

## 클린룸 오염입자 및 기류제어기술

### Control Technology of Contamination Particles and Air Flow in Clean Room

오 명 도\*  
Myung Do Oh

#### 1. CR 부유입자의 생성 및 영향

일반적으로 가스중에 부유하는 고체나 액체 상태의 입자를 에어로졸(aerosol)이라 하는데 이러한 물질상태는 고체, 액체, 가스, 플라즈마에 이어 제 5의 물질상태라고 칭하기도 한다. 대개 에어로졸은 그 생성 메카니즘에 따라 여러 종류로 분류되고(표 1 참조), 크기는 0.002~100  $\mu\text{m}$  범위내에 있다. 표 2는 대표적인 입자들의 물리적 크기범위를 보여주고 있다. 대기중에 부유하는 입자들도 여러가지 생성원인에 따라 생성된 에어로졸의 집합체로서 대기과학자들인 Whitby와 Sverdrup<sup>1)</sup>은 대기 부유입자를 그 생성 특성과 크기에 따라서 그림 1과 같이 Nuclei 모드, Accumulation 모드, Coarse 모드의 세가지 종류의 크기 분포를 갖는 에어로졸로 분석하였다.

이와같은 대기 부유입자들은 급기 시스템과 필터링시스템을 통해서 클린룸(Clean Room; 이하 CR로 표기)내로 유입되어 실내의 입자분포에 영향을 끼치게 되는 배경농도가 되고<sup>2)</sup>, 또한 CR내에서도 외기와는 별도의 입자발생 메카니즘들이 있게 됨으로 이 세가지 모드들의 입자 크기분포의 특성이 CR내에서도 외기와 유사하게 존재한다(그림 2 참조).

따라서 CR내에 존재하는 각 모드에서의 입자발생 요인과 오염특성을 살펴보게 되면 제품생산에 장애를 가져오는 오염입자들을 효율적으로 제어하거나 제거할 수 있게 되어 오염입자들에 의한 생산 피해를 극소화할 수 있을 것이다.

#### 1.1 0.1 $\mu\text{m}$ 보다 작은 입자(Nuclei Mode Aerosols)

이러한 범위의 입자들은 증발, 응축현상이나 연소에 의해서 생성되는 것으로 CR내에서의 발생원은 노, 오븐, 히터 등의 뜨거운 표면, 회로판의 가열부분, 과열된 전기모터, 베어링, 실내조명장치, 현미경조명장치, 화염등이다. 그림 3은 반도체공장에서 가열공정 중 발생하는 오염입자의 입경별 농도변화를 보여주고 있다. CR내 가열공정은 휘발성이 강한 물질을 증기화하고 그 증발된 물질은 주위의 유동공기에 의해 냉각되어 응축하게 된다. 이때 주변공기는 증발되는 증기를 신속하게 희석시켜서 미소입자들의 결합현상(coagulation)을 억제하므로 이러한 과정으로 생성되는 입자는 쉽게 더 큰 입자로 성장될 수 없다. 거의 모든 입자들은 주위의 표면이나 HEPA 필터에 침착될때까지 0.1 $\mu\text{m}$ 보다 작은 크기를 갖

\* 정회원, 생산기술연구원 연구개발본부

표 1. 일반적인 입자생성의 발생요인과 발생메카니즘

Aerosol	Mechanism of Formation	Agents of Formation	Examples
dusts	dispersion of powder or disintegration of matter	nature, wind, human activity	pollen, sandstorm, road dust, fly ash
fog, mist, smoke	condensation from a gas or vapor, combustion	condensation, combustion	soot, smoke, fog, clouds, condensation nuclei, artificial aerosols
smog, haze	condensation of photochemical reaction products	sunlight	Smog, haze, condensation nuclei
mist, spray	atomization of a solution evaporation	atomization of a liquid	sea spary, salt nuclei, dust from humidifiers, road spray

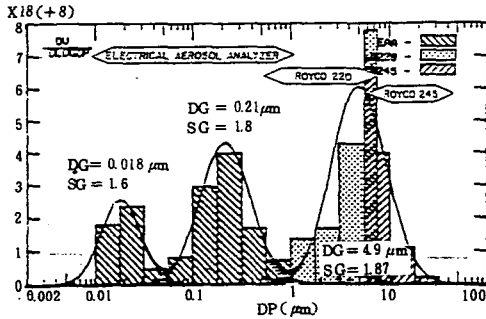


그림 1. 대기 부유입자의 Trimodal Volume 크기 분포

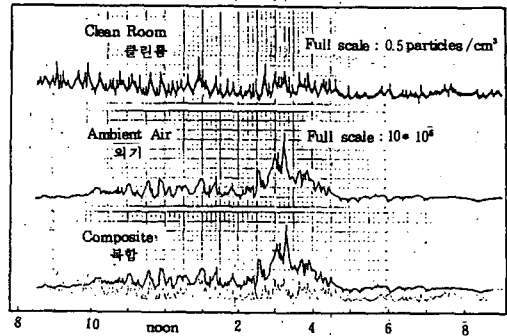


그림 2. 클린룸과 대기 부유입자의 응축핵 계수 측정치

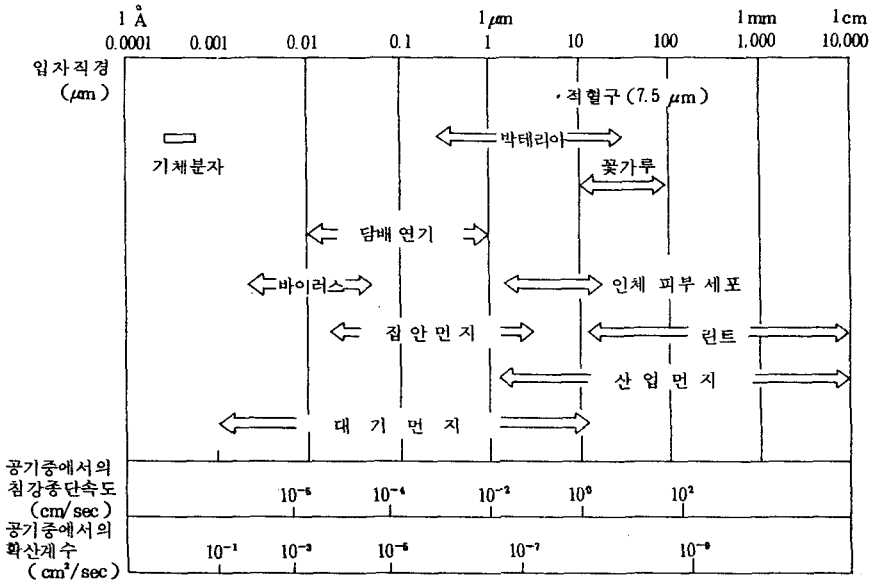
게 된다.

이러한 입자의 성분은 증발된 증기의 성분과 일치하며 그것들은 윤활오일, 신체분비오일, NaCl 등 실제로 가열된 물체의 표면온도에서 기화될 수 있는 모든 오염물질을 포함한다. 이러한 과정으로 생성되는 입자의 발생량은 매우 크기 때문에 그 입자 농도는 크기가 0.3 μm보다 큰 경우의 입자 농도보다 10 ~

1,000배 정도 크게 된다. 이 모우드의 입자들은 중력에 의해서 쉽게 침강되지 않고 브라운 확산운동에 의해서 이동하게 된다. 여기서 상기할 것은 이러한 입자를 생성하는 메카니즘은 추후 설명할 기계적 마모에 의해 생성되는 큰 입자들과는 보통 아무 관련이 없다.

따라서 오븐의 경우 작동중에는 0.1 μm 보다 작은 입자를 수없이 발생시키고 1 μm 보

표 2. 입자의 크기 범위와 특성물성치



다 큰 입자는 거의 발생치 않으나, 오븐의 문을 열고 로버트 팔로 오븐 속에 무엇인가를 넣게 될때는 수천개의 1μm보다 큰 입자들이 발생하게 된다. 이와같은 경우 제품생산에 영향을 주는 오염입자의 정체를 밝히기 위해서는 이 두가지 모우드의 입자를 다 측정할 수 있는 측정장비가 필요하게 된다.

이러한 모드의 입자들이 반도체 생산에 결함을 초래하는 경우는 다음과 같은 것들이 있다.<sup>3)</sup> 이러한 크기들의 입자농도는 상당히 높으므로 반도체 공정중 반도체칩의 중요부분에 여러입자가 침착되어진다. 반도체칩은 여러층(layers)으로 구성되는데 보통 각 층의 두께는 칩의 선폭(line width)보다 아주 작게되어 현재 그 두께가 0.02~0.04 μm인 것도 있다. 1990년도 이후에는 그 두께가 100 Å 보다 작아질 것으로 예측되고 따라서 이 층의 두께를 초과해서 파고들 수 있는 어떤 입자라도 칩의 결함을 가져올 수 있다.<sup>4)</sup> 이와같이 반도체칩의 층을 파고들거나 킨덕터 사이에 끼어서 생산결함을 초래하는 입자들 뿐만 아니라 입자들이 갖고 있는 화학성분에 의해서 그 입자들의 물리적 크기보다 훨씬 더 큰 영역의 칩을 오염시킬 수 있다. 예를들어 반도체칩 생

산에 상당히 큰 영향을 주는 NaCl을 생각하면 오븐 공정중에 0.02 μm정도의 크기를 갖는 수백만개의 NaCl 입자들이 증기화되어 그것들이 반도체칩에 결함을 가져올 수가 있다. 또한 0.05 μm정도 크기의 입자들은 칩생산의

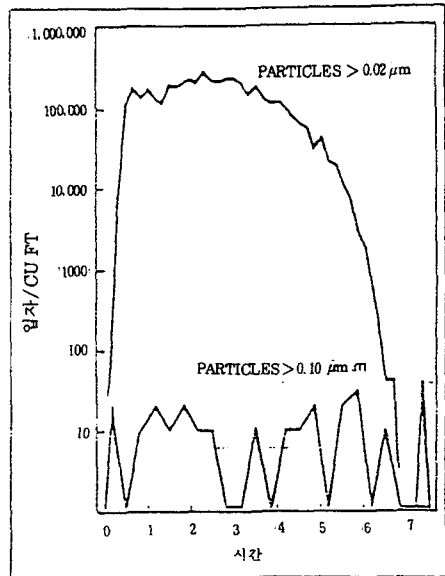


그림 3. 반도체 공장에서 확산노(diffusion furnace)가 700 °C~1,000 °C로 가열될때 발생하는 입자들의 입경별 농도

Photomasking 공정중에 작은 결함을 만들고 이어서 행해지는 Etching 공정중에 큰 형태로 성장하게 되어 결국은 반도체칩의 층을 침투하는 결함을 초래한다.

이와같이 반도체 생산에 치명적인 결함을 초래할 수 있는 이러한 Nuclei 모드의 입자들을 측정할 수 있는 기기는 응축핵계수기(Condensation Nucleus Counter)뿐이다. 이와같은 응축핵계수기는 대기중 저농도의 입자측정을 위해서 10여년전에 개발되었고 최근 수년간 많은 반도체용 CR에서 사용되어지고 있다.<sup>5)</sup> 그러나 거의 모든 응축핵계수기가 저농도의 입자측정용이나 최근에 기존의 것보다 더 높은 입자농도를 측정할 수 있는, 다시 말하면 더 큰 샘플량을 갖는 응축핵계수기가 개발되었다.<sup>6)</sup>

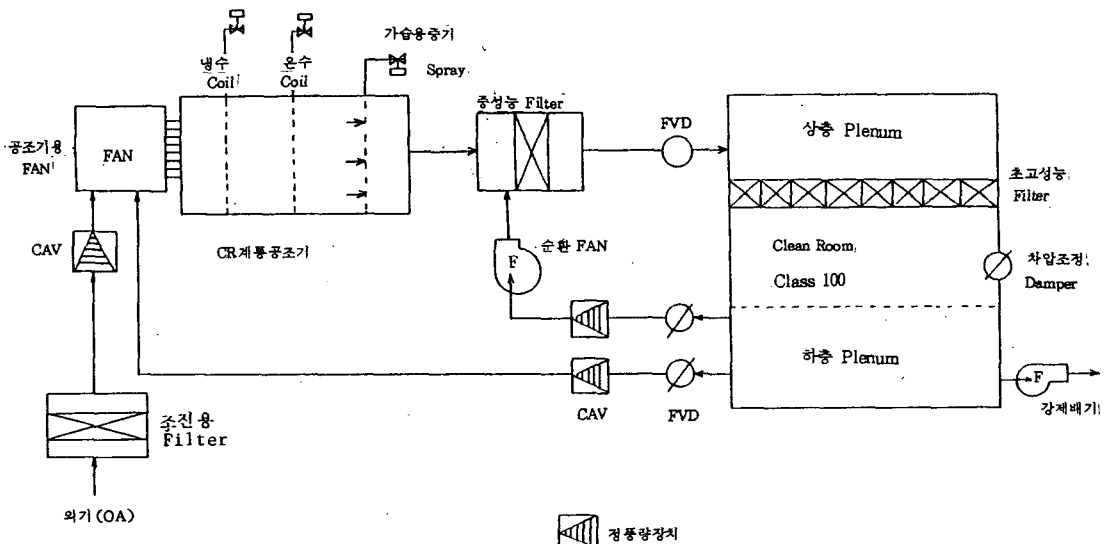
1.2 0.1~1.0 μm 크기범위의 입자(Accumulation Mode Aerosols)

보통 처음 생성되는 에어로졸 입자들은 앞서 설명한 Nuclei 모드 범위에 속한 것이 대부분이나 이렇게 작은 입자들은 주변공간의 습분에 의한 응축현상(condensation)이나 결

합현상(coagulation)에 의해서 더 큰 크기의 입자로 성장하게 된다. 이와같이 Nuclei 모드에서 Accumulation 모드로 성장하는 입자들의 양은 주변공간의 습도와 입자농도에 직접적인 영향을 받게 된다. 그러나 실제 CR내에서는 입자와 습분의 농도가 낮으므로 응축과 결합 현상이 Accumulation 모드 입자의 주된 메카니즘이 되기 어렵고 그보다는 다른 요인에 의한 것으로 생각된다.

대체로 CR내에 이러한 범위의 입자들이 존재하게 되는것은 다음의 두가지 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 분석된다.

첫째로 CR에서는 실내오염을 제거하기 위해서 실내의 공기를 환기하여 재순환하게 되는데 이때 실내공기는 100% 재순환되는 것이 아니라 외부로부터 보충되는 유입공기와 합쳐지게 된다(그림 4 참조). 이때 유입되는 외부 보충공기는 상당히 높은 농도의 Accumulation 모드 입자를 포함하므로 이 배경입자농도가 CR 실내농도에 영향을 주게 된다. 둘째로 HEPA나 ULPA필터에서 그 투과성능을 살펴보면 이러한 범위의 입자크기에서 필터를 투과하는 양이 극대화됨을 보여주고 있



- 전용공조기를 가지는 단일 Duct 방식
- 공조기용 FAN과 순환 FAN은 병렬연결

그림 4. 클린룸에서의 전형적인 공조시스템 구성도

다(그림 5 참조). 따라서 아직 확실히 밝혀진 것은 아니지만 CR에서의 Accumulation 모드 입자들의 주된 생성요인은 외부 보충공기 중에 포함된 관련입자들의 높은 배경농도가 필터를 통과해서 들어오는 것으로 판단되어진다. 따라서 이러한 크기의 입자들이 반도체칩 생산에 결함을 가져오게 된다. 이와같이 에어로졸이 Pattern 상에 부착하는 Pattern 결함에 의해서 배선사이의 단락이나 단선 또는 배선의 가늘어짐에 의한 저항증가가 일어나며, 성막공정에서 기판에 미립자가 부착된채로 처리 되면 막을 형성하지 않는 부분이 생겨서 특성이 열화되며, Epitaxial 성장에서의 적층결함, 이상돌기, 산화막상의 핀홀(pin hole) 등이 발생하는 원인이 된다.

이러한 모드의 입자측정에는 주로 응축핵계수기(CNC), 광학입자계수기(OPC), 레이저 입자계수기(LPC) 등이 사용되는데 이 중에서 CR내의 연속측정을 위해서 가장 효과적이며 경제적인 입자계수기들이 선택되어야 한다.

### 1.3 1 μm 보다 큰 입자(Coarse Mode Aerosols)

이런 크기의 입자들이 생성되는 주된 물리적인 메카니즘은 기계적인 마모에 의한 것이다. 이러한 메카니즘에 의해서 아주 크기가 작은 입자가 생성되기 위해서는 막대한 양의 기계적 에너지가 필요하므로 대기중 Sub-Micron 입자의 생성에는 거의 관련이 없다고 하겠다.

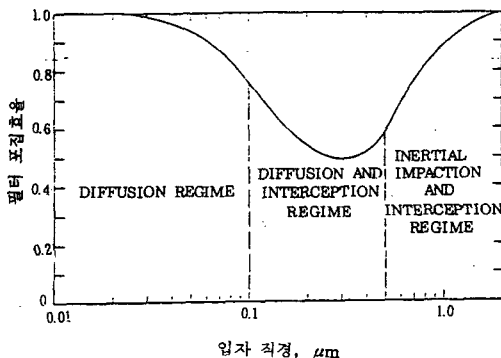


그림 5. 입자크기에 따른 필터의 포집효율

표 3. 작업자의 동작에 의해 분당 발생하는 0.3 μm 이상의 입자수

동 작	입자발생수	동작의 설명
	100,000	서있거나 앉은 자세에서 정지상태
	500,000	손, 팔, 머리를 움직인다.
	1,000,000	손, 팔, 상반신 및 하체를 움직인다.
	2,500,000	앉은자세에서 선자세 또는 선자세에서 앉은자세로 움직인다.
	5,000,000 7,500,000 10,000,000	매시 3.2km로 걷는다. 매시 5.6km로 걷는다. 매시 8.05km로 걷는다.

표 4. Class 100 반도체 클린룸에서 Photoresist 공정중 발생한 오염입자의 종류

오 염 원	%
HUMAN	46
DUST-FREE GARMENTS	8
CLEANING MATERIALS	4
PHOTORESIST PIECES	12
SILICON, UARTZ	22
OTHER	8
	100

OPTICAL MICROSCOPY  
LIMIT OF >1 μm

(1982 MITSUBISHI ELECTRIC CO.)

이 범위에 있는 입자들의 성분구성은 그 입자들이 생겨난 모체의 성분과 동일하다.

CR내에서 이러한 크기의 입자발생원은 사람, 기계베어링, 기계진동, 로버트 등이 있으며 그 성분은 사람 표피, 옷감, 화장품, 머리카락, 비듬, 종이, 금속, 광물질, 소금, 유기물질, 필터조각, 나무조각, 그 밖에 사람에 의해서 수반되는 모든 것이 될 수 있다. 표 3은 작업자의 동작에 의해서 분당 발생하는 입

자의 발생수를 나타내고 있다. 표 4는 실제 Class 100 CR 반도체 공장에서 Photoresist 공정중에 분석한 오염입자들의 종류를 나타내고 있다. 이러한 Coarse 모드 입자들은 중력에 의해서 쉽게 침강하나 사람, 로버트, 콘베이어, 장치 등의 움직임과 난류유동에 의해서 CR내에 부유하게 된다. 이러한 입자들이 반도체칩의 컨덕터 사이 공간에 끼게되면 브리지(bridge)를 형성하여 제품의 고장을 가져오고 또한 칩의 층을 수직으로 파고들어 문제를 야기하게 된다. 어떤 경우에 NaCl 입자들은 반도체칩 물질과 화학적으로 작용하여 칩생산 기기를 부식하게 된다.

HEPA나 ULPA필터를 사용하면 이 범위의 거의 모든 입자를 제거할 수 있지만 생산 공정중에 생긴 오염입자들은 작업자의 보행이나 순환기류 중의 방해물 등으로 발생하는 난류 Eddy로 인하여 환기되는 공기와 함께 신속하게 클린룸 밖으로 배출되어 필터에서 제거되지 않고 수평방향이나 수직방향으로 움직여서 중요기기를 오염시키게 된다.

또한 이러한 크기의 입자들이 플로피 디스크나 하드 디스크의 헤드사이에 끼게되면 스크래치를 가져와서 수록된 정보를 파괴하거나 Head-Crash의 요인이 되기도 한다.  $0.5\mu\text{m}$ 보다 큰 입자들은 거의 모든 광학입자계수기들로 측정이 가능하다.

## 2. CR 기류제어와 부유입자의 오염특성

CR에서의 입자농도는 대개 두가지 성분으로 구성되어 있다. 하나는 정상운전 상태에서의 거의 일정한 수준의 배경입자농도와 또다른 하나는 CR안의 어느 지점에서 갑자기 발진하게 되어 형성되는 입자농도이다. CR의 특정 청정도는 주로 전자의 배경입자 농도에 의해서 결정되어지는데 이때의 배경농도는 CR내의 어느 특정한 위치에서 전체 운전시간의 95~99.5%의 시간동안에 유지되는 농도를 말한다. CR에서 급작스럽게 발진이 일어날 때는 그 발진시간이 1~10초 정도의 짧은 시간이지만 이러한 발생입자들의 영향권내에 있는

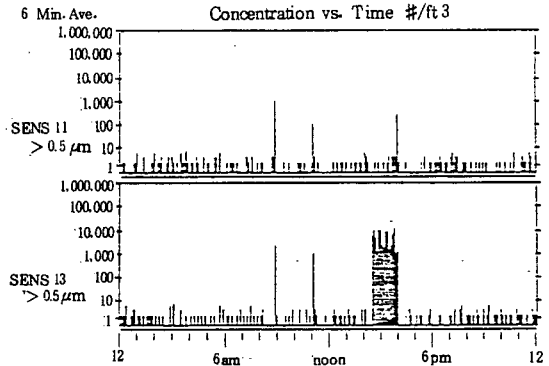


그림 6. 클린룸내에서 정상적인 상태의 배경 입자 농도와 순간적으로 발진한 입자에 의한 입자농도의 변화

어느 한 지점에서의 입자농도는 청정도 10의 초청정 CR이라 할찌라도 단위 입방피트당 수천~수만개에 이르게 된다(그림 6 참조).

이와같이 CR내의 특정장소에서 발진이 있게 되거나 상방 HEPA 필터에 흡이생겨 leak가 있게 되면 수직층류형(VLF) CR인 경우 수직방향의 기류유동에 의해서 하방으로 확산하며 흘러나가게 된다. 이때 오염입자의 확산은 다른 요인이 없으면 유동대류에 의해서 지배를 받게 되므로 콘도양을 형성하게 된다. CR에서 이와같은 상황이 일어날때 비교적 좁은 영역만을 오염시키며 빠져나가게 하기위해서 기류제어가 필요하며, 이것이 CR내의 기류유동이 수직방향으로 평행성을 유지해야 하는 이유이기도 하다. 미국연방기준 209 D<sup>7)</sup>에서는 이러한 확산각을 14도 이내로 제한하고 있으나 일본의 일부 반도체 CR설계에서는 이 확산각을 35도까지 허용하고 있다고 한다. 만약 이러한 발진이 있을때 오염입자의 확산영역내에서 제품생산 공정이 이루어지면 오염을 피할 수 없게 될 것이다. 이러한 오염패턴은 실내에서 수직하방 유동기류를 교란하여 난류화하는 요인이 존재하게 되면 쉽게 파괴되어, 제한적인 오염영역의 입자들이 상대적인 잔존시간이 길게되고 확산에 의해서 그 오염영역을 확장하게 된다. 따라서 CR에서 신선공기가 유입될 때 필터를 통과한 공기의 청정도는 Class 1이라 할찌라도 앞서 언급한 여러 요

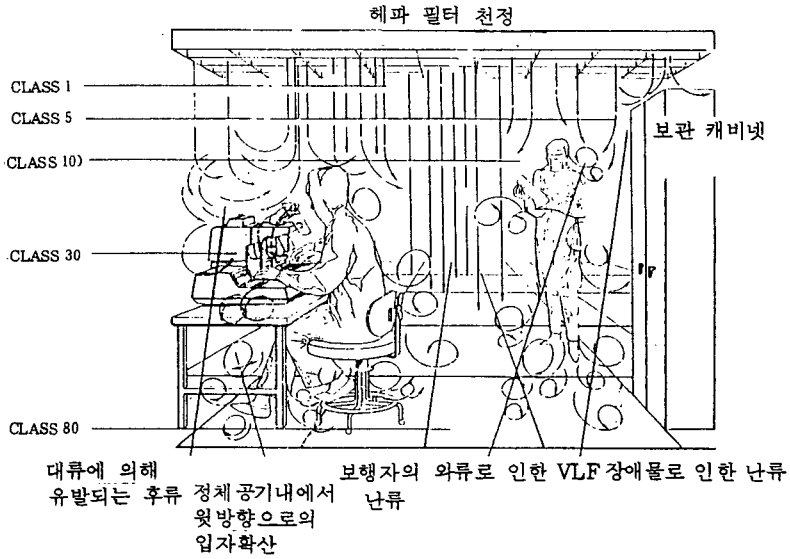


그림 7. VLF 형 클린룸에서의 동적인 청정도의 변화

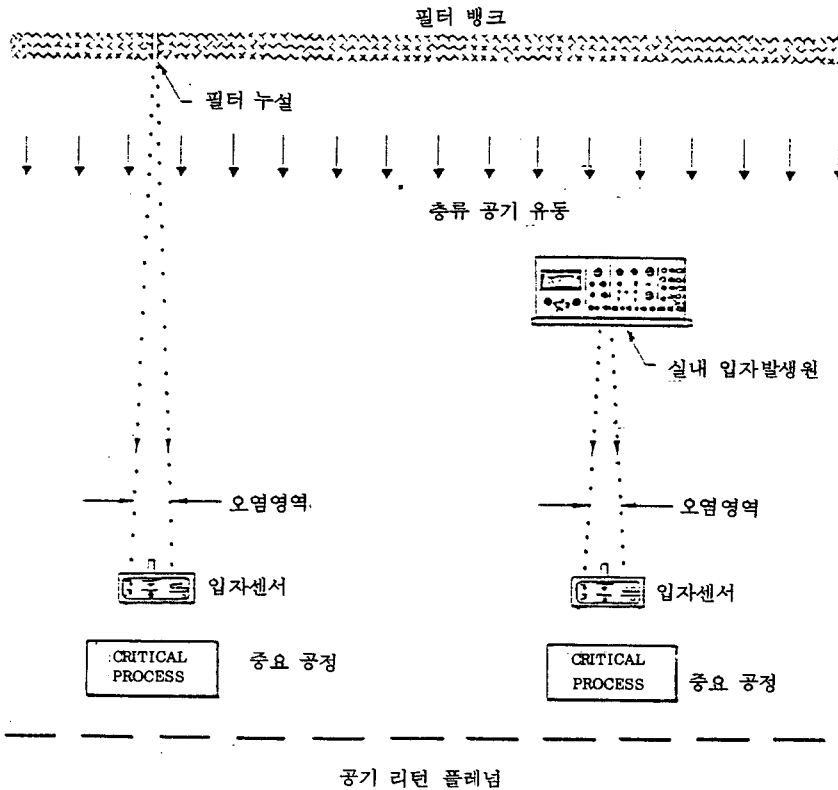


그림 8. 클린룸내에서 발생한 오염입자의 확산 거동

인들로 인하여 오염되어 Class 100 상태로 CR을 빠져나가게 된다(그림 7 참조).

예를들어 생산의 중요공정중에 사람이 걸어 간다면 이미 언급한 바와 같이 그 사람이 움직이는 방향의 뒤쪽으로 난류 와류영역(turbulent wake region)을 형성하여 사람으로부터 발생된 수천~수만개의 오염입자들이 이 영역에서 여러 방향으로 분산된다. 이렇게 하여 생산공정영역으로 분산된 오염입자는 CR내의 수직방향의 기류유동에 의해 신속하게 공정중인 생산제품을 오염하게 된다. 이 모든 오염과정은 불과 1~2초 사이에 일어나는 짧은 것이지만 이 시간은 생산제품을 오염시키는 데는 충분히 긴 시간이다. 이와같은 발전현상은 작업중인 로버트암에서 일어날 수 있다. 또한 구동중인 콘베이어 베어링에서는 오일증기입자가 발전하고 특정한 작동중에 과열된 파우어 트랜지스터에서는 NaCl 증기가 발생될 수 있다.

실제로 이러한 CR내의 국부발진에 의한 오염과정과 그 확산과정을 검출하기 위해서는 발전가능성이 높은 모든 장소의 바로 하방에 적절한 계측기기를 선정하여 배치하고 짧은시간의 국부발진을 측정할 수 있는 충분히 작은 샘플링 시간으로 연속적인 측정을 해야 한다(그림 8 참조). 모든 측정 데이터의 출력은 일정한 시간간격으로 통계화되어 처리됨으로 정확한 발전시간을 확인하기 위해서는 그 시간간격을 필요에 맞게 조절해야 한다. 실제 반도체 공장에서는 주로 경제적인 이유로 이와같은 많은 지점에서의 연속 측정방법에 어려움이 존재한다. 그러나 최근에는 다점(multi-point) 측정시스템이 개발되어 하나의 측정장비로 여러 지점의 오염상태를 연속적으로 측정할 수 있다.

앞서 검토한 바와 같이 CR에서 방안전체의 기류를 평행하게 제어하여 방안전체의 오염정도를 낮출 수는 있지만 실제 생산이 이루어질때 정말로 오염제어가 필요한 국소공간을 어떠한 외란이 있더라도 무진 상태로 유지하는 것이 중요하므로 기류 및 오염 제어의 개념도 전통적 발상의 CR에서 국소적인 청정장

치의 개념으로 전환되고 있다. 따라서 반도체 생산공정에서 오염피해 대상의 최소 단위인 웨이퍼(wafer)가 오염되는 과정을 체계적으로 고찰하는 것은 매우 중요하다. 웨이퍼가 오염되는 것은, 첫째로 공정가스나 액체가 직접 웨이퍼와 접촉하여 그 속의 오염입자가 제품을 오염하는 경우로 그림 9와 같이 오염입자의 양이 엄청나므로 그 오염으로 인한 피해가 크다. 이러한 오염은 불가피한 것이며 공정가스나 액체 중의 오염입자를 최대한 제거하는 이외에는 방법이 없다. 이와같이 가스상이나 액체상 잔존하는 오염입자 제거를 위한 필터링 기술이 급속도로 발전하고 있으므로 국내 산업계에서도 이를 위한 적극적인 기술개발이 필요하다. 이와함께 외국에서는 공정에 필요한 고순도 가스나 액체, 순수 등을 오염없이 저장하고 오염없는 배관계를 통해서 공급하는 기술이 활발히 적용되고 있다. 따라서 제작공정중 반응에 의해서 발생하는 입자를 제외하고는 효과적인 제어가 가능할 것으로 보인다.

다음으로는 웨이퍼가 공기중의 부유입자에 의해 오염이 되는 경우를 생각할 수 있는데 정상상태에서의 오염과 비정상상태의 오염으로 구분할 수 있다. 정상상태에서의 입자에 의

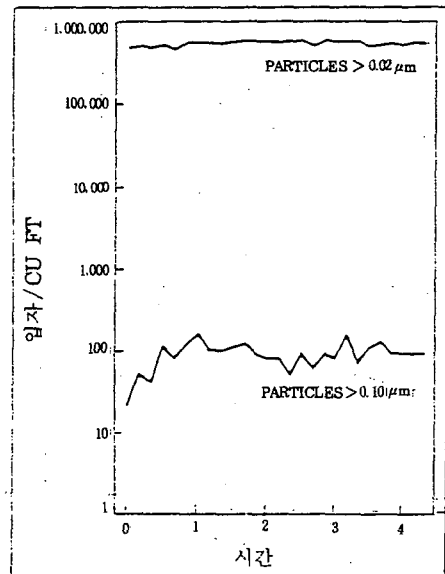


그림 9. 유틸리티 배관 시스템에서의 입자 발생에 의한 입자농도의 변화

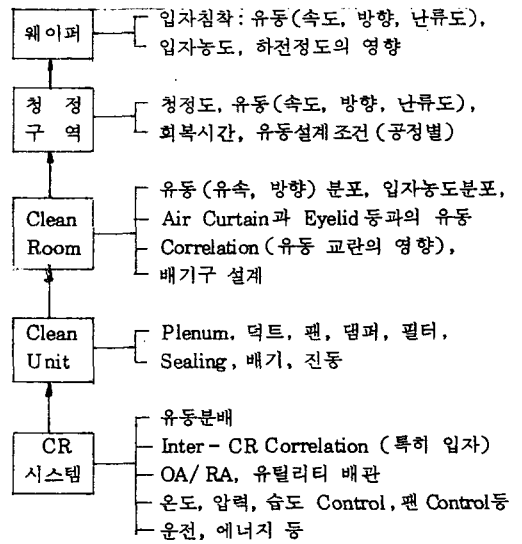


한 오염속도는 제품주위의 공기중 입자농도, 유동의 속도와 방향, 유동중의 난류성분, 전기하전도 등에 의해 결정되며, 여기서 제품주위의 입자농도는 필터 직하방의 배경농도와 CR 내의 발전입자 오염원의 분포 및 발생량과 이들 오염원으로부터 청정구역까지의 확산류에 의해 결정된다. 오염원으로부터 청정구역까지의 전파율은 다시 CR내의 유동의 속도와 방향, Large Scale 유동형태, 그리고 난류세기에 의해서 결정된다. 다음으로 CR내의 입자농도나 기류유동이 어떠한 이유로 정상상태에서 교란되어 비정상상태가 될 때에는 이에 대한 청정구역의 저항도(resistance)와 회복속도(recovery speed)가 문제된다. 이때의 저항도는 유동의 속도와 방향에 의해 좌우되고 회복속도는 평균 풍속과 난류도에 의해 결정된다. 결론적으로 현재의 필터 기술을 가지고 외기의 일정량을 계속 이용하는 환기시스템을 가진 CR에서는 생산의 완전자동화가 이루어지더라도 생산 자동설비 자체로부터 입자발생이 있게 되므로 CR내의 전체적인 유동분석뿐 아니라 국부적인 곳에서의 유동장의 모양, 속도, 방향, 난류도의 정확한 분석과 그에 따른 제어를 통한 입자 오염속도의 저하가 필수적이다.

이러한 관점에서 이제까지 CR이라고 불리우던 하나의 단일화된 작업공간을 제품의 생산에 미치는 영향정도에 따라 표 5 와 같이 구분해볼 수 있고, 이때 각 구역별로 고려해야 할 주요요소들도 함께 요약하였다. 따라서 각 구역별로 설계를 최적화하기 위하여 그 윗 구역과의 Correlation 을 얻는것이 중요하며 이것은 주로 열유체학적인 현상의 고찰에서 얻어진다.

앞으로 반도체칩의 집적도가 증가함에 따라 입자의 제한크기가 대기중의 최대농도인 0.07 μm에 접근하면서 제어해야 할 입자의 농도는 증가하고 확산에 의한 침착속도가 증가하게 되어 오염입자제어에 불리하게 작용한다. 포집 효율이 매우 높은 필터 여재(media)가 개발되면 이 문제를 일차적으로 해결할 수 있지만 새로운 필터 여재의 개발은 많은 시간

표 5. 클린룸 시스템에서 각 구역별로 고려해야 할 주요 요소



이 걸리는 반면 반도체 집적도의 상승속도는 매우 빨라서 실제로 16 M DRAM이 생산되기까지 2~3년이 예상되는 반면에 입자 투과율을 현재의 1/100 이하로 감소시킬 필터 여재의 개발이 그 기간내에 실현될 가능성은 희박하다. 또한 현재 반도체 수율에 영향을 미치는 요인이 지금까지 전통적으로 중요시하였던 클린룸 전체의 청정도나 인체로부터의 발전요인에서 언급한 국소청정 개념으로 전환되고 있으므로 오염제어의 대상도 점차 자동화 무인화에 따른 공정 장비가 가장 큰 연구대상이 되고있다(표 6 참조).

따라서 필터의 기술수준이 현재와 비슷한 수준에 머무른다고 가정할 때 고집적화 되어가는 칩의 성공적인 개발을 위해서 실내발전

표 6. 반도체 공장에서 문제가 되는 오염입자의 발생원 변화

오염 원 / 년도	1980	1985	1990
클린룸 일반환경	40 %	20 %	10 %
프로세스 장비	10 %	30 %	40 %
프로세스 재료	10 %	20 %	40 %
클린룸 작업자	40 %	30 %	10 %

표 7. IC Fabrication 공정별 오염입자 발생원

Flow Distribution	Filters, Valves, Seals, Welds, Mass Flow Controllers, Pressure Regulators.
Photolithography	Loaders/Handlers, Resist Spinners, Chemicals, Pumps, Spin Dryers. Particles on photomask prior to development may create pinholes or islands.
Ion Implantation	Loaders/Handlers, Vacuum Vent Cycles, Beam induced Sputtering. Resist chips may block implants.
Chemical Vapor Deposition	Loaders/Handlers, Quartz Tube, Gas-Phase Reactions, Spalling from Reactor Chamber Walls, Vacuum Cycles. Particles may form breaks or shorts in poly-silicon interconnects. Holes in passivation layers due to particles may cause premature device failure.
Sputtering, Evaporation	Loaders/Handlers, Spalling from Reactor Chamber Walls, Vacuum Cycles. Particles may form breaks or shorts in metal interconnects.
Epitaxy	Loaders/Handlers, Quartz Reaction Chamber, Gas-Phase Reactions. Stacking faults or spikes may form due to particles.
Diffusion	Loaders/Handlers, Quartz Diffusion Tube. Particles may inhibit or enhance the doping process.
Oxidation	Loaders/Handlers, Quartz Diffusion Tube. Particles are considered the leading cause of gate oxide failure.

량의 감소와 웨이퍼 주위의 국부적 청정도 증가라는 두가지 목표를 병행하여 추구해야 할 것이다. 실내발전량의 감소를 위하여 생산 자동화를 통한 작업인원의 감소, 저발전기기의 이용 및 궁극적으로 로버트를 이용한 무인화 공정 등이 추진되고 있으나 이 경우에도 발전량을 0으로 만들 수는 없으므로 생산기거나 로버트 주위의 유동상태에 따라 오염도가 크게 영향을 받는다. 유동의 제어를 통한 국부적 청정도 증가는 CR 발전 초기의 VLF형 CR에 적용된 CT(Clean Tunnel)의 도입이 시초라 할 수 있으며, 이에서 한걸음 더 나아가 클린 튜브, 클린 후드 등을 이용한 것들로

모두 이 범주에 속한다고 할 수 있고 SMIF 등의 특수 Interface를 이용하여 CR내 공기와의 접촉시간을 최소화한 것 등도 같은 맥락에 속한다.<sup>8)</sup> 어느 경우를 막론하고 생산기기 또는 그 부속장치 주위의 유동해석과 유동상태에 따른 오염모델의 개발이 시급히 요구되고 있다. 앞으로 CR내의 유동은 갈수록 엄격히 제어되어야 하며 앞서 언급한 바와 같이 궁극적으로는 CR내의 각 위치에서의 유동속도, 방향, 온도 및 난류도 등의 제어가 목표가 될 것이다. 이것을 위해서 일차적으로 로버트나 생산기기 주위의 유동과 오염해석, CT 설계 및 성능개선을 위한 유동분석, 기기의 발

표 8. Contamination Control 에 요구되는 연구 과제 (IBM's T. J. Watson Research Center, 1987)

1. 액체내에서의 0.01 $\mu\text{m}$  이하 입자의 농도와 크기 분포 측정 방법
2. 표면에서의 0.01 $\mu\text{m}$  이상 입자의 탐지방법
3. Wet Cleaning 원리 개발 및 응용
4. 가스에서 0.01 $\mu\text{m}$  이상의 입자 측정방법 개선
5. 부유입자에서 Magnetic 또는 Non-magnetic 입자를 구분하는 기기 개발
6. 표면의 입자부착 현상 이해 및 그 응용
7. 표면입자오염 및 부유입자오염 측정 기기들의 순쉬운 Calibration 방법 개발
8. 표면에서의 입자 침착을 순간적으로 측정할 수 있는 방법 개발
9. 교체, 액체, 기체등을 오염없이 용기에 저장하는 방법 개발
10. Microchemical 기술을 이용한 Contamination Source 측정법 개발 (Source-Receptor Modelling)

열효과, 기기배치의 최적화, 기기에의 Loading/Unloading 의 최적화, Lithography 공정 중의 유동과 오염분석, 유동 교란 모델, 유동 회복모델 개발 등에 관한 연구가 당면한 해결 과제이다.

표 7은 현재 IC Fabrication 각 공정에 따라 문제가 되고있는 오염입자의 발생원을 분석한 것이다.<sup>9)</sup> 표 8은 미국 IBM사에서 자체 생산공장에서의 Contamination Control 을 위해 도출한 중요한 연구과제들을 열거한 것이다. 다음의 내용은 이러한 국소오염입자의 발전과 관련되어 CR의 오염입자에 대한 동적 특성을 정성적으로 분석하기 위한 본 연구팀이 개발한 컴퓨터 시뮬레이션 기법의 한 예를 보여주고 있다. 현 단계에서 실험적 방법이 기술적 어려움이 있고 비용면에서도 경제성이 없기 때문에 수치해석적인 방법을 통한 오염입자 전파과정을 예측하는 기술을 개발하여 CR 설계 및 성능평가에 활용하려는 노력이 미국이나 일본에서도 활발히 진행되고 있다.

### 3. CR내의 공기유동과 오염입자의 확산 해석

클린룸내의 공기유동은 입자오염이 문제가

되는 생산공정이 이루어지는 작업구역에서 필요한 청정도를 확보하는데 중요한 역할을 한다. 대부분의 오염입자가 클린룸 내부에서 발생하므로, 제품의 제조과정에 영향을 미치기 전에 이러한 오염입자를 가능한 한 빨리 제거하여야 한다. 그러나 클린룸내의 기계와 장비가 설치된 후에는 클린룸의 내부구조가 복잡해져서 클린룸 내부의 공기유동을 파악하는 것은 쉽지 않다. 이와같이 복잡한 공기유동을 정확히 파악하기 위해서는 실물크기의 클린룸에서 실험을 수행하여야 한다. 그렇지만 실물 크기의 클린룸에서의 실험에는 많은 비용이 들고 시간이 오래 걸리기 때문에 클린룸 설계변경에 따라 매번 행하기가 어렵다. 따라서 클린룸 설계변화에 따른 공기유동을 예측하고 작업자의 활동이나 생산기기의 가동으로 인해 발생하는 오염입자의 확산거동을 예측 분석하기 위해서 수치해석기법이 많이 사용되고 있다. 클린룸내의 오염입자 거동은 공기유동에 많은 영향을 받기 때문에 공기유동의 제어는 오염입자 제어의 가장 기본적인 수단이 된다.

클린룸 설계에 있어서 와동이 있는 교란구역은 공기유동의 제어로 최소화시켜야 한다. 왜냐하면, 이러한 재순환 유동은 오염입자를 클린룸 내부에 축적시키고 무질서하게 오염입자를 확산시키기 때문이다. 그러나 공기유동의 형태는 오염입자의 확산형태와 꼭 일치하지는 않으므로, 공기유동 뿐만 아니라 입자 확산에 대한 모델도 유동장내의 입자확산 형태를 분석하기 위하여 필요하다. 또한 더욱 효과적으로 공기유동을 제어할 수 있는 방법에 대한 연구도 클린룸의 운전비 절감을 위해서 필요하다. 따라서 공기유동과 그에 따른 입자 운동에 대한 실험적, 수치해석적 연구가 세계적으로 활발하게 수행되고 있다. 여기서는 클린룸내의 공기유동장에서 오염입자 확산에 관한 최근의 수치해석적 연구경향을 국내의 연구팀이 수행한 연구결과를 중심으로 소개하고자 한다.

#### 3.1 2차원 유동장의 해석

요구되는 클린룸의 청정도는 생산공정이나

제품에 영향을 미치는 오염입자의 허용정도에 따라 달라진다. 일반적으로 반도체 산업과 같은 첨단산업에는 수직층류방향이냐 클린터널식 클린룸을 많이 사용하여 왔으며, 최근에는 Open Bay 방식 클린룸도 사용되고 있다. 이러한 클린룸의 청정공간은 실제로는 3차원이지만 2차원특성이 강하게 나타나므로, 많은 수치해석적 연구가 2차원 가정하에서 행해지고 있는데, 2차원 수치해석은 3차원 수치해석보다 경제적인 면에서 유리하다. 클린룸내에서는 유동의 재순환 영역이나 정체영역의 작업대, 장비, 작업자 등으로 인해 생기게 된다. 이러한 유동의 재순환 영역이나 정체영역은 순환 기류를 따라 배출되어야 할 오염입자를 그 영역안에 가두어 두는 역할을 하게 되고 그러한 입자는 주위의 유동상황 변화에 따라 임의로 이동하게 되어 청정영역을 오염하게 된다. 따라서 이러한 유동영역을 감소시킴으로써 클린룸의 입자제어 효율을 극대화시킬 수 있는 클린룸 설계에 대한 수치해석적 연구가 작업대의 형상과 위치, 격막(eyelid)의 유무와 같은 클린룸의 내부구조의 변화를 고려하여 수행되고, 또한 막대한 클린룸 운전비용을 절감하기 위해서 0.5 m/s의 정격 풍속을 감소시켜 가며 유동장의 변화를 예측하는 시뮬레이션 기법이 시행되고 있다.<sup>10, 11, 12, 13)</sup>

공기유동의 특성과 그에 따른 입자의 확산 특성을 살펴보기 위한 클린룸내의 유동장은 보통 난류로 취급된다. 이러한 유동장을 특징짓는 타원형 편미분 방정식은 일반적으로  $k-\epsilon$  모델과 같은 2방정식 난류모델이 많이 사용된다. 고체벽면 근처나 난류 경계층 근처는 국소 난류 레이놀즈수가 작아서 난류효과보다는 점성효과가 크기 때문에  $k-\epsilon$  난류모델이 타당하지 않으므로 수정이 필요하다. 보통 난류유동의 수치계산에 있어서는 이러한 문제점의 해결방법으로 벽법칙(wall function method)이나 낮은 레이놀즈수 영역까지 사용할 수 있는 난류모델(low Reynolds number turbulent model)이 주로 사용되고 있다. 벽법칙은 주로 단순한 모양에 사용되어지는데 낮은 레이놀즈수까지 사용할 수 있는 난류모델에 비해

계산시간 및 컴퓨터 기억용량이 적게 들며 특별한 경우에 실험적 정보를 추가로 도입할 수 있다. 반면에 낮은 레이놀즈수까지 사용할 수 있는 난류모델은 복잡한 형상의 묘사에 따른 프로그램의 수정이 용이하다. 그림 10은 표 9와 같이 수정된  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하여 계산된 클린터널방식 클린룸에서 작업대의 위치변화에 따른 정상상태의 난류유동의 변화를 나타낸 것이다.<sup>13)</sup>

### 3.2 2차원 정상상태의 농도장 해석

클린룸내 공기유동의 형태는 부유입자의 이동형태와 다르므로 공기유동만의 해석으로는 오염입자 제어에 대한 상세한 정보를 얻을 수 없다. 그리고 클린룸 내부에서 발생한 오염은 복잡한 공정과 여러가지 장비에 의해 더욱 더 국부적으로 영향을 미치게 된다. 이러한 경향으로 인해서 클린룸내에서 발생한 입자를 생

표 9. low Reynolds Number 난류 모델로 수정된  $k-\epsilon$  난류 방정식

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u'_i u'_j \right) - \rho u'_i u'_j = \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \rho k - \mu_i \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \rho \epsilon - 2\mu \left( \frac{\partial \sqrt{k}}{\partial x_j} \right)^2$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P - C_2 \rho \epsilon) + \frac{2\mu \mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_C} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] + S_i$$

$$P = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

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

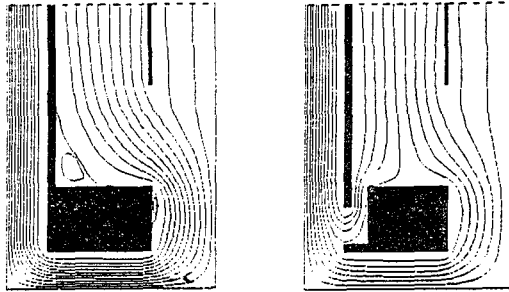
$$C_\sigma = 0.09 \exp \left\{ \frac{-3.4}{(1 + R_t/50)^2} \right\}$$

$$C_1 = 1.44$$

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

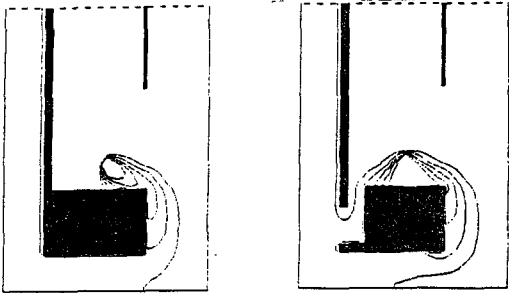
$$\mu_t = C_\sigma \rho \frac{k^2}{\epsilon}$$

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



(a) Type A (b) Type B

그림 10. 클린터널형 클린룸에서 유입풍속이 0.5m/s 일때 배기방식에 따른 유동장 유선의 분포변화



(a) Type A (b) Type B

그림 11. 클린터널형 클린룸에서 유입풍속이 0.5m/s 일때 배기방식에 따른 정상상태 오염입자 농도장의 분포 변화

산공정에 영향을 주지 않으면서 경제적이고 효율적으로 제거하기 위한 입자분포의 상세한 해석이 더욱 더 요구된다. 첫번째 접근방식으로서 정상상태의 입자발생을 일정 유속(flux)을 갖는 점 형태의 오염원(point source)이나 선 형태의 오염원(line source)으로 가정한다.

농도장의 지배방정식은 유동장의 지배방정식과 독립적이기 때문에 정상상태의 공기유동을 계산한 후 오염입자의 확산특성을 계산한다. 클린룸에서 대부분의 오염입자는 생산장비와 작업자로부터 발생되므로 작업대 상부에 존재하는 오염원의 위치를 변화시켜 입자의 전파특성을 알아보는 연구가 주로 수행되어 왔다.<sup>10, 13)</sup> 그림 11은 그림 10과 동일한 유동장에서 일정 유속의 오염원이 생산장비의 위치에 해당하는 작업대 상부에 놓여 있을때의 정상상태 등농도선을 나타낸 것이다.<sup>13)</sup>

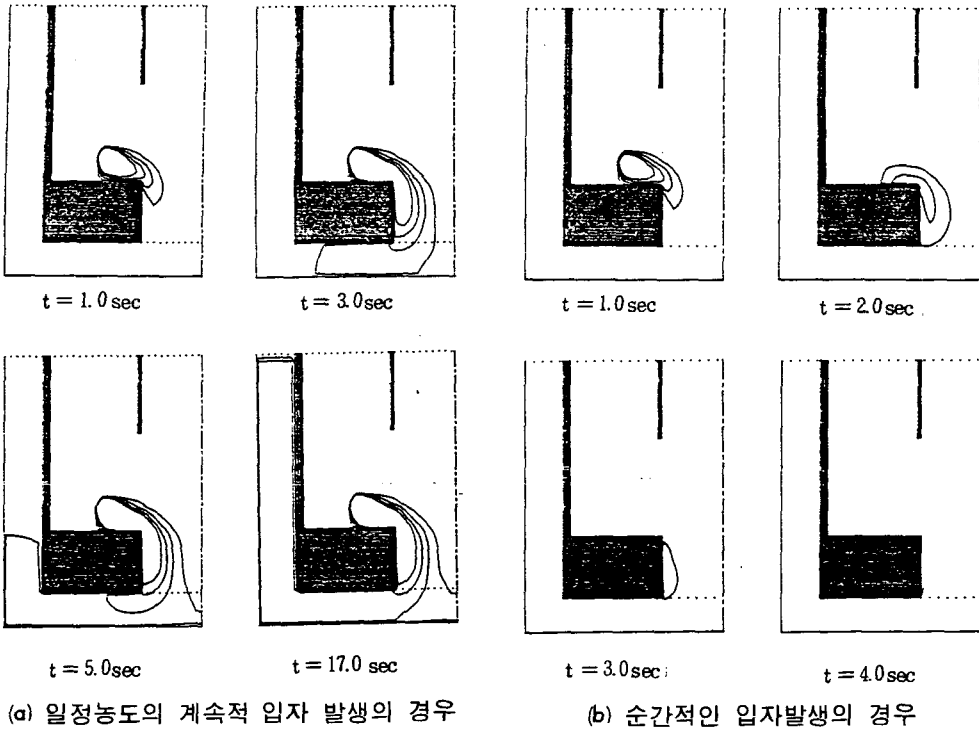
### 3.3 2차원 비정상상태의 농도장 해석

실제 클린룸이 운전되는 동안 클린룸 내부에서 발생하는 오염입자는 정상상태로 발생하는 것이 아니라 쉽게 규명되지 않는 다양한 입자 발생원으로부터 순간적으로 또는 불연속적으로 발생된다. 클린룸내에서 순간적으로 또는 일정시간 동안 발생된 오염입자의 전파특성을 분석하여 클린룸의 동적 특성을 규명하기 위해서는 비정상상태의 농도장 해석이 필요하다. 순간적으로 또는 일정시간 동안 입자가 발생된다는 가정은 실제 클린룸내의 오염입자 발생구조를 비교적 근접하게 묘사하는 방법중의 하나이다. 이러한 상황에서 클린룸의 청정도 회복성능은 발생된 오염입자를 청정공간 밖으로 얼마나 빨리 배출시키느냐로 평가된다.

오염원에 따른 클린룸의 동적 특성에 관한 연구는 클린룸내에서 시간에 따라 오염입자가 전파되는 양상, 특정 위치에서 시간에 따른 오염입자의 농도변화, 클린룸의 청정도 회복시간 등의 분석에 대해 주로 수행되어 왔다.<sup>14, 15, 16)</sup> 그림 12의 (a)와 (b)는 클린터널형 클린룸내에서 유동장 중에 오염입자가 연속적 또는 순간적으로 발생할때 시간에 따른 오염입자 농도장의 변화를 보여주고 있다.

### 3.4 3차원 유동장 및 농도장 해석

3차원 수치해석은 계산시간 및 기억용량의 제한 때문에 일반적으로 이용되고 있지는 않으나, 난류방식 클린룸과 같이 3차원 특성이 강한 경우나 좀 더 실제현상에 가까운 결과를 얻고자 하는 경우에 사용된다. 3차원 계산은 주로 일본에서 슈퍼 컴퓨터를 사용하여 행해지고 있으나, 수치해석이 아직 정성적인 결과의 활용에 국한되는 현실상황을 감안할때 비용이 많이 드는 3차원 계산을 꼭 수행하여야 하는지가 의문시된다. 아직까지 수치해석은 최종적인 해가 아닌 물리적 현상의 정성적인 경향을 예측할 수 있는 편리한 방법으로 인식되고 있다. 이러한 관점에서 보면 3차원 수치해석은 비용이 많이 들므로, 이 분야에서는 범



(a) 일정농도의 계속적 입자 발생의 경우

(b) 순간적인 입자발생의 경우

그림 12. 클린룸내에서 연속적 또는 순간적 오염입자가 발생할 때 시간에 따른 농도장의 변화

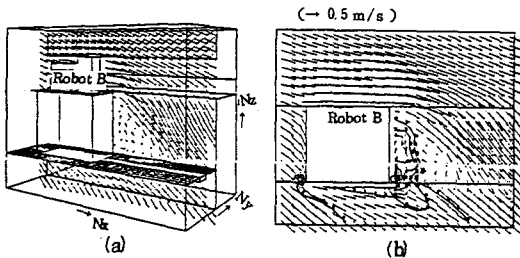


그림 13. 클린룸 웨이퍼 자동 반송장치 주위의 3차원 유동장의 계산에

용적 2차원 수치해석으로도 충분히 정성적인 예측을 할 수 있다고 생각된다.

청정공기의 흡입구 및 배출구의 갯수와 위치, 청정공간의 크기, 작업대의 유무를 변수로 하여 난류방식 클린룸내의 기류분포와 오염입자 확산형태에 대한 연구가 체계적으로 수행되어 왔다.<sup>17, 18, 19, 20, 21)</sup> 그리고 클린터널방식 클린룸에서 반도체 산업에 주로 사용되는 웨이퍼 자동 반송장치 주위의 유동에 관한 연구도 수행되었다.<sup>22)</sup> 그림 13은 3차원계산의

한 예를 보여주고 있다.

### 3.5 실내 발열원의 영향

실제 반도체 산업의 CVD (Chemical Vapor Deposition) 공정, Sputtering 공정, Diffusion 공정 등과 같이 발열을 수반하는 것이 보통이므로 클린룸 환경을 세밀하게 제어하기 위해

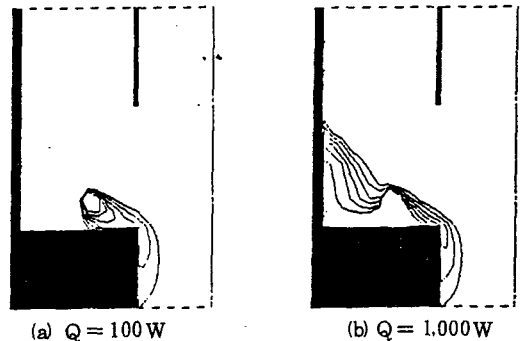


그림 14. 클린터널형 클린룸에서 정격풍속 0.5 m/s 일때 발열원의 강도변화에 따른 오염입자 농도장의 분포변화

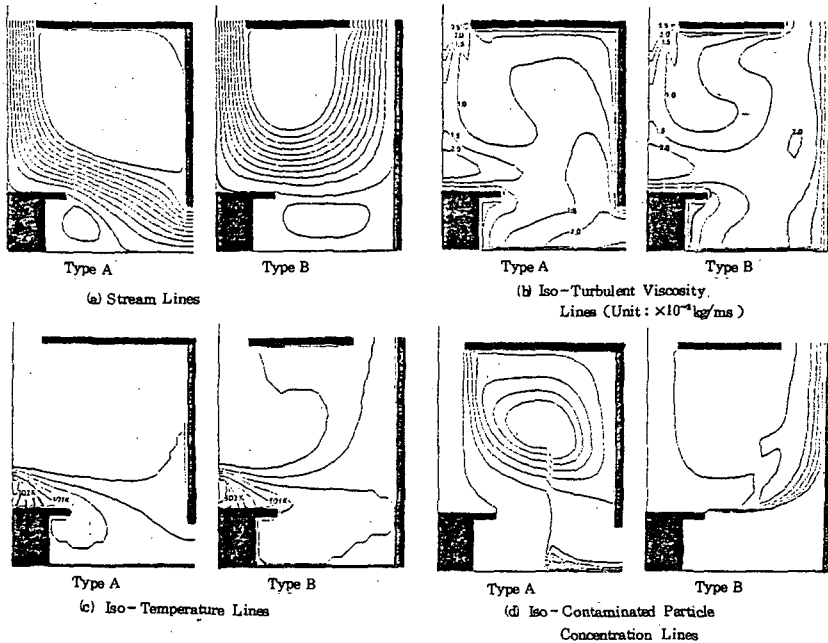


그림 15. 난류형 클린룸에서 100W의 발열원과 작업자로부터의 입자발생을 고려할때 배기구 변화에 따른 계산예

서는 이러한 발열을 무시할 수 없다. 그러므로 공기유동과 입자분포에 대한 실내 발열원의 영향도 고려되어야 한다.

클린터널방식 클린룸에서 온도차에 의한 대류효과를 고려한 공기유동과 오염입자 전파에 대한 연구가 수행되어 왔다.<sup>23,24)</sup> 그림 14는 일정 열유속을 갖는 발열원으로 인하여 발진된 오염입자가 전파되는 양상이 달라지는 것을 나타내고 있다.<sup>23)</sup> 그림 15는 난류형 클린룸에서 배기구가 바닥과 천정에 위치함에 따라 작업대 상부에 100W의 발열원과 작업자로부터의 입자 발진원을 가졌을때의 유동장, 난류특성, 온도장, 입자농도장의 변화를 비교한 계산결과를 나타낸 것이다.<sup>25)</sup>

#### 4. 결 론

선진국에서는 이러한 오염문제를 해결하기 위한 여러가지 방법이 제안되고 활발한 연구가 진행되어 실용화되고 있으나 우리나라에서는 아직도 그 문제해결을 위한 접근방식이 초

보적인 단계에 있으며 전문인력과 장비도 부족한 형편이다. 결론적으로 앞으로의 CR설계를 위한 기술개발은 거시적 관점에서 CR공간 전체에서 요구되는 고정정도를 유지하며 증대되는 운전에너지를 극소화할 수 있는 설계기술 및 운전기술이 필요하고, 이와함께 플레넘, 필터, 청정실내의 기류제어기술 확립과 항온 항습 공조시스템에서의 입자발진 요인이 될 수 있는 구동요소에 대한 정밀한 연구가 요구된다. 특별히 첨단 반도체 산업에서는 단순히 건물적 발상의 CR자체에서의 입자제어 뿐만아니라 운전중 제품의 생산수율에 결정적으로 영향을 미칠 수 있는 공정과정이나 공정기기에서 국소적으로 발진하는 입자가 부유확산하는 것과 함께 반도체 공정중 사용되는 액체나 가스 등에 존재하는 오염입자를 제거하는 것을 목표로 고순도의 액체나 가스의 제조기술과 그것들의 분배공급 시스템에서의 오염입자 제어기술이 필수적인 해결과제로 부상하고 있다. 따라서 추후로 초청정기술의 정착을 위해서는 오염입자가 공정중 발진하는 거동에

대한 세부분석이 이루어져야 하며 그러한 오염입자가 CR내부 유동장내에서 확산되어 전파되는 특성인 확산거리와 전파시간에 대한 분석과 오염된 국소공간이 다시 원래의 청정도를 복귀하는 회복시간 등에 관한 구체적인 연구가 선행되어야 한다. 또한 공정중 오염입자가 발생되어 국소 작업공간의 청정도가 파괴되었을 때 실제 생산수율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 반도체 웨이퍼 등에 부착하는 거동에 대한 연구가 필요하다. 이러한 오염입자의 발전, 확산, 부착 거동을 분석하는 기술은 초청정 CR에서 새롭게 대두되고 있는 진동문제, 정전기 문제와 함께 첨단제품 개발의 기본기술로 반드시 해결해야 할 과제이다. 또한 반도체 공정중에 영향을 미치는 오염입자의 성분을 분석하여 원래의 오염원을 추적하기 위한 오염입자 포집 및 분석기술도 매우 중요한 연구과제가 될 것이다. 이를 위해서는 지속적이고 체계적인 입자거동에 대한 모델링과 구체적인 실험이 전문적인 팀에서 이루어져야 하며 이렇게 분석된 오염입자 제어기술이 반도체 생산라인 등의 실제현장에 적용되어 면밀히 분석, 검증되고 그에따른 문제점이 제기되어야 진정한 초청정 기술이 국산화될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. K.T. Whitby and G.M. Sverdrup, California Aerosols: Their Physical and Chemical Characteristics, pp.477-517, in the Character and Origins of Smog Aerosols, edited by G.M. Hidy et al., John Wiley & Sons, New York (1980).
2. B.Y.H. Liu, J.W. Lee et al., "Performance of a Model Clean Room", 8th International Symposium on Contamination Control, pp.810-821, Milano, Italy, Sept. 9-12, 1986.
3. Bertil Larsson et al., "Modular Clean Rooms in the Electronic Industry", ABB Review 3/89, pp.29-34, March 1989.
4. D.L. Tollover, "Contamination Control: New Dimensions in VLSI Manufacturing", Solid State Technology, pp.129-137, March 1984.
5. D.S. Ensor and R.P. Donovan, "The Application of Condensation Nuclei Monitors to Clean Rooms", J. Environmental Sciences, 28(2), pp.34-36, March/April (1985).
6. P.B. Keady et al., "A Condensation Nucleus Counter for Clean Rooms", 1986 Proceedings, 32nd Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences, Dallas, Texas, 5-9 May (1986).
7. U.S. Federal Standard 209D, "Clean Room and Work Station Requirements. Controlled Environments", June 1988.
8. Randall Hughes, Bizhan Moslehi, and Egil Castel, "Experiences with an Open Area SMIF Isolation Site (OASIS)", Proceedings of Microcontamination Conference, pp.104-112, Oct. 1987.
9. R. Ervin, J. Berger, "Contamination in Semiconductor Processing", Proceedings of 32nd IES Annual Technical Meeting, pp.424-426, 1986.
10. I. Shanmugavelu, T.H. Kuehn and B.Y.H. Liu, "Numerical Simulation of Flow Fields in Clean Rooms", Proceedings of 33rd IES Annual Technical Meeting, pp. 298-303, 1987.
11. T. Yamamoto, D.S. Ensor and R.P. Donovan, "Clean Room Air Flow Modeling", Proceedings of 33rd IES Annual Technical Meeting, pp.304-309, 1987.
12. T. Yamamoto, R.P. Donovan and D.S. Ensor, "Modeling of Flow in Clean Room Hoods", Proceedings of 34th IES Annual Technical Meeting, pp.321-325, 1988.
13. C.S. Lee, M.D. Oh et al., "A Study on the Flow Distribution System for the Particle Control(II)", MOST Report, KAIST 2N391-3230-2, 1988.



14. M.D. Oh, C.S. Lee et al., "A Study on the Development of Class 1 Super Clean Room (I)", MOST Report, KIST N563-3634-2, 1989.
15. S. Yashima, N. Suwa et al., "Study on Cleanliness in Conventional Flow Clean Room (No.2) - Computer Simulation of Air Flow and Particle Divergence -", The 5th Proceedings of JACA, pp.5-8, 1986.
16. Y. Suwa, "Studies on Numerical and Transient Algorithm for Clean Room Efficiency", The 8th Proceedings of JACA, pp.29-32, 1989.
17. S. Murakami, S. Kato, Y. Suyama, "Study on Air Velocity Distribution in Conventional Flow Type Clean Room (Part 2) - Numerical Simulation of Turbulent Flow-field -", The 5th Proceedings of JACA, pp.21-32, 1986.
18. S. Kato, S. Murakami, Y. Suyama, "Study on Air Velocity Distribution in Conventional Flow Type Clean Room (Part 3) - Numerical Simulation of Contaminant Diffusion -", The 5th Proceedings of JACA, pp.33-59, 1986.
19. S. Kato, S. Murakami, Y. Suyama, "Study on Air Velocity Distribution in Conventional Flow Type Clean Room (Part 4) - Experimental and Numerical Analysis of Flow Field and Diffusion Field in Room with Obstacles -", The 6th Proceedings of JACA, pp.165-187, 1987.
20. S. Nagano, S. Murakami, S. Kato, "Study on Distribution of Airborne Particles in Clean Room (Part 2) - Comparison between Fully-scale Experiment and Numerical Simulation -", The 6th Proceedings of JACA, pp.151-156, 1987.
21. S. Yashima, N. Suwa et al., "Three Dimensional Air Flow Simulation by Finite Element Method", The 6th Proceedings of JACA, pp.139-142, 1987.
22. T. Izumoto, M. Suzuki et al., "3D Simulation of Airflow around a Moving Vehicle in a Tunnel Clean Room", The 6th Proceedings of JACA, pp.157-164, 1987.
23. M.D. Oh, H.K. Lim and C.S. Lee, "Numerical Modeling of Air Flow and Contaminated Particle Diffusion in Clean Room Environments with Internal Heat Source", The 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Vol.1, pp.450-455, 1988.
24. N. Suwa, H. Kanayama, K. Toshigami, "Air Flow Simulation with Thermal Convection", The 7th Proceedings of JACA, pp.69074, 1988.
25. M.D. Oh, H.K. Lim, Y.I. Kim, C.S. Lee, "Numerical Analysis of Contaminant Diffusion in Turbulent Type Clean Room with Internal Particle Generation and Heat Sources", Proceedings of 2nd World Congress on Heating, Ventilating, Refrigerating and Air Conditioning, Sarajevo, Ugoslavia (August 27- September 1, 1989).