

대형 FAB에서의 수율 극대화

임승혁 | (주)HNC 기술연구소 연구원
E-mail : shim@hanceng.com

본 논문은 최근 대형화되는 FAB¹⁾에서 문제가 되고 있는 교차오염(Cross Contamination)을 해결하여 디스플레이 제품의 수율(Yield) 극대화를 위한 방법을 구현하고 있다.

기존의 클린룸²⁾에서는 각각의 공정이 Bay로 구분되어 청정환경 구현이 용이했지만 최근 디스플레이 제품의 급격한 대형화와 이에 따른 생산장비 및 FAB의 대형화로 인해 생산환경 저해요소가 증가하고 있는 실정이다. 따라서 기류제어 Partition의 설치, Access Floor 개구율 조정, 국소청정시스템 도입 등의 환경최적화 활동을 통해 비용은 절감하고 청정도는 높여 수율을 극대화할 수 있는 방법을 적용하였다.

이러한 환경최적화 활동은 클린룸 내의 기류에 중점을 두고 있으며, 원활한 기류의 흐름은 클린룸 내의 균일한 온도, 습도 및 청정도 유지를 위해 매우 중요한 요소이다. 따라서 기류최적화라는 용어를 흔히 사용하고 있으며, 기류 Simulation을 통한 예측 및 설계가 필수적이다.

최근 원가절감을 위해 중요 공정에 대해서만 고청정 시스템을 적용하고 나머지 구역에 대해서는 저청정 클린룸을 구성하여 투자비를 절감하고 있는 추세이다. 따라서 국소청정시스템의 성공이 바로 원가절감과 직결되며, 얼마나 중요 공정에 대한 시

스템을 잘 구성하느냐에 따라 수율이 결정된다. 사용되는 자재의 선정부터 정확한 설계, 그리고 생산공정에 대한 이해를 바탕으로 한 세부적인 사항의 반영이 뒷받침되어야 한다. 또한 긴급상황 발생에 대비한 자동제어 시스템을 적용하여 위험요소 발생 시 생산공정에 문제가 발생하지 않도록 신속한 대응이 가능하도록 해야 한다. 이를 위해 새로운 자재의 설계 및 개발과 더불어 신개념의 시스템을 구축하고 통합환경제어 시스템을 적용하여 기존에 비해 높은 수율을 달성할 수 있었다.

이러한 환경최적화 활동을 통해 전체 클린룸의 청정도를 점차 낮추어 원가절감을 실현하면서도 수율이 안정화되는 시점은 오히려 앞당기는 결과를 실현하였다. 나날이 변화하는 첨단제품에 따른 지속적인 환경개선 프로젝트를 통해 투자비는 절감하고 더욱 깨끗한 생산환경을 구현하여, 첨단 디지털 제품의 경쟁력을 확보하고 나아가 21세기 국가경쟁력 향상에도 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

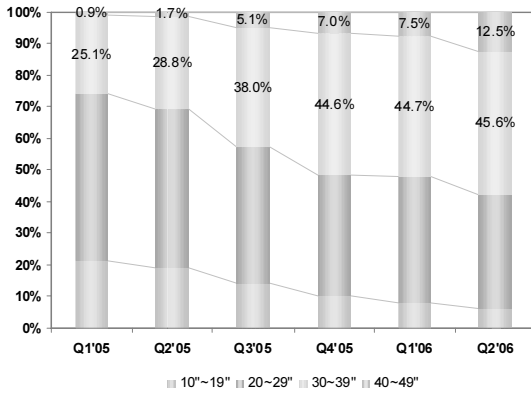
I. 서론

1. 반도체, 디스플레이 산업의 성장과 클린룸

반도체 및 디스플레이 산업은 우리나라 경제에

1) Fabrication의 약자로서 일괄 생산체제를 갖춘 공장을 뜻함

2) 먼지, 온도, 습도, 조도, 진동, 소음, 압력 등에 대해 환경적으로 제어되는 밀폐된 공간



(출처 : Display Bank Report Q2'06)

그림 1. 30" 이상 LCD Panel 점유율

미치는 과급효과가 큰 만큼 관련산업 또한 많은 발전을 거듭해 왔다. 최근에는 평판디스플레이에 대한 폭발적인 수요 증가에 따라 생산효율을 높이기 위한 노력이 결국 사업에서의 성패를 좌우할 만큼 중요한 요소가 되었다.

LCD³⁾와 같은 평판디스플레이에서 많은 물량을 빠르게 생산하기 위해서는 제품의 대형화가 필수적이다. 게다가 소비자의 욕구에 따라 대형 화면을 구현하기 위한 LCD Panel의 생산이 급격하게 증가되고 있다. 최근 조사에 따르면 30인치 이상의 LCD TV의 점유율이 2006년 2분기에는 58.1%에 달한다.

제품의 Size가 증가하면 생산장비와 공장의 면적 또한 증가하게 된다. LCD의 경우 제품Size에 따라 공장의 면적이 기하급수적으로 증가하게 된다. 그림 2에 LCD Size 증가에 따른 FAB 면적의 증가를 나타내었다. 이러한 FAB 면적의 증가는 신규 제품 생산을 위한 투자비의 급증, 대형 클린룸의 환경제어 등 원가절감에 불리한 많은 문제점을 야기하게 된다.

특히 정밀한 환경제어가 되지 않을 경우 불량품

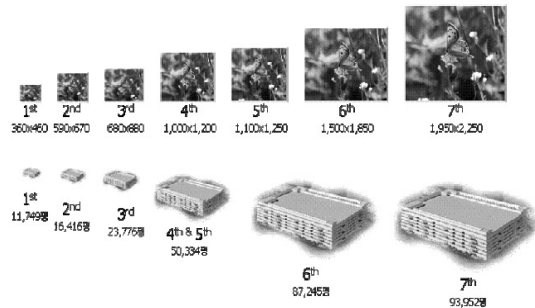


그림 2. LCD Glass Size에 따른 FAB 면적 ("L"社 기준)

의 발생확률이 크게 증가하므로 기존에 비해 더욱 고도의 청정기술이 요구된다.

2. 대형 FAB의 문제점

생산공장의 대형화는 제품 생산을 위한 클린룸의 환경 구현을 어렵게 한다. 기존 웨이퍼(Wafer) Wafer : 집적회로를 만드는 토대가 되는 실리콘박판 클린룸의 경우 Bay (Bay : Process Area와 Service Area를 격리하기 위한 Partition)로 구분되어 기류의 유동거리가 짧아 수직층류 형성에 크게 영향을 받지 않았다. 그러나 최근 LCD를 생산하는 초대형 클린룸의 경우 기류가 유동하는 거리가 100m가 넘고, Ballroom (Ballroom : 클린룸 내에 Bay가 형성되지 않는 전체 순환방식 type의 클린룸)으로 Bay가 형성되지 않아 편류현상이 심화되고 있다. 이러한 편류현상은 교차오염을 유발하여 넓은 클린룸에서의 청정도 유지를 어렵게 한다.

그림 3에 LCD 클린룸의 구조를 표현하였다. 클린룸은 상부, 클린룸, 하부로 구성되어 있으며, 천정의 FFU FFU(Fan Filter Unit) : 천정 면에 설치되어 클린룸에 깨끗한 공기를 공급하는 장치를 통해 청정공기를 공급하고 클린룸 바닥의 Access

3) LCD : Liquid Crystal Display(액정표시장치)

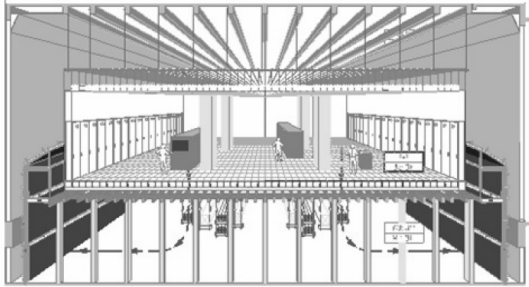
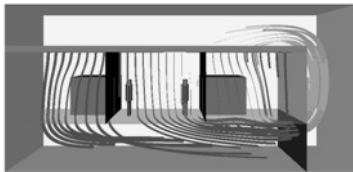
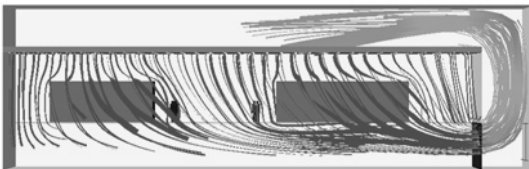


그림 3. 클린룸의 구조



Wafer Cleanroom(Bay Type)



LCD Cleanroom(Ballroom Type)

그림 4. 클린룸 Type에 따른 기류현상 (Flovent를 활용한 Simulation 결과)

Floor⁴)를 통과하고 Dry Coil⁵)을 지나면서 온도를 조절하게 된다. 클린룸이 대형화되면서 천정에서 내려온 기류는 측면의 Dry Coil을 향하는 편류현상을 나타낸다.

그림 4에는 기존의 Wafer 제조용 클린룸과 최근의 LCD 제조용 클린룸의 기류현상을 비교하였다. LCD 제조용 Ballroom Type 클린룸에서는 심한 편류현상에 의해 어느 한 장비에서 발생한 오염물질이 다른 생산공정에 영향을 미치는 교차오염

(Cross Contamination⁶)의 위험이 증가하고 있다.

3. 클린룸의 청정도 유지

클린룸을 유지하기 위한 4대원칙이 있다. 그림 5에 나타난 바와 같이 침투방지, 발생방지, 누적방지, 그리고 신속제거의 원칙이다. 최근의 클린룸은 외부와의 완벽한 격리와 Air Shower와 Pass Box를 통해 먼지를 관리하므로 외부로부터 먼지가 침투하는 것을 잘 관리하고 있다. 그러나 아무리 먼지의 침투를 잘 관리한다 해도 인원 및 물류의 이동에 의해 먼지가 발생하게 된다. 따라서 이렇게 발생하는 먼지를 신속히 제거하여 누적되지 않게 하여 청정 환경을 유지하는 고도의 기술이 필요하다.

클린룸은 기본적으로 FFU를 통해 청정한 공기를 공급하는 시스템이다. 이 청정한 공기는 클린룸에서 발생하는 먼지와 함께 바닥의 Access Floor를 통해 신속히 제거되어야 깨끗한 환경을 유지할 수 있다. 그러나 클린룸 내부가 수직층류가 되지 않게 되면 신속한 제거가 되지 않고 클린룸 내부에 누적되어 청정도가 떨어지게 된다.

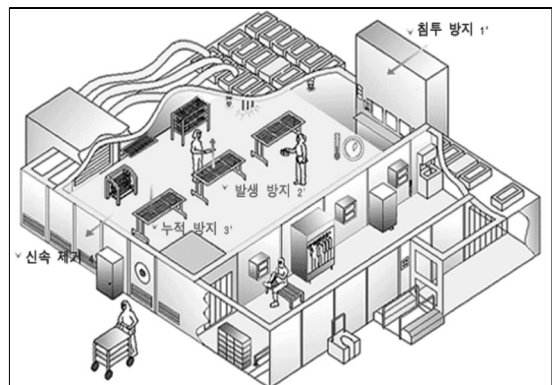


그림 5. 클린룸 4대원칙

4) Hole이 뚫려 있는 다공판으로 클린룸에서 발생한 Particle을 배출하는 역할을 한다.
 5) 건코일이라고도 하며, 냉수를 통과시켜 클린룸으로 공급되는 공기의 온도를 조절
 6) Cross Contamination : 어느 한 지역의 오염물질이 기류흐름에 따라 다른 지역을 오염시키는 현상

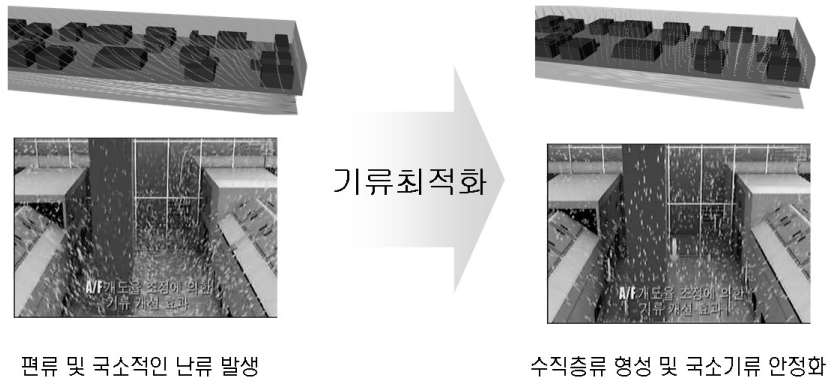


그림 6. 대기류 최적화의 필요성

따라서 최근 대형화된 클린룸에서 얼마나 수직층류를 잘 구현하여 안정된 생산환경을 구축하느냐에 따라 제품의 수율과 원가절감에 따른 경쟁력이 좌우된다.

다음 본문에서는 최근 구축한 기류환경 개선 프로젝트를 통해 어떻게 대형 클린룸에서의 환경을 최적화할 수 있는지 살펴보기로 한다.

II. 본문

1. 대기류 최적화

(1) 대기류 최적화 필요성

클린룸 내에서 기류의 형태는 매우 중요한 역할을 한다. 기본적으로 클린룸 내의 먼지를 제거하는 역할과 동시에 온도 및 습도를 균일하게 유지하기 위해 양호한 기류를 형성하는 것이 중요하다. 또한 교차오염을 방지하기 위해 클린룸 내의 기류를 수직층류로 유지하여 오염이 확산되는 것을 방지해야 한다. 실제 클린룸 내부의 기류는 제품 수율에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다.

(2) 대기류 최적화 방법

대기류를 최적화하기 위한 방법으로는 여러 가

지가 있으나 주로 다음의 방법을 통해 수직층류를 구현한다.

그림 7의 방법들을 클린룸 환경에 따라 적절히 적용하여 안정적인 환경을 구현함과 동시에 수율 향상을 기대할 수 있다.

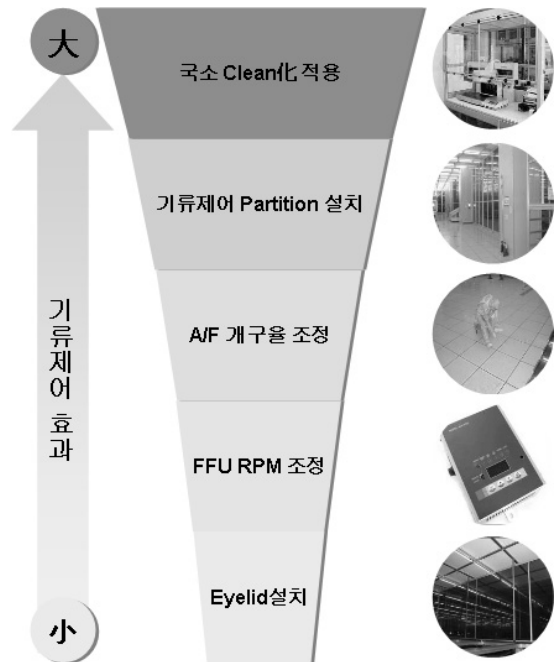


그림 7. 대기류 최적화 방법

2. 기류제어 Partition

(1) 클린룸 內 위치에 따른 편류현상

서론에서 언급했듯이 클린룸이 대형화되면서 기류의 유동거리가 증가되었다. 이는 클린룸 내에서 편류현상으로 나타나게 되고 위치에 따라 다른 편류도를 나타낸다.

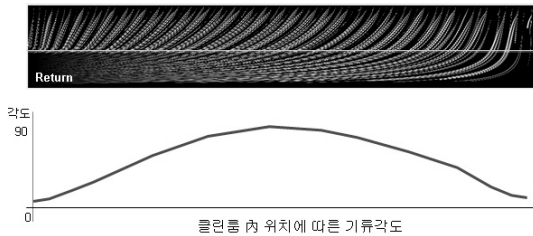


그림 8. 클린룸 內 위치에 따른 편류현상

그림 8에서 볼 수 있듯이 가장 심한 편류는 클린룸 중앙부에서 Return부까지의 1/2 지점에서 가장 크게 나타난다. 이렇게 심한 편류현상을 방지하게 되면 교차오염과 Particle 발생의 원인이 된다. 따라서 적절한 위치에 기류를 제어하기 위한 Partition을 설치하게 된다. 이것을 기류제어 Partition(ACP : Airflow Control Partition)이라 한다.

(2) ACP(기류제어 Partition)의 구획

ACP를 단순히 편류도가 심한 위치에 설치하는 것은 아니다. 생산장비의 Layout과 인원 및 물류동선을 고려하여 최적의 위치에 설치하여야 한다. 따라서 ACP의 설치위치 및 적절한 설치물량을 고려하기 위해서는 생산공정 및 물류동선에 대한 정확한 파악이 요구된다.

또한 Wet Etching이나 Strip 공정에서 발생하는 Fume의 확산방지를 위해 설치되기도 한다. ACP(기류제어 Partition)는 이처럼 심한 편류와 Fume의 확산을 방지하여 클린룸의 Particle을 신속히 제거하고 교차오염을 방지하는 역할을 한다. LCD FAB의 경우 Stocker⁷⁾ 면적의 증가로 인한 순환풍량 증대에 따라 기류를 제어하는 일이 매우 어렵다. 이러한 경우 ACP의 설치로 인해 편류를 완화하는데 큰 도움이 된다. 그림 9에 ACP 설치로 인한 효과를 나타내었다.

(3) 기류제어 Partition 설치

ACP는 대형 클린룸에서 기류를 제어하여 보다 높은 청정도를 구현하기 위해 설치된다. 따라서 ACP를 설치할 때 분진 발생을 최소화하여 제품 생산에 미치는 영향을 최소화해야 한다.

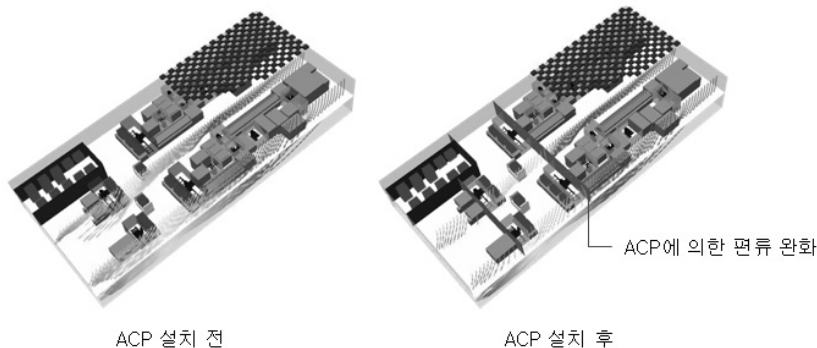


그림 9. ACP 설치에 따른 기류제어 효과

7) LCD Glass를 보관하고 공정에 따라 이송하기 위한 일종의 물류 시스템

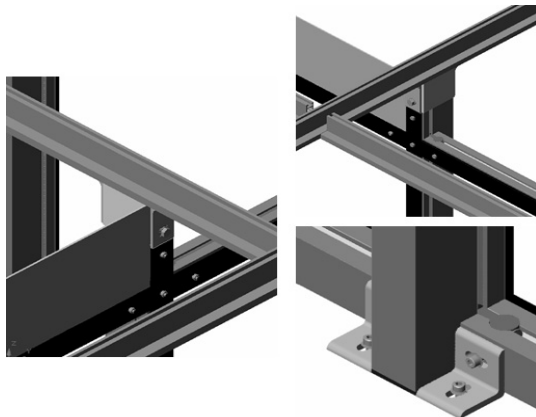


그림 10. ACP에 적용된 조립시공



그림 11. 기류제어 Partition의 종류

ACP는 100% 조립시공으로 기존 구조물에 타공 등의 가공이 필요 없으므로 무발진 시공이 가능하다.

그림 10에 나타난 바와 같이 ACP는 알루미늄 프로파일과 무정전 아크릴을 사용하여 시공하므로 설치 및 철거가 용이한 장점이 있으며, 제품 생산 중에도 설치가 가능하다.

또한 클린룸의 용도에 따라 자외선 차단이 필요한 경우에는 Yellow 색상 아크릴을, 빛의 차단이 필요한 경우에는 불투명 Black 아크릴을 사용할 수 있다.

3. Access Floor 조정

(1) 클린룸 하부의 동압

클린룸을 순환하는 공기는 하부 풍도를 지나 Dry Coil을 통해 순환된다. 이 때 위치에 따라 누적

되는 풍량의 양이 달라지고 동압(Dynamic Pressure)의 변화가 발생한다. 그림 12에는 클린룸 위치에 따른 압력손실을 그림으로 표현하였다. Return Shaft로 가면서 압력손실 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 실제 현상에서 Return Shaft 쪽으로 기류가 쏠리는 편류현상으로 나타난다. 따라서 이 압력손실 값(P)을 제어하여 편류현상을 억제해야 한다.

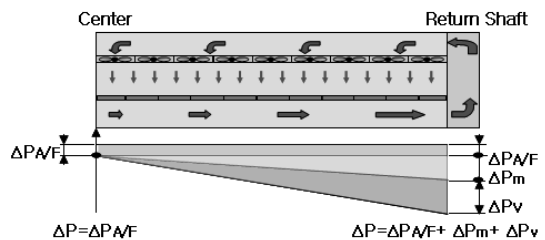


그림 12. 클린룸 하부의 압력손실

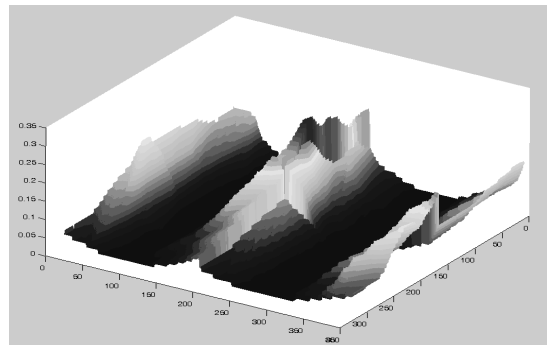


그림 13. 클린룸 하부의 동압분포

(2) Access Floor 개구율 계산

압력손실 값을 제어하기 위해 Access Floor에 부착된 Shutter를 조정하는 방법을 사용한다. 기본적인 조정 Concept은 Return 쪽으로 갈수록 Shutter를 조금만 열고, 클린룸 중앙부로 갈수록 많이 열어주는 것이다. 그러나 Shutter 개구율과 클린룸 내 위치가 Linear한 관계를 나타내지는 않는다. 따라서 정확한 계산 알고리즘을 통해 각 위치

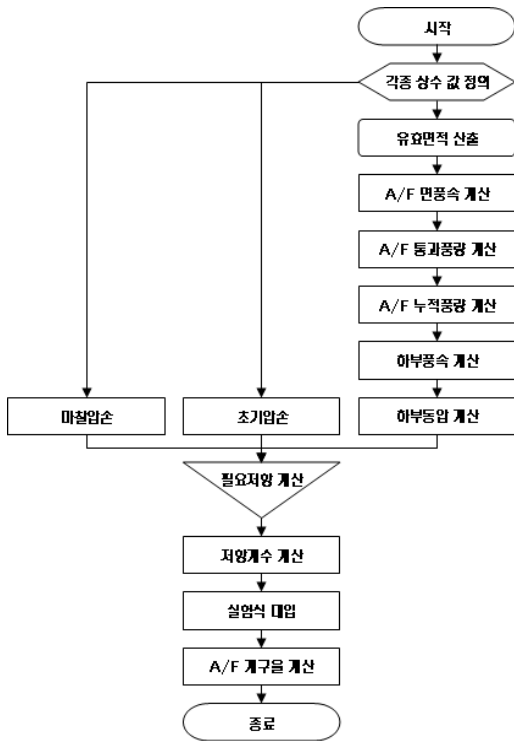


그림 14. A/F 개구율 계산 Flow

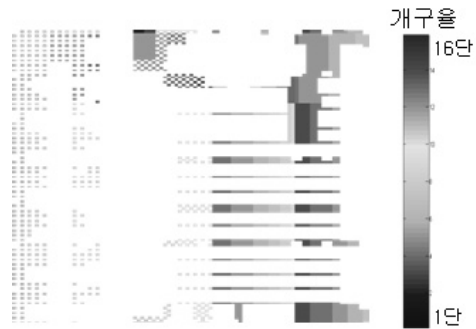


그림 15. 개구율 계산결과

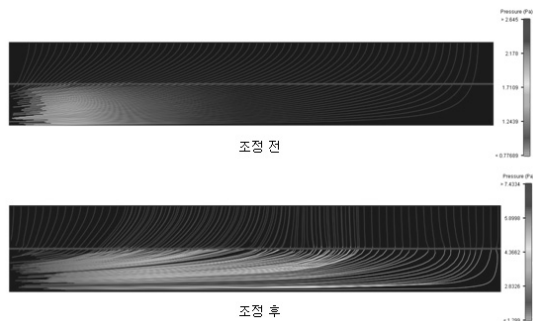


그림 16. Access Floor 조정 효과

에 따른 정확한 개구율이 요구된다.

그림 14에 Access Floor 개구율을 계산하는 과정을 나타내었다. 이러한 과정을 통해 그림 15와 같은 개구율표를 얻을 수 있다. 개구율 조정 단수는 클린룸의 규모와 순환풍량에 따라 다르게 적용한다. 예전에는 4단계로 조정하는 경우가 많았으나 최근에는 클린룸의 대형화에 따라 보통 16단계로 조정해야 편류를 방지하고 안정된 기류환경을 구현할 수 있다.

(3) Access Floor 개구율 조정의 효과

Access Floor 조정을 통해 클린룸의 기류를 수직층류에 가깝게 구현하고 편류를 최소화시킬 수 있다. 그림 15에 조정 전/후를 비교하였다.

Access Floor 개구율 조정을 통해 통과할 수 있는 풍량을 제어하여 수직층류에 가까운 기류환경을

구현하였다. 따라서 교차오염이 최소화되고 Particle을 신속히 제거할 수 있어 보다 높은 청정도의 클린룸을 유지할 수 있다.

4. 국소청정(Mini-Environment) 시스템

(1) 청정도에 따른 클린룸 투자비

첨단 디지털 제품의 고집적화, 대형화에 따라 보다 높은 청정도의 생산환경이 요구되고 있다. 높은 청정도의 클린룸을 건설하기 위해서는 엄청난 투자비가 요구된다. 청정도가 높아질수록 투자비의 증가율은 더욱 높아진다. 그러나 높은 청정도를 확보하기 위해 무작정 투자비를 증가시킬 수는 없다. 따라서 새로운 기술을 도입하여 청정도는 높이되, 투자비는 감소시킬 수 있는 방안이 요구되고 있다. 이

러한 이유로 최근에 도입되고 있는 것이 국소청정 (Mini-Environment) 시스템이다.

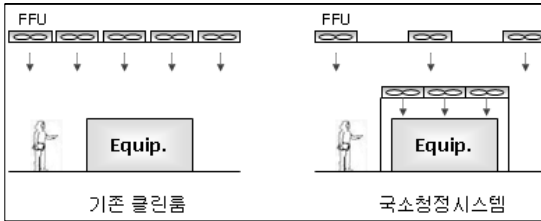
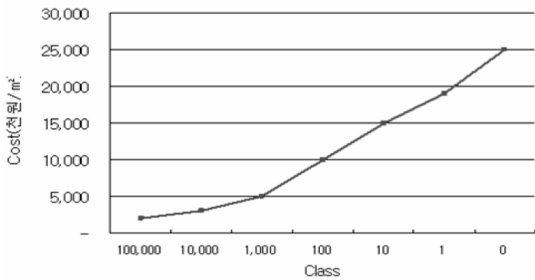


그림 17. 국소청정시스템의 개념



(출처 : 한국공기청정협회)

그림 18. 청정도에 따른 클린룸 공사비

국소청정시스템은 클린룸 전체를 고청정으로 유지하던 기존의 방법 대신 중요한 공정에 대해서만 높은 청정도를 유지하고 나머지 공정에 대해서는 최소한의 청정도를 유지하여 비용을 절감할 수 있다.

(2) 국소청정시스템의 구성

국소청정시스템은 크게 Filter, Structure, Control 등 3 Part로 구성되어 있다.

Filter Part는 보통 클린룸에 사용하는 FFU를 사용한다. 주변 클린룸보다 높은 청정도를 유지하기 위해 순환풍량을 높게 설정하여 양압(Positive Pressure)을 유지시킨다. 장비 가동상태 및 유지보수 상태에 따라 배기 시스템을 추가하기도 한다.

Structure Part는 장치를 유지하기 위한 기본 뼈대에 해당한다. 투명한 재질을 사용하여 장비 내부

를 확인할 수 있어야 하며, FFU와 알루미늄 프로파일의 무게, 그리고 유지보수를 위한 사람의 무게까지 감안하여 구조설계를 해야 한다. 최근에는 생산장비가 대형화되면서 기존의 프로파일로는 하중을 견디기 어려운 경우가 발생하고 있다. 따라서 상황에 따라 새로운 형상의 고강도 프로파일을 적용해야 한다. 그 외에 유지보수를 위한 Door를 설치해야 한다. 각 Door는 용도에 따라 다양한 규격을 가지는데 견고하고 작동시에는 분진이 발생하지 않는 재질을 사용한다.

주변 환경보다 높은 청정도를 지닌 국소청정시스템 내부를 관리하기 위해서는 유지관리가 매우 중요하다. 실제로 유지보수를 위해 Door를 개폐할 경우 양압과 온습도 편차 발생으로 인해 심각한 문제를 야기시킬 수도 있다. 따라서 고청정을 유지하기 위해 자동으로 정밀하게 제어할 수 있는 기능이 요구되고 있다. 이에 ㈜HNC에서는 ISP(Intelligent System Plus)라는 제품 개발을 통합환경제어시스템을 구축하였다. ISP는 온습도, 차압, 청정도 감지 센서를 이용하여 정상상태가 아닐 경우 FFU 속도, 하부 배기 Fan 속도, 측면 배기 댐퍼의 Open Ratio 등을 실시간으로 제어할 수 있는 기능이 있다. 예를 들어 유지보수를 위해 Door를 Open할 경우 차압 센서가 이를 감지하여 FFU 속도를 최대로 증가시켜 양압을 유지할 수 있도록 해 준다.

ISP는 여러 개의 국소청정시스템을 통합하여 제어하는 기능도 포함하고 있어 광범위하게 사용되고 있다. 최근에는 유비쿼터스 모바일 기술을 접목한 제품을 개발하고 있으며, 향후 클린룸 내에 적용될 예정이다.

5. 기류 Simulation

(1) 기류 Simulation의 도입

클린룸에 새로운 개념을 도입할 때마다 실험장치를 이용해 효과를 증명한다면 꽤 많은 비용과 시

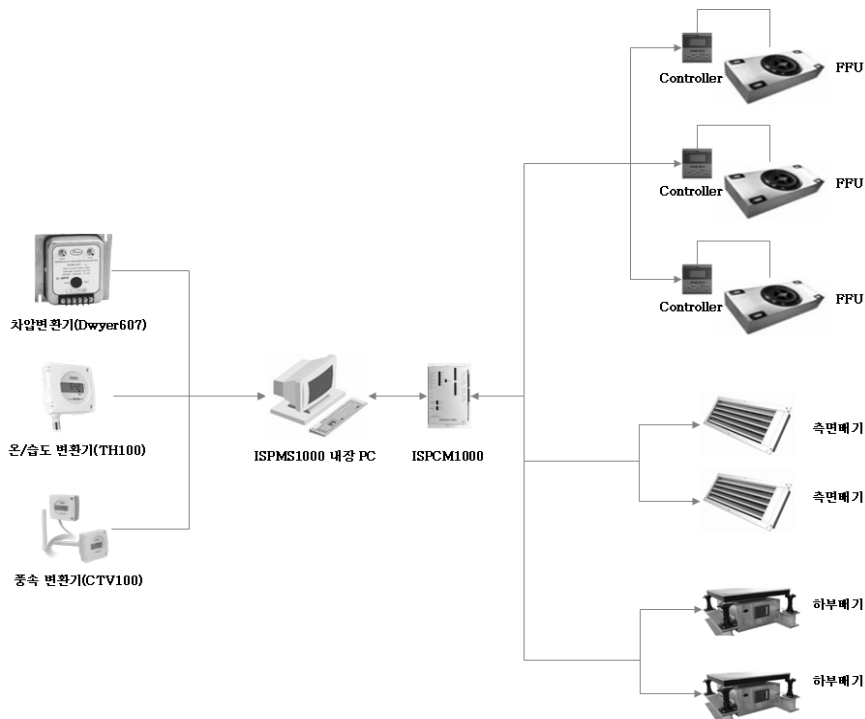


그림 19. ISP 시스템 구성도

간이 투자될 것이다. 더구나 최근과 같이 시장상황과 제품의 Life Cycle이 급변하는 상황에서 Case별로 실험을 한다는 것은 불가능하다. 따라서 짧은 시간 내에 새로운 클린룸 Concept을 증명하는 방법으로 기류 Simulation이 사용되고 있다.

범용 소프트웨어에 비해 상당히 고가인 기류 Simulation 프로그램은 그것을 다루는 사용자에게 따라 결과에 많은 차이를 나타낸다. 따라서 좋은 소프트웨어와 훌륭한 사용자가 만났을 때 비로소 효과적인 예측을 할수 있다.

(2) 기류 Simulation 활용분야

가. 기류 분석

기류의 형태에 대한 Simulation을 통해 최적의 FFU 배치, 또는 기류정체구간을 예측할 수 있다.

나. 속도 분석

그림 20 처럼 클린룸에서의 속도분석을 통해 Particle이 얼마나 신속히 제거될 수 있는지, 또는 정체구간을 예측하여 속도편차를 최소화시키는데 활용할 수 있다.

다. 온도 분석

온도 분석을 통해 클린룸 내부의 온도편차를 최소화시킬 수 있는 방안을 쉽게 찾을 수 있다. 발열이 심한 생산장비의 경우에도 Simulation에 포함시켜 장비 주변의 온도변화까지 예측하여 해결책을 제시할 수 있도록 해 준다.

예를 들면 노광기와 같이 발열이 심한 장비 주변에 배기와 급기의 위치를 어떻게 배치해야 하는지 예측할 수 있다.



그림 20. 기류형태 분석

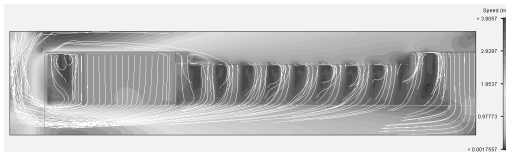


그림 21. 속도 분석

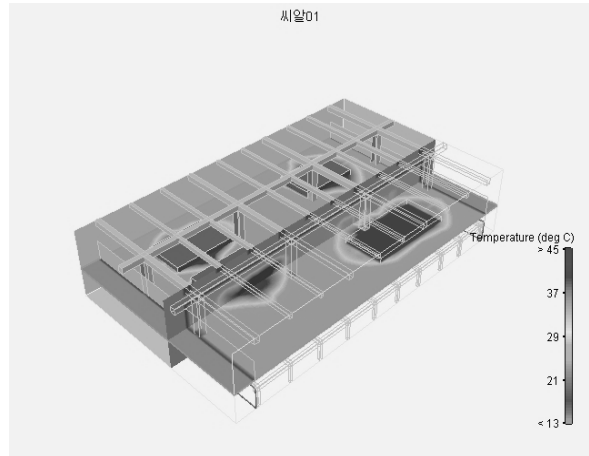


그림 22. 온도 분석

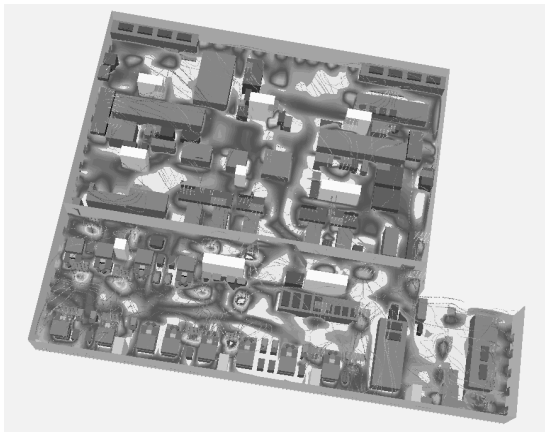


그림 23. 압력 분석

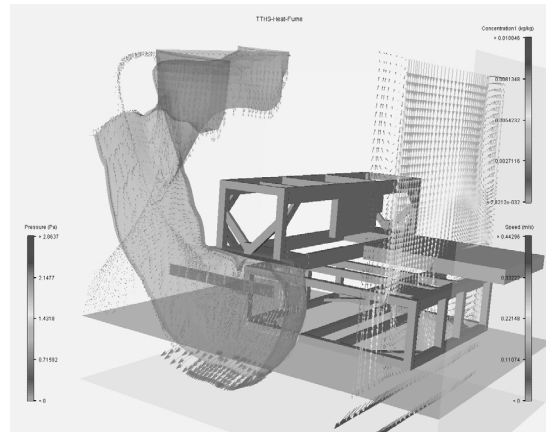


그림 24. 국소환경 분석

라. 압력 분석

클린룸 내부의 압력 분석을 통해 양압 유지에 대한 예측을 수행할 수 있다.

마. 국소환경 분석

국소청정시스템 내부 환경을 분석하여 최적의 급기풍속, 배기량, 입자의 유동경로를 예측하여 안정된 생산환경을 구현하는데 활용할 수 있다.

III. 결 론

1. 대기류 최적화에 의한 수율 향상

앞의 본문에서 대기류 최적화 방법에 대해 살펴 보았다. 초대형 클린룸에서는 기존에 문제되지 않았던 기류환경이 청정도를 유지하는데 매우 중요한 변수가 되고 있으며, 이를 위해 대기류 최적화라는

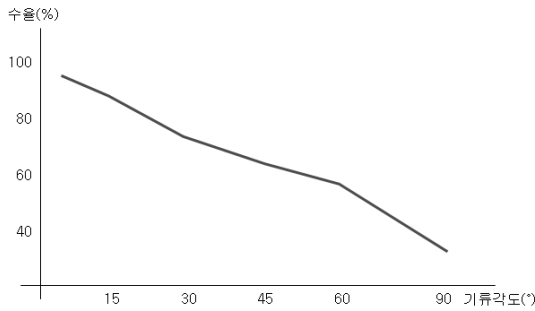


그림 25. 기류각도에 따른 수율 변화

방법이 도입되었다.

대기류 최적화 이후 수율은 다음 그림과 같은 변화를 보인다.

기류각도가 작을수록 수직층류가 형성되므로 높은 수율을 나타낸다.

LCD 클린룸의 방식에 따라 수율85% 달성시점을 그림 24에 비교하였다. 청정도는 점차 낮아지면서 국소청정을 지향하고 있지만 수율 85% 달성시점은 오히려 앞당겨졌음을 확인할 수 있다. 일반적으로 청정도를 높이기 위해 많은 투자비가 요구되지만 이를 기술로 극복함으로써 원가절감과 수율향상을 동시에 실현할 수 있었다.

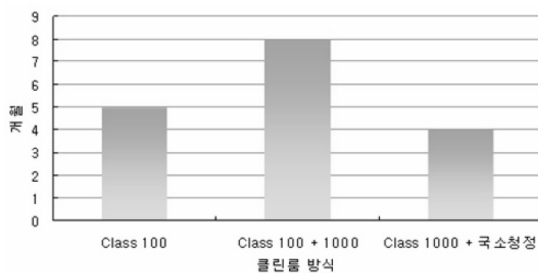


그림 26. 클린룸 방식에 따른 수율 85% 달성시점

2. 향후 클린룸 기술 전망

제품의 고집적화와 대형화에 따라 향후에도 국소청정시스템을 적용한 클린룸 기술이 확대될 것이

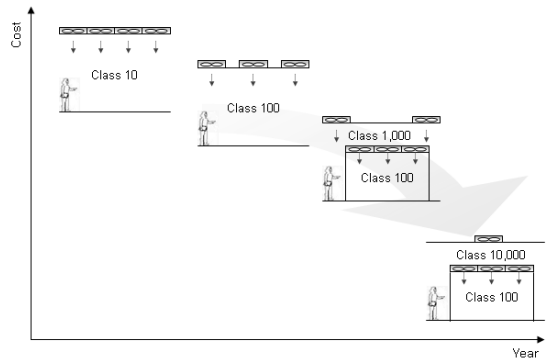


그림 27. 클린룸 청정도 변화 추이

다. 현재 주변 클린룸의 청정도가 Class 1,000이지만 점차 저청정도로 되고 있으며, 국소청정기술의 발전에 따라 미래에는 일반공장 환경에서도 고정밀 제품을 생산할 수 있는 시대가 될 것이다.

또한 Nano 입자를 제어하는 클린룸에서는 과거에 문제되지 않았던 화학물질과 같은 오염물질에 대한 제어가 요구되고 있다. 따라서 클린룸을 시공하기 위한 자재, 외기도입 및 순환계통, 생산장비 등 모든 클린룸 구성재료에 대한 검토가 필요하다. 더불어 각 생산공정에서 발생하는 화학물질을 얼마나 빠른 시간 내에 제거할 수 있는냐에 따라 제품의 수율이 좌우될 것이다.

국가경제에 미치는 파급효과가 큰 반도체와 디스플레이 산업에서의 수율은 기업뿐만 아니라 국가 경쟁력을 좌우하는 중요한 요소이다. 지속적인 환경기술개발을 통해 원가절감과 수율향상을 실현한다면 21세기에도 IT강국으로서의 대한민국으로 우뚝 설 것으로 기대한다.

- 참고문헌 -

1. W.Whyte, 1999, "Cleanroom Design", 2nd Edition, WILEY, pp.123~139
2. Thomas Meidlinger 外, 2001, "Semiconductor

- Fabtech”, 12th Edition, ICG Publishing Ltd., pp.259~261
3. Kenny Kim, 2006, “Worldwide TFT-LCD Market Analysis & Prospect”, Display Bank, pp.4~14
 4. 이병국 外, 2003, “공기청정편람”, 공기청정협회, 第3卷, pp.47~74
 5. 차성일, 2005, “한국 클린룸 산업현황 및 동향”, 공기청정협회, pp.5~9
 6. 이종익 外, 2003, “클린룸 내 공기질 제어”, (주) HNC 기술연구소, pp.3~9