

# 광식각공정 클린룸에서의 기류 및 교차오염에 대한 수치적 연구

노광철\*·이승철\*\*·오명도†

## A Numerical Study on the Characteristics of Airflow and Cross Contamination in the Photolithography Process Cleanroom

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

**Key Words:** Cleanroom(클린룸), Fan Filter Unit(팬필터유닛), Cross Contamination(교차오염), Photolithography process(광식각공정)

### Abstract

We performed the numerical study on the characteristics of the airflow and 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. We knew that the airflow characteristics of the cleanrooms are largely affected by the porosity of panel and the adjustment of dampers. And the numerical result showed that the global cross contamination varies with the location of source and the passage of time.

### 1. 서 론

GIGA급 클린룸 시대의 도래로 인하여 클린룸 내부에서의 오염은 입자뿐만 아니라 가스오염(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 있고, 특히 광식각공정(photolithography process)에서는 암모니아(NH<sub>3</sub>) 가스가 화학증폭형 포토레지스트의 선폭에 큰 영향을 미치는 것으로 보고 되었다.<sup>(1)</sup>

클린룸에서 이러한 가스오염확산에 대한 영향은 클린룸 특성상 실제적인 평가가 어렵기 때문에<sup>(1,2)</sup> 전산유체역학(CFD)기법을 이용하여 기류 및 오염확산분포 등에 대한 연구들이 많이 수행되어 왔다. 국내에서는 MEGA급 클린룸 내에서의 2차원 유동 및 오염입자의 확산특성, 난류모델들에 대한 평가 등의 연구가 수행되었고<sup>(3-5)</sup> 최근에 들어서 슈퍼클린룸에서 2차원 가스오염 분석에 대한 비교 연구가 수행되었다.<sup>(2)</sup> 국외에서는 일방향성 유동의 초청정 클린룸시스템에서 클린룸 공조방식과 크기에 따른 유동 및 환기특성 등을 수치적인 방법으로 비교, 분석한 연구가 수행되었고 GIGA급 국소환경시스템(mini-environment system)의 사용이 증가함에 따라, 클린룸의 작업 영역에서 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 국외에서는 반도체용 클린룸에서 가스오염 확산에 대한 연구가 아직까지 미미한 실정이다.

† 서울시립대학교 기계정보공학과

E-mail : mdoh@uos.ac.kr

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

\* 서울시립대학교 대학원 기계정보공학과

\*\* 동해대학교 자동차공학과

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

## 2. 클린룸 모델

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 팬필터유닛(Fan Filter Unit, 이하 FFU라 칭함)을 사용하여 공기를 순환하는 방식이다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서 사용한 클린룸 시스템의 크기는 34.8m(L)×28.3m(D)×14.3m(H)으로 전체 클린룸이 중앙을 중심으로 대칭이기 때문에 우측 반만을 고려하여 모델을 구성하였다. Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 FFU 클린룸은 높이방향으로 상부플레넘(3.6m), 클린룸(4.2m), 하부플레넘(6.5m)의 3부분으로 나누어지고 그 외 복도, 리턴덕트, 팬필터유닛, 파티션(partition), 패널 지지대(panel support) 등으로 구성되며 클린룸 내부에서의 우수한 기류분포 형성을 위하여 클린룸 하부에 패널과 댐퍼가 설치된다. 여기서 파티션은 클린룸 내부에서 서비스 영역(service area)과 프로세스 영역(process area)을 구분하는 것으로 사용된다. 그리고 급기와 배기가 이루어지는 부분은 좌측면(리턴덕트의 반대면)에 위치한다.

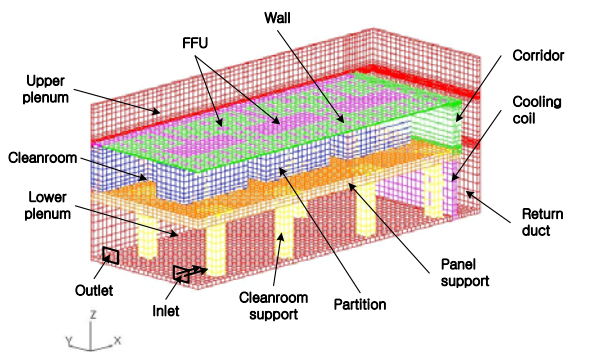
Fig. 1(b)는 클린룸 패널로부터 z=1.5m 위인 위치에서의 서비스 영역과 프로세스 영역의 구조를

평면도로 보여주고 있다. 실제작업이 이루어지는 프로세스 영역은 그림에서 붉은 실선 안쪽부분으로 모든 부분에 팬필터유닛이 설치되고 장비들이 위치한 서비스 영역은 전체 단면의 약 30%정도만 팬필터유닛이 설치되어 있는 것으로 가정하였다. 또한 기류분포에 대한 결과 논의를 위하여 프로세스 영역인 y=6m와 13m를 대표위치로 정하였고, 교차오염에 대한 결과를 논의를 위하여 프로세스 영역(S1, S2)과 서비스 영역(S3, S4)에서 각각 2군데씩 오염발생 대표위치를 정하였다.

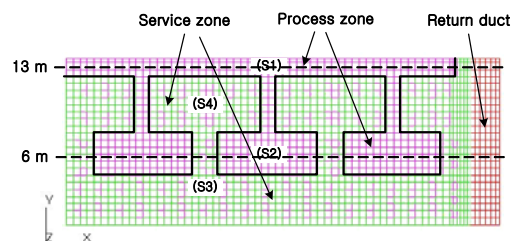
## 3. 클린룸 평가지표

이전의 클린룸에 대한 수치적 연구에서는 교차오염(cross contamination)이 기류 및 압력분포에 의해 큰 영향을 받는 것으로만 알려져 있었고 이러한 이유로 클린룸의 평가지표로 비균일도(non-uniformity, NU), 편향각(deflection angle,  $\theta$ ), 환기효율(ventilation effectiveness) 등의 기류분포 특성만이 사용되었다.<sup>(6)</sup> 그러나 클린룸에서의 교차오염은 오염원이 존재하는 클린룸 영역 내에서만 영향을 미치는 것이 아니라 그 양에 따라 전체 클린룸 시스템의 다른 영역에까지 영향을 미칠 수 있다는 연구결과<sup>(2)</sup>가 발표되었다. 이 연구에서는 가스오염 평가지표로 교차오염(cross contamination), 확산거리(propagation distance, PD), 회복시간(recovery time, RT)의 3가지를 제안하였고 이를 이용하여 가스오염에 대한 평가를 수행하였다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 장비가 배치되지 않은 클린룸에서 사용되는 평가지표인 비균일도와 편향각, 교차오염의 개념만을 사용하여 클린룸을 평가하고자 한다.

## 4. 수치해석방법



(a) Schematic design



(b) Process zone and service zone

Fig. 1 Cleanroom system of photolithography process

클린룸 시스템에서의 유동특성을 기술하는 비정상상태의 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지방정식, 난류운동에너지소산율방정식을 사용하였고 난류모델은 standard k- $\epsilon$  모델을 채택하였다. 각각 식들과 기호의 선정은 일반적인 교과서에서의 예를 따랐다.<sup>(11)</sup> 지배방정식을 풀기 위하여 상용 CFD코드인 STAR-CD<sup>(11)</sup>를 사용하였다. 지배방정식의 대류항을 계산하기 위해서 상류차분도식(upwind differencing scheme)을 사용하였고, 정상상태와 비정상상태의 속도장, 농도장을 얻기 위하여 PISO 알고리즘을 사용하였다.<sup>(10)</sup> 계산시 수렴판정 조건으로는 입구에서의 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두  $10^{-3}$  이하일 때로 정하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 클린룸의 형상이 중앙과 후면, 정면을 중심으로 대칭이기 때문에 각 부분들을 대칭경계조건으로 처리하였다. 팬필터 유닛은 팬과 필터를 한 유닛으로, 즉 모멘텀소스와 압력강하요소가 동시에 존재하는 것으로 처리하였고 클린룸 전체 순환유량은 두 시스템 모두 약 102,352 CMH이다. 외부로부터의 급기되는 양은 클린룸의 유동특성에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 순환유량의 약 30%가 유입되는 것으로 처리하였다. 배기량은 출구경계조건으로 처리하여 유동의 방향과 크기가 질량보존의 결과로 인하여 결정될 수 있도록 하였다. 그리고 클린룸 상부의 필터, 하부의 패널, 냉각코일, 댐퍼에서의 압력강하량은 Darcy's law를 이용한 식(3)를 이용하여 계산하였고<sup>(11)</sup> 사용된 계수값들은 참고문헌<sup>(2,12,13)</sup>을 근거로 하였다. 클린룸 패널의 다공도(porosity)로 사용된 값도 이전의 연구결과<sup>(13)</sup>를 바탕으로 선정하였다.

$$-K_i u_i = -\frac{\partial P}{\partial x_i}, \quad K_i = \alpha_i |\vec{u}_i| + \beta_i \quad (3)$$

본 연구에서는 교차오염을 해석하기 위하여 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 오염물질로 하여 계산을 수행하였다. 오염발생위치는 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 클린룸 패널에서 1.8m 위인 곳으로 4개의 위치(S1~S4)를 선택하였고 이때의 발생량은 광식각공정에서 Bases 물질<sup>(14)</sup>의 허용기준치인 1ppb(약  $8.0 \times 10^{-10} \text{kg/m}^3$ )의  $10^4$ 배로, 10초 동안 지속되는 것으로 가정하였다.

## 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 단면에서의 속도분포를 보여주고 있고 그림에서 보는 바와 같이 프로세스 영역이 있는 단면에서 속도분포가 다른 것을 확인할 수 있다. y=6m인 단면의 프로세스 영역에서 대부분의 기류는 수직하방으로 흐르지만 y=13m인 단면에서는 리턴덕트 방향으로 갈수록(x가 증가할수록) 유동방향이 우측으로 편향되는 것을 확인할 수 있다. 이는 우측에 설치된 파티션과 댐퍼조정의 영향으로 인하여 편향각이 증가하는 것을 억제하기 때문이다. 그리고 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 클린룸 중앙부분에서 하부플레넘으로 흐르는 유량이 많은 것을 볼 수 있다. 이는 클린룸 속도분포를 균일하게 하기 위하여 Noh et al.<sup>(2)</sup>과 Cheng et al.<sup>(13)</sup>의 연구를 근거로 x=18m인 지점을 중심으로 좌측과 우측에 다른 다공도와 댐퍼의 압력강하량을 사용했기 때문이다. Fig. 2에서와 같은 기류분포는  $4.2\text{m} < y < 7.8\text{m}$ 인 프로세스 영역의 단면에서는 (a)와 거의 동일하였고,  $12.6\text{m} < y \leq 14.1\text{m}$ 인 프로세스 영역의 예서는 (b)와 거의 동일하였다.

Fig. 3은 x방향 거리와 댐퍼의 조정유무에 따른 프로세스 영역의 패널로부터 1.5m인 상부의 속도분포를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 댐퍼가 설치되어 조정된 경우와 설치되지 않은 경우의 속도분포는 상당히 다르게 나타났다. 댐퍼가 조정되지 않는 경우에는 x방향 거리가 증가할수록 속도의 크기도 점차 증가하는 현상을 보이지만 댐퍼가 조정된 경우에는 벽이나 파티션의 경계층 영역을 제외한 위치에서는  $0.43 \pm 0.6 \text{m/s}$  이내로 균일한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 필터하단에서 계산된 비균일도는 y=6m인 단면에서 13%, y=13m인 단면에서 5%로 측정되었고 이 값들은 모두 ISO 기준치<sup>(10)</sup>인 20%이내를 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 x방향 거리와 댐퍼의 조정유무에 따른 프로세스 영역에서의 편향각을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 댐퍼가 조정되지 않은 경우에는 단면의 위치에 관계없이 x가 13~31m인 부분에서 ISO 기준치를 초과하는 것으로 나타났지만

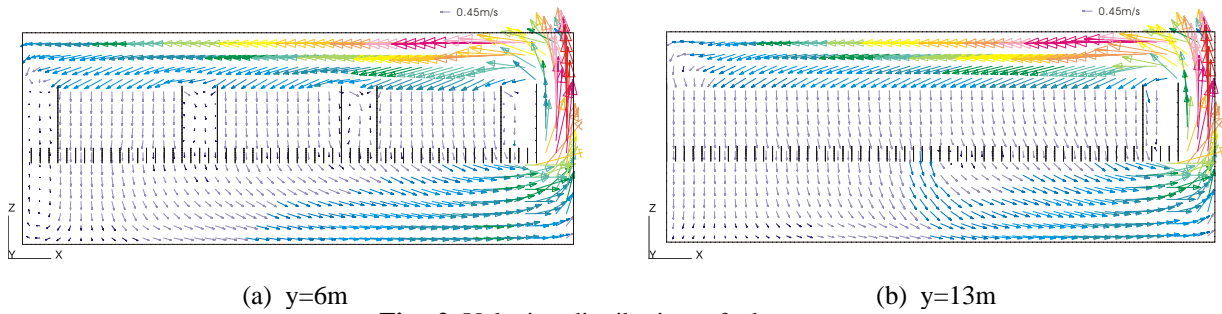


Fig. 2 Velocity distribution of cleanroom

댐퍼가 조정된 경우에는  $y=13\text{m}$ 인 단면에서만  $x$ 가  $20\sim 28\text{m}$ 인 지점에서 ISO 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 그리고 댐퍼가 설치되지 않은 경우에는 약  $28\text{m}$  이상인 지점부터 편향각이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 클린룸 내부에 있는 파티션에 의한 영향으로 기류의 편향을 막기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이  $y=13\text{m}$ 인 단면에서는 다공도와 댐퍼를 조정된 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  $y=6\text{m}$ 인 단면에서의 편향각의 최대값은  $6.5^\circ$ 로 모든 위치에서 ISO 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

5.2 교차오염

Fig. 5는 Fig. 1(b)에 표시된 4곳(S1-S4)의 오염원에서 암모니아가 발생된 후 70초와 130초일 때의 전역교차오염분포를 보여준다. 오염농도분포를 측정된 위치는 클린룸 패널에서  $1.5\text{m}$  위 ( $x=8\text{m}$ )인 단면이다. 클린룸의 오염원들에서 발생

된 오염물질들은 기류를 따라 하부플레넘, 리턴덕트, 상부플레넘으로 확산된 뒤 약 60초 후부터 클린룸 내부를 다시 오염시키게 된다. Fig. 5는 2차 오염( $t=70\text{초}$ )과 3차 오염( $t=130\text{초}$ )을 일으켰을 때의 오염물질의 농도분포이다. 이때 오염원 S1과 S2는 프로세스 영역에서 오염이 발생한 경우이고 S3과 S4는 서비스 영역에서 오염이 발생한 경우이다.

Fig. 5의 (a)-(h)에서 보는 바와 같이 시간이 흐름에 따라 오염의 확산면적은 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 오염원이 S1인 경우, 2차 오염을 일으켰을 때에는  $y=7\text{m}$  이상의  $y$ 축 단면에서 광식각공정에서 Bases의 허용기준치( $8.0 \times 10^{-10}\text{kg/m}^3$ )를 초과하는 것으로 나타났고 3차 오염을 일으켰을 때에는 허용기준치를 초과하는 범위가 2차 오염 때와 비슷하나 허용기준치의 10배를 초과하는 농도의 범위는 2차 오염 때보다 확산된 것으로 나타났다. 오염원이 S2인 경우, 2차 오염은  $y=10.5\text{m}$  이하의 단면에서 허용기준치를 초과하는 것으로 나타났고 3차 오염이 발생한 시점에서는 허용기준치를 초과하는 범위가 클린룸 전체로 확산되는 것으로 나타났다. 오염원이 S3인 경우에는 2차 오염이 약  $y=8\text{m}$  이하의 단면까지만 확산되어 허

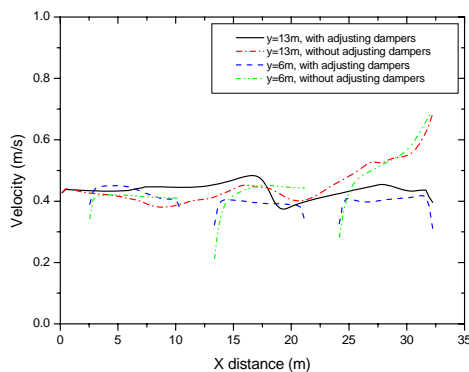


Fig. 3 Velocity distribution for x distance

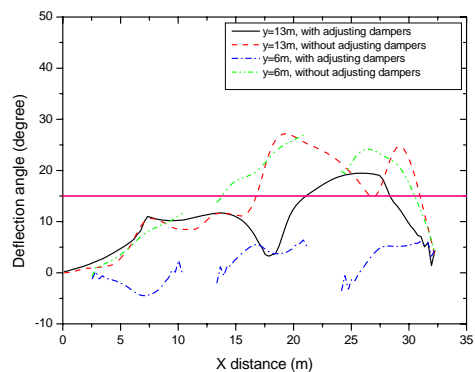


Fig. 4 Deflection angle for x distance

용기준치를 초과하는 것으로 나타났고 3차 오염이 발생한 시점에서는 오염원이 S2인 경우와 마찬가지로 Fig. 5(f)의 오른쪽 상부를 제외한 모든 위치에서 허용기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 오염원이 S4인 경우에는 2차 오염이 발생했을 때,  $y=7m$  이상의 단면에서 중앙과 우측만이 허용기준치를 초과하는 것으로 나타났고, 3차 오염 시에는 오염물질이 대부분 좌측으로만 이동하는 것으로 나타났다. 그리고 오염원의 위치가 S2와 S3인 경우 2차 오염이 발생했을 때, 그림의 좌측부분에 교차오염이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 상부플레넘의 좌측부분에서 기류의 2차

유동(secondary flow) 현상이 발생하여 이 부분에서 오염물질들이 y축 방향으로 활발하게 확산되기 때문이다.

이러한 결과들은 오염원의 위치에 따라 오염물질의 확산정도, 즉 전역교차오염의 분포특성이 크게 달라지는 것을 보여주는 것으로서 이는 기류분포뿐만 아니라 급·배기구, 프로세스 영역과 서비스 영역의 형태, FFU의 배치 등에 따른 클린룸 구조적 특성 때문인 것으로 판단된다. 따라서 클린룸을 분석할 때에는 기류분포에 대한 해석뿐만 아니라 오염확산분포에 대한 해석도 동시에 수행해야만 정확한 특성분석을 할 수 있을 것으

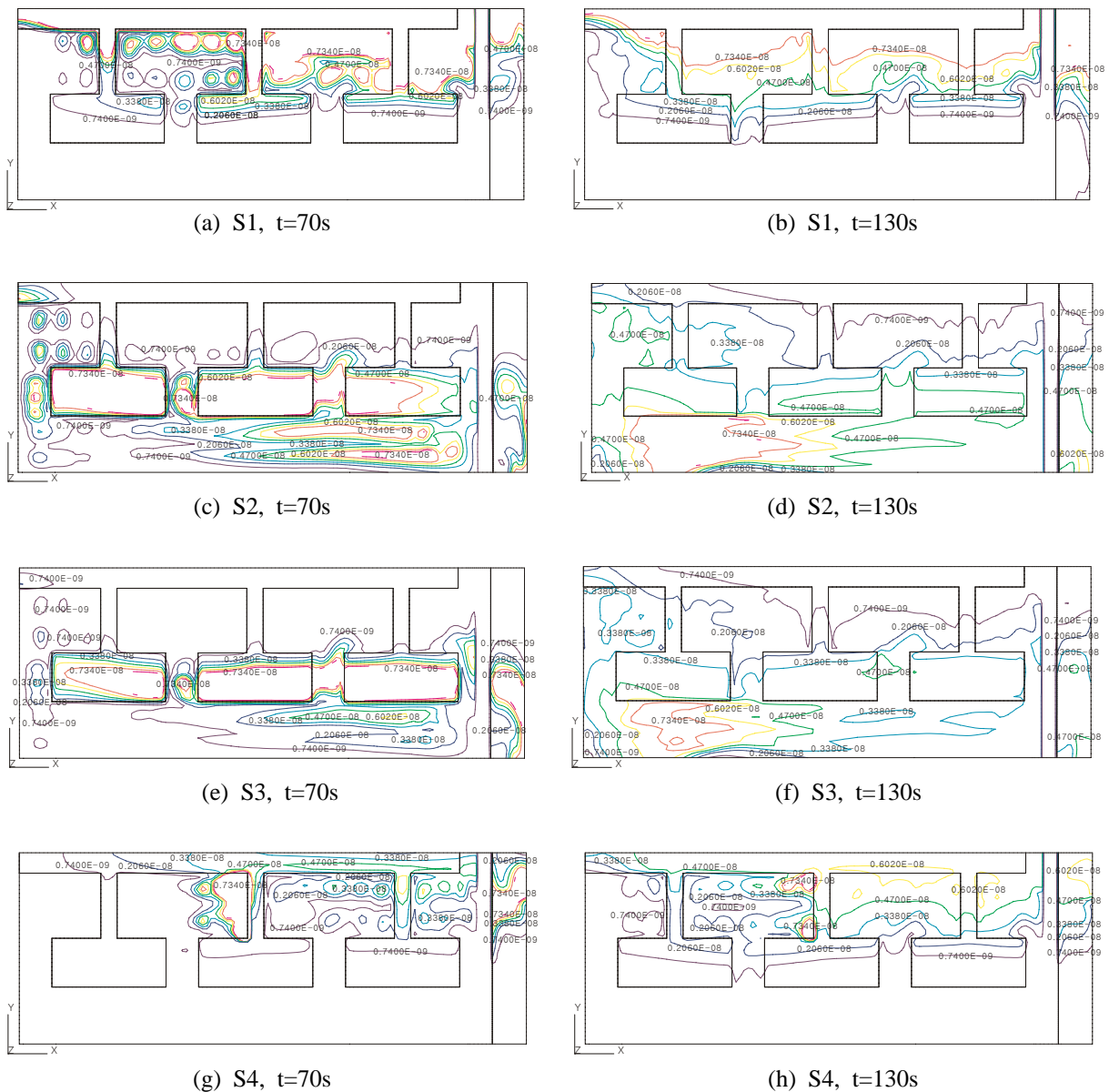


Fig. 5 Concentration distribution of  $NH_3$  for the location of source and the time in the cleanroom



로 판단된다.

그리고 Fig. 5에서 보는 바와 같이 오염원이 존재하는 위치에 상관없이 2차 오염이 발생하는 시점에서는 오염원이 위치하는 y축 단면 근처에서 가장 큰 농도분포를 보이고 있다. 이는 클린룸에서의 유동은 2차원적 특성이 커서 대부분의 유동이 x-z 좌표축에서 형성된다는 것을 의미한다. 그러나 내부기류의 순환이 반복되어 3차 오염이 발생하는 시점에서는 이러한 특성이 없어진다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 상부플레넘의 좌측부분에서 발생하는 2차 유동에 의한 영향이 크기 때문이다. 따라서 클린룸 시스템의 설계시에는 상부플레넘 구조에 대한 신중한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

광식각공정 클린룸을 3차원 모델로 하여 기류 및 교차오염에 대한 수치적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 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  $4.2m < y < 7.8m$ 인 y축 단면에서 최대  $6.5^\circ$ 로 ISO 기준치를 만족하였으나  $12.6m < y \leq 14.1m$ 인 y축 단면에서는 x가 20-28m인 지점에서 ISO 기준치를 초과하는 것으로 나타났고 이는 클린룸에서의 압력강하량에 의한 영향으로 판단된다.

(3) 오염원의 위치와 시간에 따라 오염물질의 전역교차오염의 분포특성이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있었고 이는 기류분포뿐만 아니라 클린룸 구조적 특성과 상부플레넘의 좌측에서 발생하는 2차 유동에 의한 영향 때문으로 판단된다.

## 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) Noh, K. C., Lee, S. C., 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.

(3) Yang, H. C., Oh, M. D., 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.  
 (4) Oh, M. D., Lee, C. S., 1987, Study on the Laminar and Turbulent Flow Sharing for the Particle Control in the Cleanroom, Proceedings of the SAREK 1987 Summer Annual Conference, pp. 47-54.  
 (5) 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.  
 (6) 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.  
 (7) Jancoski, C. A. and Sinclair, J. D., 1997, High Isolation Minienvironment for Process Involving Toxic Substances, Proceedings-Institute of Environmental Sciences, pp. 117-121.  
 (8) 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.  
 (9) ISO 14644-1, 1999, Cleanrooms and associated controlled environments-Part 1: Classification of air cleanliness, ISO, Geneva.  
 (10) Computational Dynamics Ltd., STAR-CD Version 3.15 User Manual, 2002, Computational Dynamics Ltd.  
 (11) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, DC.  
 (12) Pui, Y. H., 2000, Filter Pleating Designs, International Symposium on Air Cleaning Technology, Korea Air Cleaning Association, part 3, pp. 1-47.  
 (13) 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.  
 (14) 95052812A-TR, Forecast of Airborne Molecular Contamination Limits for the 0.25 Micron High Performance Logic Process, SEMATECH, 1995.