능하다. 이때, 국소평균공기연령은 식 (7)과 (8)를 이용하여 CFD를 수행하고 이로부터 근사한 값을 구할 수 있다.

Table 2는 기존 구조와 개선된 구조의 국소환경시스템에서 CFD를 통해 계산된 유효풍량, 실평균공기연령과 P점에서의 국소평균공기연령을 보여준다. 개선된 구조에서 유효풍량이 증가함에 따라 실평균체류시간과 P점에서의 국소평균공기연령이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 Table 2와 식 (5)로부터 계산된 점 P에서의 청정도 감소비는 case 1과 case 2에 대해 각각 0.0287, 0.0132로 나타났다. 이는 기존 구조를 case 1과 2와 같이 변경하는 것이 시스템 내부에서 오염물질의 농도를 낮추고 성능을 개선시킬 수 있다는 것을 의미한다.

Table 3은 기존의 구조와 개선된 구조인 case 2에서 입경에 따라 실제 측정된 청정도의 결과이다. 실측에서는 $0.3\mu m$ 의 입경에서도 측정이 이루어졌으나 이 입경에서의 계수효율이 50%로 낮기 때문에 본 논의에서는 제외하였다. 기존 구조에

Table 2 Effective flow rate, room-averaged air-age, and LMA at the point of P for three different layouts

Layout	Effective flow rate (m ³ /h)	Room-averaged air-age (s)	LMA at the point of P (s)
original	45.2	166.4	181.4
case 1	518.7	14.8	5.2
case 2	2772.8	2.9	2.4

Table 3 Cleanliness of the original and case 2 at the measuring point of P with respect to the particle size

Particle size (μ m)	Cleanliness (parts/ft ³)	
	original layout	case 2
0.5	102	max. 1
1.0	35	0
5.0	2	0
10.0	0	0

서는 입경이 작아질수록 청정도가 큰 값으로 측정이 되었다. 그러나 개선된 후에는 0.5 μ m 크기의 입자만 최대 1개/ft³가 측정되었고 나머지 입경에 대해서는 모두 0의 값으로 나타났다. 기존의 구조와 case 1과 2에 대해 0.5 μ m 크기 기준으로 청정도 감소비로 예측한 P점에서의 청정도는 각각 2.9개/ft³, 1.35개/ft³ 이었다. 그리고 case 2에 대해 예측치와 실측치를 비교해 본 결과, 두 값이 매우 유사한 값으로 나타났다. 이로부터 본 연구에서 이용한 국소평균공기연령이 국소환경시스템을 평가하기에 적합할 뿐만 아니라 개선된 시스템의 청정도도 정량적으로 예측할 수 있는 방법임을 확인할 수 있었다.

6. 결론

제품의 수율개선을 위하여 노광기로서 사용되는 국소환경시스템의 급배기 위치와 유량을 변경하였을 때, 오염도의 평가 및 예측을 수행할 수 있는 방법을 제안하였고 실험과 CFD 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 와류 또는 난류강도로서 국소환경시스템을 평가하는 것은 정확하지 않을 뿐만 아니라 정량적인 평가지표가 될 수 없는 것으로 나타났고 이로

부터 기류만으로는 국소환경시스템의 가공점 청정도를 평가하는 것이 불충분하다고 판단되었다.

(2) 국소평균공기연령은 와류에 의한 오염물의 누적을 평가할 수 있을 뿐만 아니라 유효풍량의 증가에 따른 영향을 내포하고 있어 가공점 청정도를 평가할 때 기류 이용 평가지표보다 정성적이고 정량적인 면에서 우수한 평가지표인 것으로 판단되었다.

(3) 개선된 구조인 case 2에서 실험으로 측정된 청정도와 수치해석을 통해 구해진 청정도는 0.5 μ m의 입경에서 각각 최대 1개/ft³, 1.35개/ft³로 근사하게 측정되었고 이로부터 국소평균공기연령은 국소환경시스템을 평가하기에 적합할 뿐만 아니라 개선된 시스템의 청정도도 예측할 수 있는 방법임을 확인할 수 있었다.

(4) IT제품을 생산하는 공장에서 가공점 청정도 평가 및 확보는 비용절감 측면에서 기존 시스템의 개선을 위해 매우 중요한 기술로서 인식하고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 국소평균공기연령을 이용하면 CFD 계산만을 통해서도 개선 후의 효과를 판단할 수 있어 개선에 따른 비용의 손실을 최소화하는데 유리할 것으로 판단된다.

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) Schliesser, J. and Staudt-Fischbach, P., 1999, "Mini-environments and Thermal Effects," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, IEEE, pp.432~439.
- (3) Kobayashi, Y., Kobayashi, S., Tokunaga, K., Kato, K., and Minami, T., 2000, "Particle Characteristics of 300-mm Minienvironment (FOUP

- and LPU),” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, Vol. 13, No. 3, pp. 259~263.
- (4) Zhu, S. B. 2002, “Study of Airborne Molecular Contamination in Minienvironments,” *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, IEEE, pp. 309~313.
- (5) Shiu, H. R., Huang, H. Y., Chen, S. L., and Ke, M. T., 2003, “Numerical Simulation for Air Flow in Mini-Environment and SMIF Enclosure,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, Vol. 16, No. 1, pp. 60~67.
- (6) Hu, S. C. and Wu, T. M., 2003, “Experimental Study of Airflow and Particle Characteristics of a 300-mm FOUP/LPU Minienvironment System,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, IEEE, Vol. 16, No. 4, pp. 660~667.
- (7) 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.
- (8) Chuah, Y. K., Tsai, C. H., and Hu, S. C., 2000, “Simultaneous Control of Particle Contaminants and VOC Pollution under Different Operating Conditions of a Mini-environment that Contains a Coating Process,” *Building and Environment*, Vol. 35, pp. 91~99.
- (9) Sandberg, M., 1983, “Ventilation Efficiency as a Guide to Design,” *ASHRAE Transactions*, Vol. 89, Pt. 2B, pp. 455~479
- (10) Han, H. T., 1999, “On the Definition of Ventilation Effectiveness,” *Magazine of SAREK*, Vol. 28, No. 1, pp. 38~47.
- (11) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, Washington, DC.
- (12) Noh, K. C., Lee, S. C., and Oh, M. D., 2003, “A Numerical Analysis on the Airflow Characteristics in Super Cleanrooms with different Design Types,” *Journal of SAREK*, Vol. 15, No. 9, pp. 751~761.
- (13) Han, H. T., 1998, “Numerical Analysis of Local Exhaust Effectiveness using Reverse-flow Calculation Method,” *Journal of SAREK*, Vol. 10, No. 6, pp. 658~665.
- (14) Park, M. S., 1993, *Analysis of 3-Dimensional Flow Characteristics in a Clean Room with Low Pressure Drop Filter Installation*, PH. D. Thesis, Hanyang University.