

# 반도체/디스플레이 클린룸의 공조에너지 절감

○ 유경훈 | 한국생산기술연구원 에어로졸오염제어 연구실  
수석연구원  
E-mail : khyoo@kitech.re.kr

## 1. 머리말

우리나라는 2005년 2월16일에 교토의정서가 발효되면서 2013년에서 2017년까지의 의무감축 이행기간 중에 온실가스 배출량을 1990년 대비 5.2%를 감축해야 하는 어려운 상황에 직면해 있다. 한편, 국제 유가가 배럴당 100달러를 가시권에 두게 되면서 우리 경제에 위기감마저 확산되고 있다. 우리나라는 석유 및 가스의 자주개발을(국내 총소비물량 중 국내자본으로 생산한 물량의 비중)이 3% 안팎에 그치고 있는 비산유국이면서 소비량은 세계에서 7번째인 소비대국이다. 최근 산업자원부는 기후변화 대응 업종별 대책반을 가동하여 10개의 에너지 다소비 업종으로 발전, 정유, 철강, 석유화학, 자동차, 반도체, 시멘트, 제지, 디스플레이, 도시가스를 선정하였으며 산업계의 지속가능한 발전이 보장될 수 있도록 적극적으로 에너지절약을 지원하고 있다. 따라서 각 기업들은 온실가스 감축을 전제로 한 에너지절약 대책의 계획 및 실시를 이전보다 더 가속적으로 추진해 나가야 할 것으로 판단된다.

에너지 다소비 업종중의 하나인 반도체/디스플레이 산업에서 제품을 제조하기 위한 초정정 클린룸은 연간 향온향을 유지할 필요가 있고, 동시에 청정도의 관리 측면에서는 도입 외기의 입자상, 분

자상 오염물질(AMC)의 제거가 필요 불가결하다. 이로 인해 클린룸을 유지하기 위한 공조에너지는 방대하게 되며 온실가스 감축을 위해서도 공조에너지의 절감 요구가 점점 증대되고 있다. 본 지면에서는 공조에너지의 절감 문제를 해결할 수 있는 수단으로 에너지절약형 외기공조시스템을 제안하고 그 방식과 에너지 절감량에 대해서 고찰한다.

## 2. 반도체/디스플레이 클린룸의 공조에너지 및 외기부하

### 2.1 반도체/디스플레이 클린룸의 에너지 특성

반도체/디스플레이 산업은 그동안 기술혁신을 통하여 고기능, 고집적 디바이스 제품에 의해 공업제품의 저소비 전력화에 크게 공헌해 왔지만, 반면에 클린룸 공장에 필요한 전력 등 1차 에너지를 대량으로 소비하는 에너지 다소비형 산업이라고 말할 수 있다. 그동안 클린룸의 핵심기술들이 에너지절약 개념보다는 제품수율 향상을 위한 청정도 분야에만 국한하여 발전하였으며 이러한 고 청정도를 유지하기 위한 에너지 소비 과다로 연결된 것으로 판단된다. 반도체/디스플레이 산업은 고유가, 고 에너지비용(energy cost, EC)에 민감할 수 밖에 없으

며 이제는 에너지절감이 제품원가의 경쟁력에 직결되는 상황에 이르렀다. 따라서, 클린룸설비의 초기 투자비(initial cost, IC) 관점도 중요한 반면에 운전 유지비(running cost, RC)를 고려한 라이프사이클 비용(life cycle cost, LCC) 측면이 점점 중요해지고 있음을 시사하고 있다. 표 1은 국내 메이저급 반도체/디스플레이 공장을 보유하고 있는 삼성전자, 하이닉스반도체, LG필립스 LCD의 외기도입량을 기준으로 바라본 클린룸 현황을 수록하고 있다. 외기도입량은 초청정 클린룸환경을 유지하기 위한 핵심 설계요소이며 상기 3사의 메이저급 전자회사들의 총합이 2,100만 CMH(m<sup>3</sup>/h)에 달하고 있다. 표 2는 2004년도에 상기 3사에서 소비된 에너지량을 수록하고 있는데 전력은 발전단가 74원/kWh를 이용하여 전기값으로부터 산출하였고 연료는 500,000원/TOE를 이용하여 계산되었다. 여기서, 1 TOE는 Tons of Oil Equivalent(석유환산톤)의 약자이며 원유 1톤을 태우면 나오는 에너지, 즉 10<sup>7</sup> kcal이다. 이는 우리나라의 2004년도 1차 에너지 총소비량 220,238,000 TOE의 0.85%에 달하는 수준이다. 참고로 미국의 경우 2004년도에 반도체 산업이 전체 산업의 에너지 소비량 중에서 1.8%를 차지했다고 보고되었다.

표 1. 국내 메이저급 반도체/LCD 공장 및 클린룸 외기도입량 현황

업체별 공장 현황	외기도입량 (CMH, m <sup>3</sup> /h)
삼성전자 기흥/화성 반도체공장 (1~15 라인)	9,000,000
하이닉스반도체 이천/청주공장	6,000,000
삼성전자 천안/탕정 LCD단지	3,000,000
LG Philips LCD 구미/파주공장	3,000,000
합 계	21,000,000

표 2. 국내 메이저급 반도체/디스플레이 공장의 에너지 소비 현황 (2004년)

	전기	기타(연료)	Total(TOE)
삼성전자	912,160	134,000	1,046,160
하이닉스반도체	337,860	50,000	387,860
LG Philips LCD	376,700	59,000	435,700
합계(TOE)	1,626,720	243,000	1,869,720

그림 1은 반도체/디스플레이 공장의 에너지 소비량의 분포를 도시하고 있다. 그림에서 보다시피 1차 에너지 소비량의 90%가 전력이며, 그 중 40%를 공조 설비가, 즉 공조에너지로 소비되고 있다. 따라서 표 2로부터 국내 메이저급 3사의 연간 공조 에너지 소비량이 1,869,720×0.4=747,888 TOE가 되고 이로부터 IPCC(유엔산하 정부간 기후변화위원회, Intergovernment Panel on Climate Change)에서 제시하는 탄소톤(TC)으로의 환산계수 0.829 TC/TOE를 곱하면 온실가스 발생량이 619,999 TC가 됨을 추정할 수 있다. 반도체/디스플레이 공장에 있어서의 공조에너지의 대부분은 초청정 클린룸의 온습도, 청정도를 유지하기 위해서 사용되고 있으므로 대규모 클린룸을 가지는 반도체/디스플레이 공장의 에너지 소비량은 공조설비에 크게 좌우된다고 말할 수 있다.

표 3은 제조설비를 포함하여 반도체 클린룸 공장에서 클린룸 바닥면적당 에너지 소비량의 반도체 집적도에 따른 변화를 수록하고 있다. 표로부터 반도체 집적도의 증가와 함께 클린룸 시스템이 축류팬(axial fan) 방식에서 FFU(Fan Filter Unit) 방식으로 개량되면서 반도체 클린룸의 공조·열원설비의 에너지 소비량(공조에너지)이 2.15 kW/m<sup>2</sup>에서 1.07 kW/m<sup>2</sup>로 약 50% 감소되어 크게 개선되었음을 알 수 있다. 이는 클린룸내의 공기 순환동력의

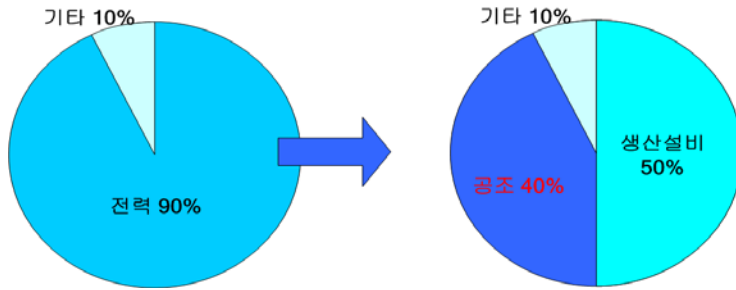


그림 1. 반도체/디스플레이 공장의 에너지 소비량의 분포

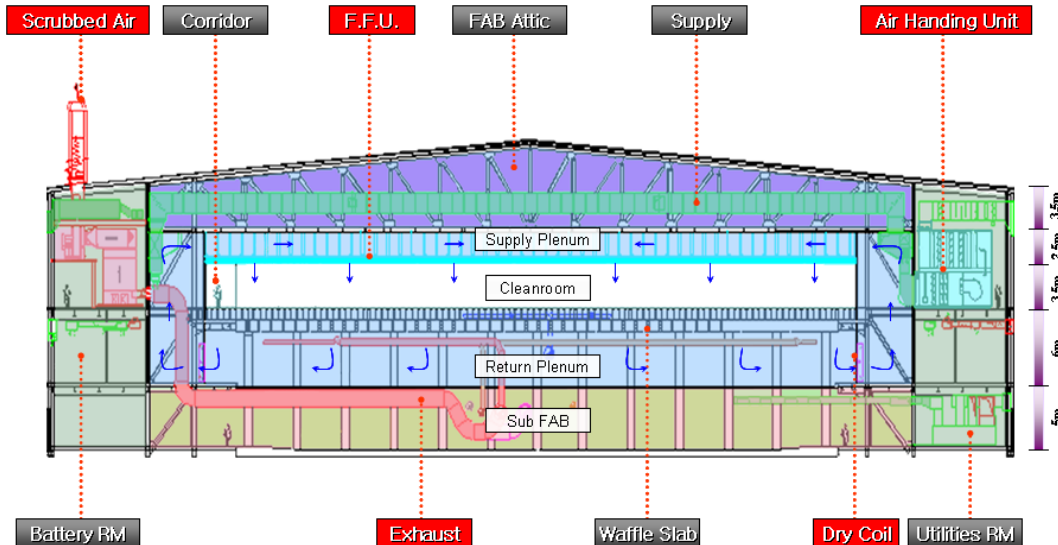


그림 2. 반도체/디스플레이 제조용 FFU방식 클린룸 시스템

절감에 기인한 것이며 특히 공기 순환기기가 「축류팬 → 원심팬 → FFU」라는 저소비 전력 기기로 변화함에 의한 클린룸 순환시스템의 공기 순환동력 절감이 에너지 절약에 크게 기여하였던 것으로 판단된다.

## 2.2 FFU방식 클린룸 시스템의 공조에너지 분석

최근의 대규모 반도체/디스플레이 클린룸은 그

림 2와 같이 미니인바이런먼트(mini-environment) 시스템을 전제로 한 볼룸(ball-room) 방식이 주류를 이루고 있기 때문에 클린룸 전체의 청정도 수준은 ISO class 4~6(class 10~1000) 정도로 감소시키고 제품의 제조환경으로 요구되는 고청정도 구역은 ISO class 1~3(class 1 or cleaner) 정도로 해서 국소화가 진행되고 있다. 따라서, 클린룸 전체 공기 순환기로서 FFU를 채용하는 FFU 방식이 주류를 이루고 있으므로 클린룸 공기 순환풍량은 과거의 경우와 비교해서도 크게 달라진 것도 없

고 클린룸 바닥면적당의 소비에너지는 비교적 변화가 적지만 제조설비의 대형화, 대용량화로 인한 발열(현열)부하가 증대되는 경향에 있다고 말할 수 있다.

그림 3은 이러한 FFU방식 클린룸 시스템에서 소비되는 공조에너지의 분포를 도시하고 있다. 그림으로부터 외기부하, 송풍동력, 제조장비 발열부하가 공조에너지 전체의 95%에 달하고 있음을 알 수 있다. 외기부하는 대규모 배기량 및 실내 양압량을 유지하기 위해 외기로부터 도입되는 공기의 절대습도 제어(노점제어)에 수반되는 에너지, 송풍동력은 실내 청정도 유지를 위해 순환되는 막대한 공기량을 운송하기 위한 에너지, 제조장비 발열부하는 각종 제조장치에 의한 발열(현열)을 냉각하기 위해 연간 냉방운전되는 드라이코일에서 소모되는 에너지를 의미한다. 클린룸내에 설치되어 있는 생산 장치로부터 다량의 배기가 발생해서 이에 따라

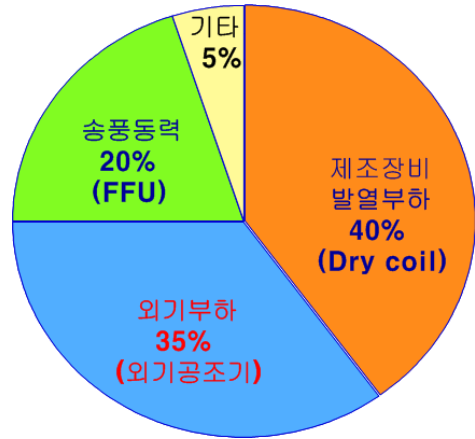


그림 3. FFU방식 반도체/디스플레이 클린룸의 공조에너지 분포

도입 외기량이 많아지고 공조와 관계되는 외기부하도 매우 커지고 있다. 이러한 공조 외기부하는 반도체/디스플레이 제조장비의 고도화에 수반해서 그

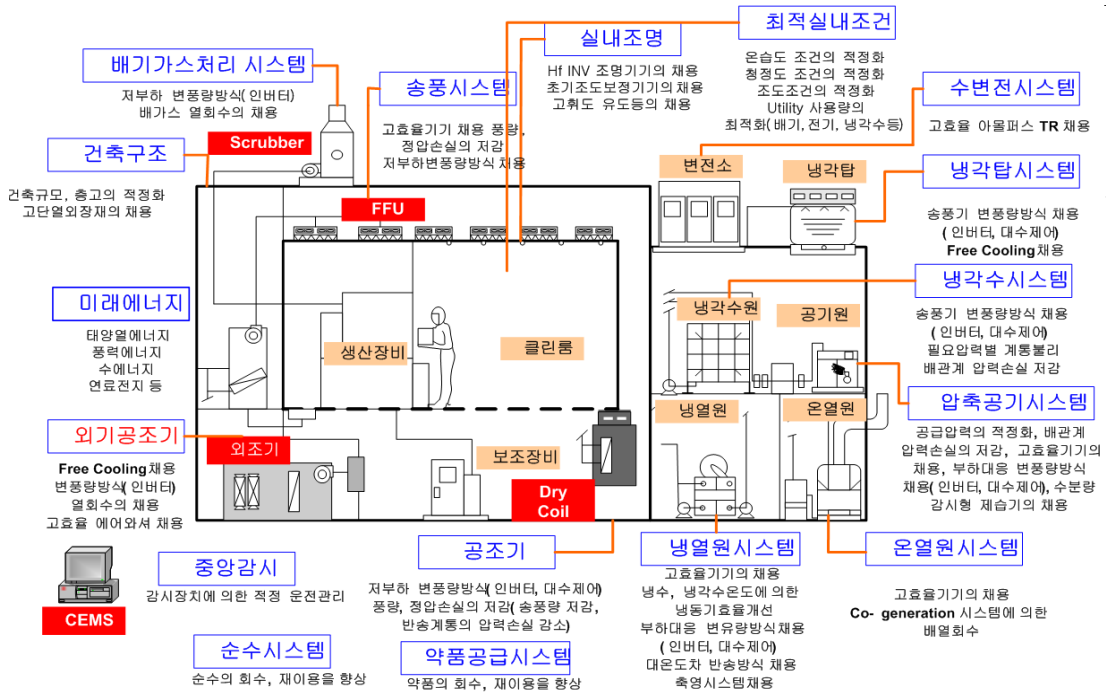


그림 4. FFU방식 반도체/디스플레이 클린룸에서의 에너지절약 검토항목

표 3. 반도체 공장의 클린룸 시스템 및 에너지 소비량의 변화추이

집적도	~64 M DRAM	64~256 M DRAM	256 M DRAM ~
클린룸방	축류팬 중앙순환 방식(Axial fan type)	중앙순환 + FFU 국소순환 병용방식	FFU 방식(FFU type)
클린룸시스템			
에너지소비량과공조열원설비의구성	<p>유틸리티설비 0.40KW/m<sup>2</sup> 공조·열원설비 2.15KW/m<sup>2</sup> 제조설비 3.54KW/m<sup>2</sup> 총합계 6.09KW/m<sup>2</sup></p> <p>생산배기계 10% 일반공조계 3% 열원계 54% CR 순환계 26% 외조기 계통 7%</p>	<p>유틸리티 설비 0.41KW/m<sup>2</sup> 공조·열원설비 1.41KW/m<sup>2</sup> 제조설비 3.54KW/m<sup>2</sup> 총합계 4.99KW/m<sup>2</sup></p> <p>생산배기계 8% 일반공조계 4% 열원계 60% CR 순환계 17% 외조기 계통 11%</p>	<p>유틸리티설비 0.41KW/m<sup>2</sup> 공조·열원설비 1.07KW/m<sup>2</sup> 제조설비 2.93KW/m<sup>2</sup> 총합계 4.41KW/m<sup>2</sup></p> <p>생산배기계 8% 일반공조계 5% 열원계 68% CR 순환계 9% 외조기 계통 10%</p>

절대량은 증가하는 경향이며, 이것의 감소는 열원 기기 용량 및 운전유지비의 절감에 크게 기여하게 된다. 이와 같이 반도체/디스플레이 공장의 공조 설비에 대해 클린룸 공기 청정도의 고도화에 대한 대응 및 에너지절약 방법의 개발은 중요한 과제가 되고 있다.

반도체/디스플레이 공장의 에너지절약 대책을 생산 설비를 포함한 설계 단계에서 실시하거나 현재 가동중인 클린룸에 대해서는 새로운 기술의 적용으로 에너지절약을 고려해볼 필요가 있다. 미니 인바이런먼트 시스템을 전제로 한 볼룸 타입의 FFU방식 클린룸 시스템에 적용가능한 에너지절약 항목을 그림 4에 나타낸다. 그림에서 효과적인 방법으로 초박형 FFU 시스템의 채용을 검토해 볼 필요가 있다. 그림 5는 에너지절약형 초박형 FFU 제품의 개략도를 보여주고 있다. 기존 FFU에 비해 소비전력을 20%만큼 절감시키면서 제품 높이를 2/3로 낮춘다는 목표를 가진 미래형 FFU이며 현재 중간단계인 15%의 소비전력 절감을 달성한 제품이

국내에서 개발완료되었다고 보고되고 있다.

이 초박형 FFU에 의한 에너지절약 효과를 상기에서 전술한 국내 메이저급 반도체/디스플레이 공장에 적용하였을 경우에 대해 분석한 자료를 정리하면 다음과 같다.

① 1200×600 mm FFU 1대당 소비전력을 평균 160 W로 가정하고 20 %의 소비전력을 절약하면 소비전력 절감량이 32W가 된다.

② FFU 10,000대에 대한 소비에너지 절약 효과를 산출하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \cdot 0.032\text{kW} \times 24\text{h} \times 365\text{일/년} \times 10,000\text{대} \times \\ & 2,500\text{kcal/kWh} \times 1\text{TOE}/10^7\text{kcal} \\ & = 701\text{TOE/년} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \text{부가적인 클린룸 냉방부하 절감효과} \\ & = 701\text{TOE/년} \end{aligned}$$

③ FFU 10,000대당 절감효과의 합계는 1,402 TOE/년이 된다.

④ 국내 메이저급 반도체/디스플레이 공장에 설치된 FFU 총 대수를 약 760,000대로 가정한다.

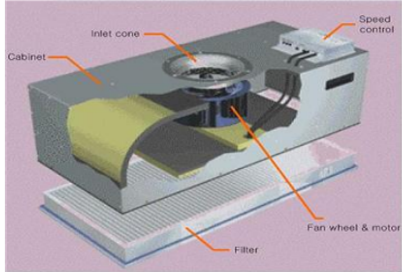
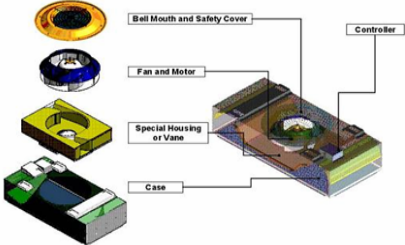
기 존 기 술	감 축 수 단 기 술
	
<p>- 기존에 설계되어 있는 <b>FFU</b>는 유닛의 높이가 천장의 공기가 지나는 통로를 많이 막으므로 압력손실이 증가하고 건설비용 또한 높다.</p> <p>- 유닛 내부의 <b>Fan</b>의 형상이 대부분 평판날개형팬으로 되어있음.</p>	<p>- 유닛 높이의 절감과 <b>Fan</b>의 효율증가 (<b>3차원 날개 최적 설계</b>)</p> <p>- 최적화된 고효율 <b>Motor</b> 개발 및 유닛 소음감소 방안 필요</p>

그림 5. 에너지절약 대책으로 초박형 FFU를 적용한 경우

분 야	FFU 설치수량	관련 근거
반도체 제조공장	200,000대	28개소 평균 약 7,000대/공장 (삼성 15개, 하이닉스 13개)
LCD 제조공장	560,000대	16개소 평균 약 35,000대/공장 (삼성 : 8개, LG 8개)

⑤ 국내 메이저급 반도체/디스플레이 공장에 설치된 FFU들을 모두 초박형으로 교체한다고 가정하면 106,552 TOE/년의 총 에너지 절감량을 얻게 된다.

FFU 10,000대당 절감효과(A) [TOE/년]	메이저급 클린룸 총 FFU 대수(B) [10,000대]	시 장 예 상 보급률 (C)	총 에너지 절감량 (D=A×B×C) [TOE/년]
1,402	76	1.0	106,552

⑥ 상기의 총 에너지 절감량은 다음과 같은 경제적 이득이 있게 된다.

- 공조에너지 절감효과:  $\frac{106,552}{1,869,720 \times 0.4} = 0.1425 = 14.25\%$  절감
- 전기요금 절감액: 106,552 TOE/년  $\times$  300,000원 = 31,965,600,000원/년 = 320억원/년
- 원유 절감액: 106,552 TOE/년  $\times$  500,000원 = 53,276,000,000원/년 = 533억원/년
- 온실가스 감축량: 106,552 TOE/년  $\times$  0.829 TC/TOE = 88,332 TC/년

### 2.3 FFU방식 클린룸의 외기부하 분석

FFU 방식 클린룸에서는 다종다양한 공조 및 열 이용 설비와 기기가 있으며 그 개요를 그림 6에 나타낸다. 그림에서 보듯이 냉열의 경우만을 살펴 보더라도 ① 외기의 냉각제습, ② 클린룸 실내의 현열냉각, ③ 생산장치의 직접 냉각, ④ 순수 원수의

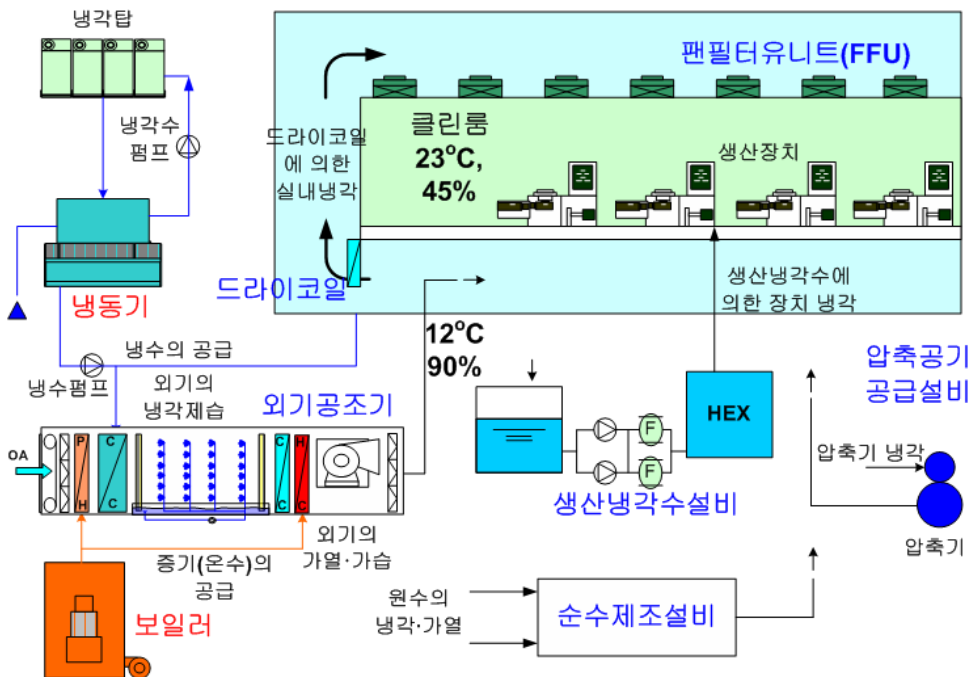


그림 6. FFU방식 반도체/디스플레이 클린룸 시스템의 공조/열이용 설비

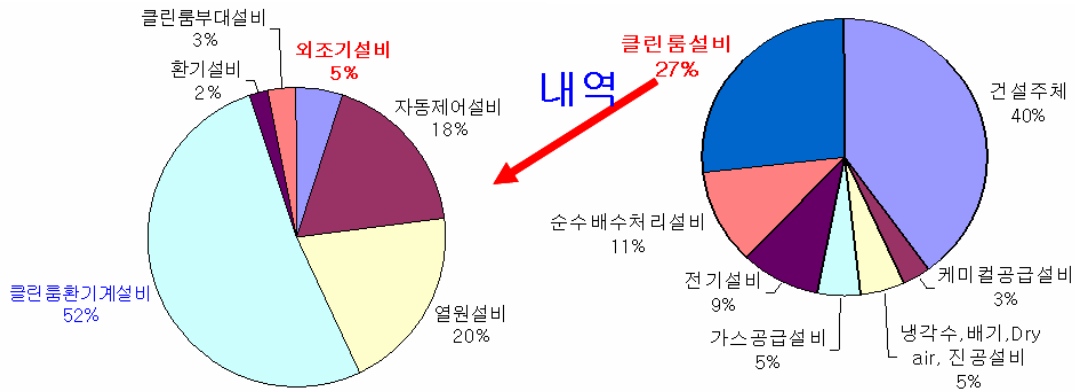


그림 7. 반도체/디스플레이 클린룸 시스템의 건설비용 구성

냉각, ⑤ 압축기 등의 유틸리티 기기의 냉각 등 많은 냉열 수요의 형태가 존재하고 각 수요에서 요구하는 품질(냉수 온도)이나 냉열의 이용기간이나 부하율도 각각 차이가 난다. 일반적으로 외기의 냉각제습 시스템에서는 5~7℃ 정도의 저온의 냉수가 필요하고, 이 계통에 의해 냉동기의 사양이 정해진다. 또, 클린룸의 현열 냉각 등에는 10~15℃ 정도, 생산장치 등의 직접 냉각에는 18~23℃ 정도의 중온 냉수가 요구된다.

FFU 방식 반도체/디스플레이 클린룸의 공조에너지 절약에 있어 앞서 논의한 초박형 FFU 시스템의 설치에 의한 절감효과에 상응하는 성과를 달성하기 위해 그림 7의 반도체/디스플레이 클린룸 시스템의 클린룸설비 건설비용 부분에서 외기공조기(외조기)에 주목할 필요가 있다. 외기공조기 설비는 클린룸설비 건설비용의 단지 5%만을 차지하고 있으나 반면에 상기 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 외기공조기가 담당하고 있는 외기부하의 공조에너지의 35%에 달하기 때문이다. 따라서 작은 비용으로 큰 에너지 절감효과를 볼 수 있다는 가능성이 존재한다는 것을 의미한다.

그림 8은 단순 에어와셔(air washer)를 장착한 증기 가습이 없는 외기공조기(outdoor air handling

unit, OAHU)를 가진 FFU 방식 반도체/디스플레이 클린룸의 공조시스템의 개략도를 보여주고 있다. 그림에서 클린룸의 실내는 생산장치의 발열이 크고 배기량도 크다. 실내는 온습도 유지를 위해 드라이코일(dry coil, DC)에 의한 연간 냉방운전을 실시하고 그곳으로부터의 반환 냉수는 18℃ 정도로 되고 있다. 한편, 외기공조기는 단순 에어와셔를 이용하여 외기로부터의 생성원(source)을 가진 암모니아(NH<sub>4</sub>), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 인(P), 나트륨(Na), 염소(Cl), 기타 유기물(organic) 등의 AMC(Airborne Molecular Contaminant) 및 입자의 제거와 가습을 동시에 행하고 있으며 냉각코일(cooling coil) 및 가열코일(heating coil)을 이용하여 외기 온습도 상태에 대응해서 냉각제습 및 가열을 실시하여 급기(SA)조건 12℃, 90%의 공기(노점 온도 10.5℃)를 클린룸 하부로 투입하고 있다. 그림에 도시한 드라이코일을 이용하는 FFU 방식 클린룸의 한가지 특이한 점은 동기(겨울철)에 있어서 클린룸 내부에서는 제조장비에 의한 냉각부하가 발생하여 냉동기의 운전이 필요한 반면에 도입 외기에 대해서는 보일러 운전에 의한 가열가습을 행한다는 점, 즉 냉각과 가열을 동시에 하는 것과 같은 모순된 에너지의 사용을 하고 있다는 점이다.



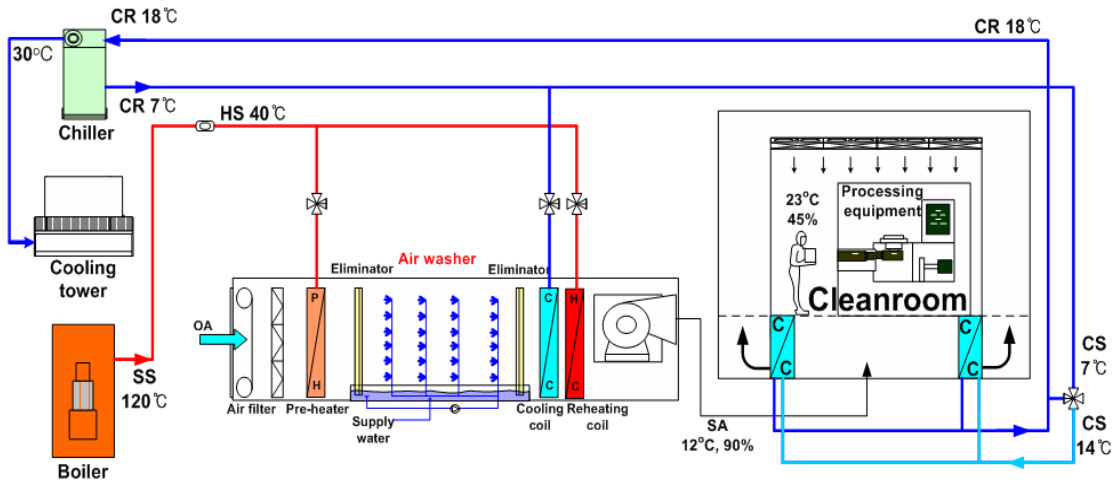


그림 8. FFU방식 반도체/디스플레이 클린룸 시스템의 공조시스템

그림에 도시된 단순 에어와셔 외기공조기의 일반적인 구성을 살펴보면 도입 외기는 필터→예열코일→에어와셔→냉각코일→가열코일→HEPA 필터의 순서로 외기공조기 내를 통과하여 클린룸으로 투입된다. 이때 외기공조기를 통과하는 공기의 속도는 2.5 m/s가 일반적이고 그림 9에 공기상태 변

화를 나타낸다. 외기공조기 출구 공기의 절대습도 (0.007895 kg/kg')를 일정하게 유지하기 위해서 에어와셔에 의한 단열가습 후 냉각코일을 사용한 노점 제어에 의해 냉각감습하고 그 후에 원하는 출구 공기 상태까지 가열한다. 동기에는 예열코일에 의한 가열 과정이 있다.

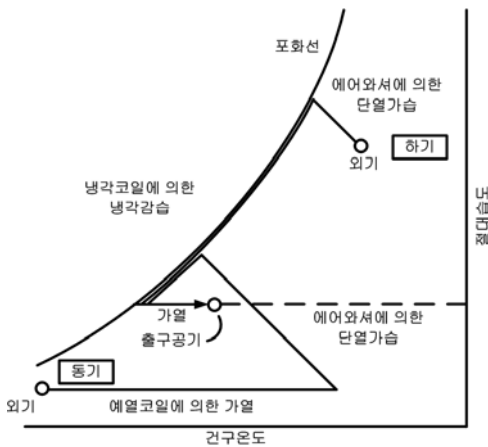


그림 9. 단순 에어와셔 외기공조기에서의 공기상태 변화

그림 9의 공기전도를 자세히 살펴보면 동기(겨울철)에 증기가습이 없는 에어와셔만의 가습으로 인해 외기공조기의 출구 공기를 소정의 절대습도에 정밀하게 맞추기 위해서는 공기상태 변화 경로의 중첩으로 인한 과냉각 열량 및 과가열 열량이 필연적으로 동반되게 됨을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 증기가습이 있는 에어와셔 외기공조기의 적용사례와 이때의 공기상태 변화를 보여주고 있다. 이 적용사례에 대한 공기상태 변화를 자세히 살펴보면 겨울철에 증기가습이 없는 단순 에어와셔의 경우에 비해 에너지의 중첩 사용에 의한 과냉각, 과가열과 같은 과잉의 에너지소비가 없음을 알 수 있다.

그림 12은 경기도 기흥지역에 대한 기상청의 2006년 동안의 1시간 간격 연간 운습도 데이터를

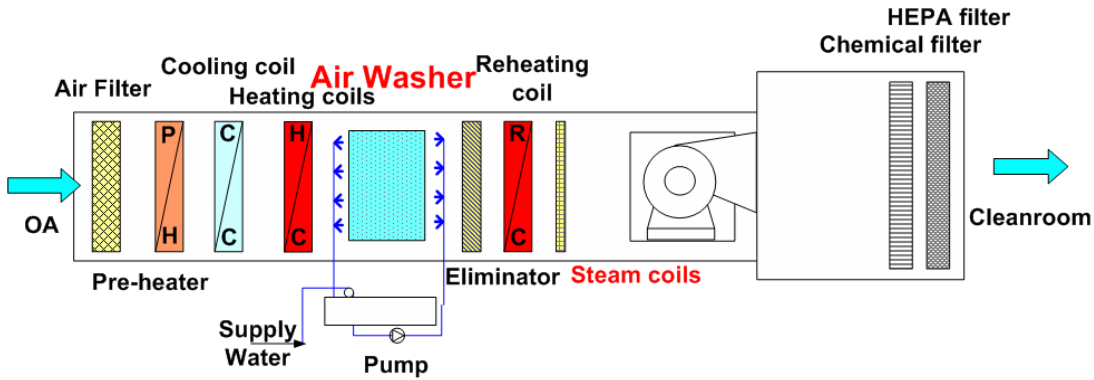


그림 10. 증기가습이 있는 에어와서 외기공조기 적용사례

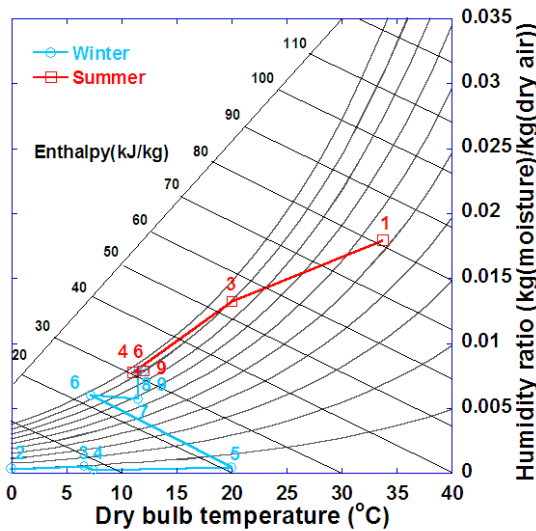


그림 11. 증기가습이 있는 에어와서 외기공조기의 공기상태 변화

공기선도상에 도시한 예를 보여주고 있다. 이 외기의 온습도점과 급기온습도점(12℃, 90%)과의 엔탈피 차의 누적값이 도입 외기에 대한 냉각제습 또는 가열가습의 연간 필요 에너지, 즉 외기부하가 된다. 그림 13에 이러한 연간 외기부하 계산방법을 간략하게 도식적으로 나타내었다.

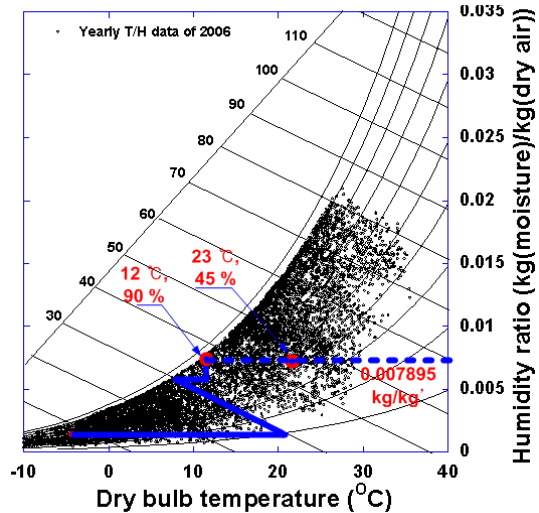


그림 12. 2006년도 기흥지역 연간 온습도 데이터 및 에어와서 외기공조기의 공기상태 변화

그림 14는 외기의 연간 엔탈피 변화를 도시하였다. 그림에서 기준엔탈피 31.88 kJ/kg'를 기준으로 낮은 엔탈피 영역은 가열가습이 요구되는 영역이며 높은 영역은 냉각제습이 요구되는 영역이다. 최종적으로 기준 엔탈피와 외기 엔탈피에 의해 만들어지는 면적을 연간을 통해 적분하게 되면 외기부하를 얻을 수 있다. 2006년도 기흥지역 온습도 기상데

이터인 그림 12로부터 외기량 10,000 CMH에 대해 증기가습이 있는 에어와서 외기공조기에 의한 연간 외기부하는 냉각부하 25.83 TOE/년, 가열부하 22.81 TOE/년로 얻어지게 된다.

외기량 10,000CMH에 대한 연간 외기부하 (기흥지역, 2006년) (TOE/year)

Cooling	Heating	Total
25.83	22.81	48.64

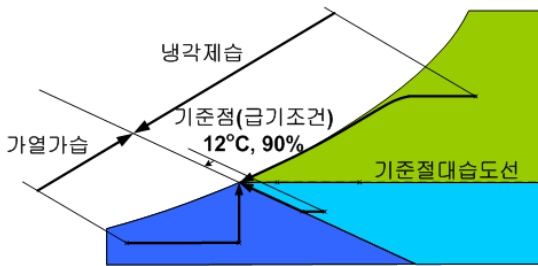


그림 13. 연간 외기부하 계산방법

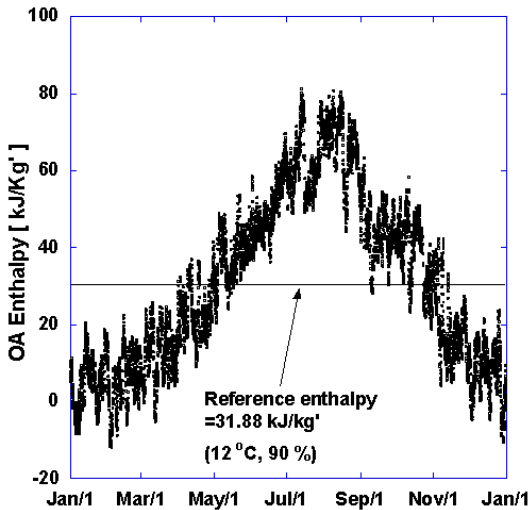


그림 14. 외기의 연간 엔탈피 변화(2006년, 기흥)

### 3. 반도체/디스플레이 클린룸용 에너지절약형 외기공조시스템

#### 3.1 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템

##### 3.1.1 시스템의 개요

배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템은 그림 15와 같이 구성되어 있다. 제1의 기능으로는 배기와 열교환을 실시하는 열회수 기능이다. 반도체 공장의 경우 생산 배기의 상당수는 고농도의 케미컬 가스 성분을 포함하고 있어 세정집진기(wet scrubber)에 의해서 처리되어 대기로 방출되고 있다. 본 배기 열회수식 외기공조시스템은 열회수의 대상을 이 세정 집진기로 해서 외기공조기와와의 사이에 열교환을 실시하는 것으로 배기로부터의 열회수를 하는 것이다.

세정집진기는 케미컬 성분을 포함한 배기를 산 또는 알칼리성의 용액으로 세정하고, 기액접촉에 의해 배기의 케미컬 유해성분을 제거해서 대기로 방출하는 시스템이며, 동시에 배기열도 세정수로 이동시키게 된다. 또, 반도체/디스플레이 공장의 배기의 상당수는 화학 성분의 실내 방출을 막기 위한 드래프트 부류로부터의 배기이며, 배기 온도도 클린룸 실내 조건에 가깝기 때문에 세정집진기의 세정수를 개입시켜 열회수를 실시하는 것이 가능해진다. 다만, 세정 용액은 화학 약품 용액이기 때문에, 공조기와 열회수를 실시하려면 열교환기를 중간에 개입시키고 간접적으로 실시할 필요가 있다.

외기공조기측은 에어와서에 열교환 순환수 코일을 내장하여 세정집진기에서의 배기 열회수 교환을 실시하는 시스템이며, 세정집진기에서의 세정수를 직접 에어와서 물로 이용하지 않는다.

이것은 열교환기의 트러블로 외기공조기의 공기가 오염되는 것을 방지함과 동시에 에어와서 수량에 의해 열교환 수량이 변화하는 것을 피할 수 있기 때문이다. 열회수는 물분무를 수반해서 행해지기

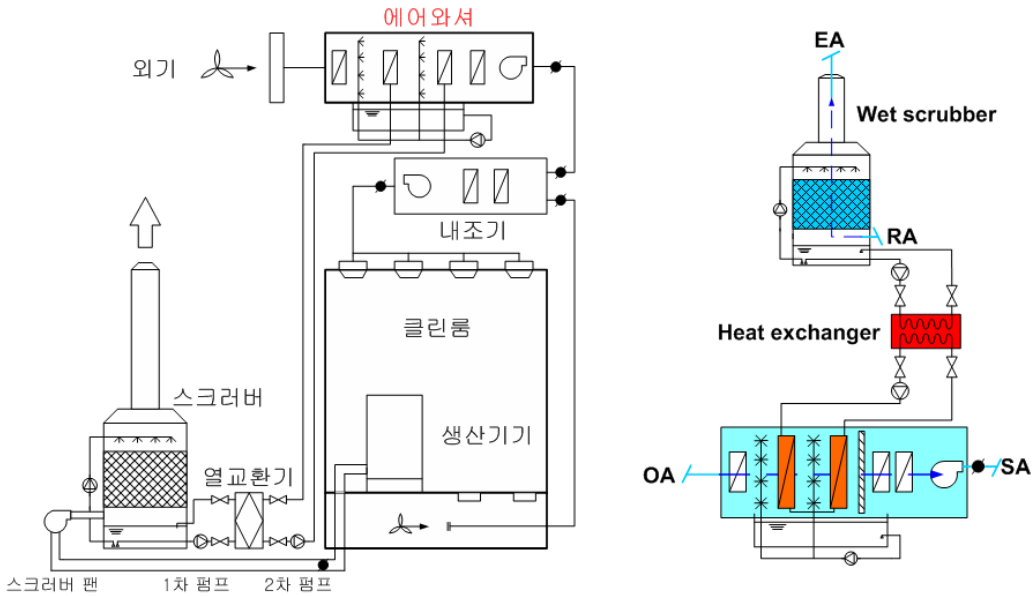


그림 15. 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 개략도

때문에 잠열을 포함한 전열교환이 된다.

또, 열회수중에 외기공조기측은 동기에 에어와셔를 통과하는 것에 의해 외기의 건구 온도를 내려 현열 교환 특성의 향상에 가세해서 에어와셔 수의 증발 효과에 의해 잠열을 포함한 회수 열량의 증가를 도모할 수 있다. 또, 세정집진기에 있어서도 하기에 있어 물의 증발에 의한 배기의 온도 저하에 의해, 외기와의 열교환 온도차가 확대하는 것에 의한 열교환 효율의 향상을 기대할 수 있다. 제2의 기능은 에어와셔에 AMC 등의 가스상 오염물 제거 기능을 부가해서 외기공조에 설치하는 것이다. 이는 이미 각 반도체/디스플레이 공장에서 설치되어 효과도 보고되고 있다.

### 3.1.2 에너지절감 효과 분석

본 배기 열회수식 에어와셔 외기공조시스템은 공조에너지 절감을 목적으로 하고 있기 때문에 연간 회수열량의 분석이 필요하다. 또, 입지 조건이 다른

경우에 대해서도 똑같이 연간 회수열량 산출 방법의 확립이 필요하게 된다. 따라서 수치 시뮬레이션에 의한 열회수량의 해석 기법을 개발해서 실측 결과와 비교 검토를 실시할 필요가 있다.

#### ① 수치해석 방법

수치해석에 있어서 시스템의 주어진 조건으로서 는 다음의 것을 들 수 있으며 간략히 설명하면 아래와 같다.

- Air washer : L/G
- Wet scrubber : L/G
- 중간 열교환기 : 1, 2차측 코일 수량

이러한 시스템 구성에 대해서, 도입 외기 및 시설로부터의 배기의 풍량과 온습도를 주어서 에어와셔 및 세정집진기 출구 공기의 온습도, 1차측, 2차측 코일 순환수 온도를 구하는 것에 의해서 회수 열량, 회수 효율 등을 계산하게 된다. 본 시스템에 대해서, 다음에 열거하는 3개의 열교환이 동시에 행해져 열평형 상태에 있다.

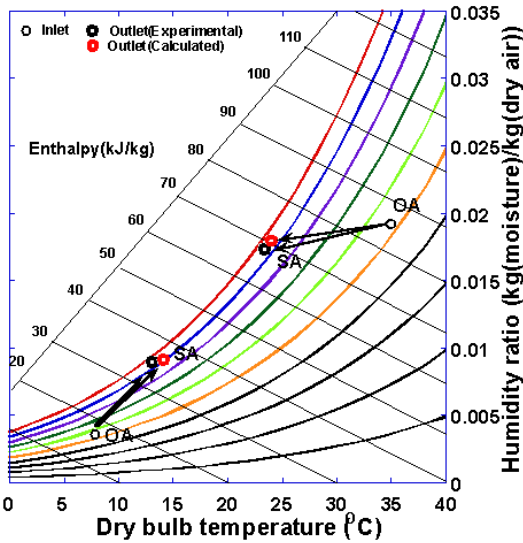


그림 16. 1,000CMH급 배기 열회수 에어와서 시스템에 의한 외기의 온습도 변화 실험 결과와 계산 결과의 비교

- 에어와서내에서의 외기와 열교환 코일
- 세정집진기 내에서 배기와 분무수
- 중간열교환기에 있어서의 코일 1·2차측 순환수 필자의 연구실에 구축된 외기량 1,000 CMH급 실험장치에 의한 실험 결과와 수치시뮬레이션에 의한 계산 결과를 그림 16에 나타낸다. 하기의 경우에 외기는 냉각제습, 배기는 분무에 의해 냉각가습되면서 상태가 변화한다. 동기의 경우에 외기는 가열가습, 배기는 냉각가습이 되며 양자는 공기선도상에서의 움직임이 다르다. 실험 결과와 계산 결과는 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있으며 본 수치시뮬레이션 기술을 이용하여 연간 열회수량을 분석할 수 있다

② 외기의 엔탈피에 의한 운전 모드의 분할

운전 모드를 그림 17에 도시한대로 환기(RA)의 엔탈피를 중심으로 외기(OA)의 엔탈피를 4개의 영역으로 분할해서 검토할 수 있다. Mode 1은 업동기 모드로서 에어와서 분무수의 단열가습에 의한 냉각

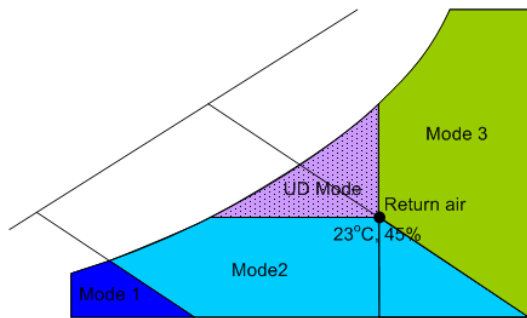


그림 17. 외기 엔탈피에 의한 시스템 운전모드의 분할

으로 에어와서 코일 표면이 동결할 우려가 있기 때문에, 에어와서 코일 1차측 공기를 모드 2의 영역까지 예냉코일(pre-heater)에 의해 가열할 필요가 있다. Mode 2는 외기의 엔탈피가 환기의 엔탈피보다 작은 영역으로, 가열가습 회수, 또는 냉각가습 모드이다. Mode 3은 외기의 엔탈피가 환기의 엔탈피보다 큰 영역으로 냉각 회수 모드이다. UD Mode는 외기가 환기의 절대 습도보다 높고, 한편 환기 건구온도보다 낮은 범위에 있는 경

표 4. 2006년도 기흥지역에서의 각 운전 모드의 출현시간수

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	UD Mode
Jan	496	248	0	0
Feb	434	238	0	0
Mar	235	509	0	0
Apr	0	710	0	10
May	0	332	105	307
Jun	0	16	244	460
Jul	0	0	388	356
Aug	0	0	717	27
Sep	0	111	241	368
Oct	0	291	103	350
Nov	66	611	0	43
Dec	383	361	0	0
Total	1,614	3,427	1,798	1,921

우이며 외기를 냉각제습 해야할 경우이지만 가열가 습되어 버리는 역열교환의 영역이다.

표 4에 그림 12의 2006년도 기흥지역 1시간 단위의 기상데이터로부터 분석한 각 운전 모드의 출현 시간수를 나타낸다. 역열교환의 운전 상태가 되는 UD mode는 중간기에 집중되고 있는 것을 알 수 있고 역열교환의 영역에 해당하는 외기 상태는 연간으로 총 1,921시간이 됨을 알 수 있다.

이 영역은 열교환이 작아지는 중간기이며 회수열량에는 그다지 큰 영향을 주지 않는다. 역열교환에서는 에어와서의 분무도 정지해야 하기는 하지만, 분무의 주목적이 가스상 오염물질의 제거에 있기 때문에 분무 정지는 할 수 없으므로 에어와서측 열회수펌프를 정지시켜 역열교환을 방지할 필요가 있다.

### ③ 연간 열회수량

수치 시뮬레이션에 의한 10,000 CMH급 배기 열

표 5. 2006년도 기흥지역에서의 수치시뮬레이션에 의해 계산된 연간 열회수량(외기량 10,000 CMH의 경우)

	기상청 2006년 기흥		Heat Recovery[kJ]	
	Temp. (°C)	Humi- dity	Cooling	Heating
Jan	-0.4	59.3		109,100,000
Feb	-0.1	53.6		107,300,000
Mar	5	51		75,310,000
Apr	11.3	56.6		35,770,000
May	18.2	59.8	7,520,000	
Jun	21.7	69.1	29,480,000	
Jul	23.6	82	41,400,000	
Aug	27.5	67.9	65,870,000	
Sep	21.3	59.1	26,970,000	
Oct	17.6	67.1	3,755,000	
Nov	8.4	58.3		53,970,000
Dec	1.2	60.1		99,150,000
Total			175,000,000	480,700,000

회수식 에어와서 외기공조기에 대한 연간 회수열량의 계산은 기흥지역의 2006년도 기상 데이터(기상청)로부터 1시간 마다의 온습도와 배기(RA) 온도는 23°C, 45%를 이용하였다. 역열교환이나 열회수가 펌프 동력을 밀도는 경우에 에어와서측(2차측) 열회수 펌프를 정지시키는 운전 제어를 실시했을 경우의 열회수 시뮬레이션 결과를 표 5에 나타낸다. 냉열 회수량은 약 175 GJ(4.17 TOE), 온열(가열) 회수량은 약 480.7 GJ(11.5 TOE), 연간의 총 회수열량은 약 655.7 GJ(15.67 TOE)가 된다.

이 배기 열회수식 외기공조시스템을 이천, 천안, 파주로 확대적용하여 수치시뮬레이션을 실시하면 연간 열회수량에 의한 에너지절약 효과를 국내 폐이저급 반도체/디스플레이 공장에 적용하였을 경우에 다음과 같은 분석한 자료를 얻을 수 있다.

지역	1,000,000 CMH당 절감효과(A) [TOE/년]	외기도입량(B) [1,000,000 CMH]	시장예상 보급률 (C)	국내 총 절감효과 (D=A×B×C) [TOE/년]
삼성전자(기흥/화성)	1567	9	1.0	14,103
하이닉스(이천)	1590	4	1.0	6,360
삼성전자/하이닉스 (천안/청주)	1670	5	1.0	8,350
LG필립스(파주)	1633	3	1.0	4,899
총 합		21		33,712

총에너지 절감량(A) [TOE/년]	IPCC 탄소배출계수(B) [ton C/TOE]	총 온실가스 저감량(C=A×B) [ton C/년]
33,712	0.829	27,947

상기의 총 에너지 절감량은 다음과 같은 경제적 이득이 있게 된다.

· 공조에너지 절감효과:  $\frac{33,712}{1,869,720 \times 0.4}$

= 0.0451=4.5% 절감

· 전기요금 절감액: 33,712 TOE/년×300,000원  
= 10,113,600,000원/년 = 101억원/년

· 원유 절감액: 33,712 TOE/년×500,000원  
= 16,856,000,000원/년 = 169억원/년

본 배기 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 FFU 방식 반도체/디스플레이 클린룸으로의 도입은 전술한 초박형 FFU 시스템의 도입으로 인한 연

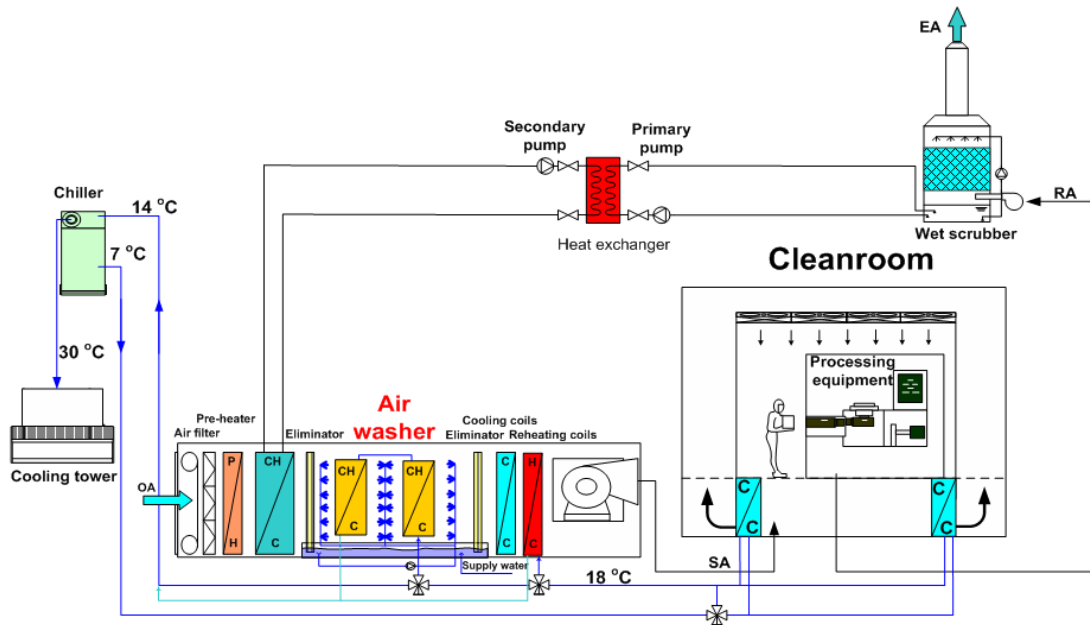


그림 18. 하이브리드 열회수식 에어와셔 외기공조시스템의 개략도

간 에너지절감량 106,552 TOE에 비해서는  $\frac{33,712}{106,552} = 31.6\%$ 의 수준에 해당되며 초박형 FFU에 비해 경쟁력을 가지기 위해서는 추가적인 에너지절감 방안이 요구된다.

## 3.2 하이브리드 열회수식 에어와셔 외기공조시스템

### 3.2.1 시스템의 개요

반도체/디스플레이 클린룸용 에어와셔 외기공조시스템의 에너지 절감력을 더욱더 강화시킬 수 있는 하이브리드 열회수식 에어와셔 외기공조시스템에 대한 개략도를 그림 18에 도시하였다. 외기공조기는 외기가 유입되는 쪽으로부터 필터, 열회수코일, 냉각/가열을 하는 열교환 코일/에어와셔의 다단 조합, 재열용 가열코일, 송풍기, 온습도 조절을 위한 건구온도 및 노점온도 센서로 이루어진다. 에어와

셔와 조합된 열교환 코일에는 냉각제습을 위한 냉열원으로서 냉동기로부터의 냉수(7°C)와 가열가습을 위한 온열원으로서 반환 냉수(18°C)가 선택적으로 시리즈로 공급되어, 코일 출구측은 최종적으로 냉동기의 반환 냉수가 된다. 또 재열용 코일의 온열원으로서도 반환 냉수(18°C)가 공급되게 된다. 자동제어를 위해 외기의 냉각제습에는 필요량에 대응해서 냉수측 밸브가 열리고 가열가습에는 반환 냉수측 밸브가 열린다. 또 급기(SA)의 건구온도는 통상 노점온도를 만족하고 나면 실내의 냉각부하를 처리하기 위해 낮은 것이 좋지만, 이것도 필요에 대응해서 반환 냉수량을 제어한다.

본 시스템의 커다란 특징은 열교환 코일과 에어와셔의 복수단 구성에 의해, 에어와셔의 분무식 화식 가습과 함께 나타나는 건구온도의 저하를 이용해서 18°C의 저온 가열원에서 노점온도 10.5°C까지의 충분한 가습량을 얻을 수 있는 점이다. 열교환 코일과 에어와셔의 능력 혹은 조합단수를 늘

표 6. 하이브리드 열회수 방식에 따른 2006년도 기흥지역에서의 수치시뮬레이션에 의해 계산된 연간 열회수량 (외기량 10,000 CMH의 경우)

외기공조기 열회수 방식	연간 외기부하			기대효과	
	Cooling	Heating	Total	설치비용 %(추정)	연간 열회수량 (TOE/year)
단순 에어와셔	25.83	22.81	48.64	100	0
배기 열회수식 에어와셔	21.66 (-4.17)	11.31 (-11.5)	32.97	128	15.67
냉동기냉각수 열회수식 에어와셔	21.66 (-4.17)	0 (-22.81)	21.66	140	26.98
반환냉수 열회수식 에어와셔	21.66 (-4.17)	-22.81 (-45.62)	-1.15	140	49.79

려나가면, 클린룸 실내 설정 온습도 23℃, 45%의 노점온도 10.5℃에 대해서 이론적으로 10.5℃의 가열원이 있으면 된다. 또 열교환 코일 출구로부터의 냉수 및 반환 냉수의 반환은 어느 쪽도 냉동기로 돌아가기 때문에, 냉각/가열 겸용의 열교환이 가능해진다.

### 3.2.2 에너지절감 효과 분석

그림 19에 기흥지역에서의 1시간간격의 기상청 연간 온습도 데이터와 외기공조기에서의 동기의 공기상태 변화를 도시하고 있다. 증기압에서는 100% RH까지의 기습은 결로 등 상태가 좋지 않기 때문에, 분출온도를 높이지 않으면 안되지만, 클린룸 내부는 연간 냉방을 할 필요가 있기 때문에, 공급외기는 절대 습도를 만족한 상태에서 건구온도가 낮은 편이 에너지절약이 된다. 또 클린룸으로의 급기 부분에서의 냉각부하가 적을 경우, 어느 정도의 재열을 할 필요가 있다.

급기 온습도 조건을 12℃, 90%RH(31.88 kJ/kg', 0.007895 kg/kg', 10.5℃ DP)로 할 경우의 기흥지역에 대한 계산결과를 표 6에 나타낸다. 단순 에어와셔 외기공조시스템에 있어서의 연간 필요에너지는 냉각제습(cooling)+가열가습(heating)이므로 25.83+22.81=48.64 TOE이지만, 배기 열회수식 에어

와셔 외기공조시스템의 경우는 48.64-15.67=32.97 TOE가 된다.

또, 배기 열회수에다가 냉각탑으로 보내질 냉동기냉각수의 열회수를 추가로 실시하면 표에서 냉동기냉각수 열회수식 에어와셔 외기공조시스템이 되어 48.64-26.98=21.66 TOE가 되고 배기 열회수식에 냉동기로 반환되는 반환냉수의 열회수의 실시를

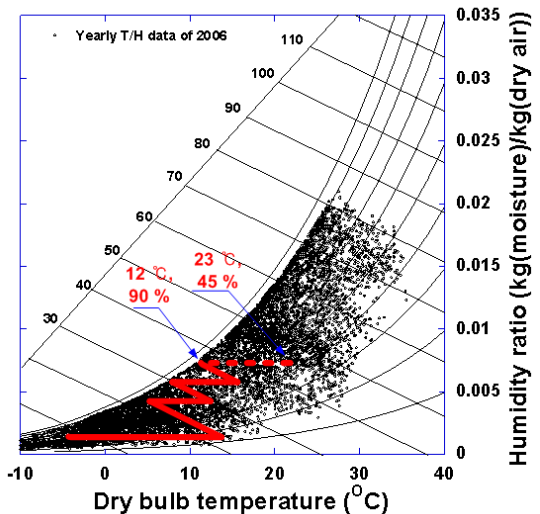


그림 19. 하이브리드 열회수식 에어와셔 외기공조기에서의 동기(겨울철)의 공기상태 변화



추가하면 표에서 반환냉수 열회수식 에어와서 외기 공조시스템이 되어  $48.64-49.79=-1.15$  TOE가 된다. 즉, 냉각제습량-배기열회수량-가열가습량으로 된다. 에너지 소비량에서 마이너스 표시가 있는 것은 에너지 절감율이 외기부하 100%를 넘는다는 것을 의미하며 외기부하가 전혀 없는 외기공조시스템의 개발이 이루어진 것으로 판단할 수 있다. 이것은 유입되는 외기의 가열가습 부하가 일부 배기열로부터의 열회수량으로 대체되고 일부는 반환 냉수에 대한 냉각능력으로 되고 이 연간 합계량이 냉각제습의 부하량보다도 크기 때문에, 외기공조기가 냉각열원기기가 되는 것이다.

본 하이브리드 열회수식 에어와서 외기공조시스템의 국내 메이저급 반도체/디스플레이 클린룸으로의 도입을 고려하면 총 에너지절감량은 메이저급 공장들의 총 외기도입량 2,100만 CMH에 대해  $49.79 \times 2,100 = 104,559$  TOE가 되며 이는 전술한 초박형 FFU 시스템의 도입으로 인한 연간 에너지 절감량 106,552 TOE에 비해서는  $\frac{104,559}{106,552} = 98.1\%$ 의 수준에 해당된다. 따라서, 클린룸설비 건설비용의 단지 5%만의 투자를 통해 초박형 FFU의 설치에 상응하는 에너지 절감량을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 맺음말

본고에서는 실내발열이 많은 연간 냉방운전이 요구되는 FFU 방식 반도체/디스플레이 제조용 클린룸의 외기부하에 주목해서 에너지절약형 외기공조시스템의 일환으로 하이브리드 열회수식 외기공조시스템에 대한 에너지절감 효과 분석을 기흥지역을 대상으로 실시하였다. 과거에는 부하로 생각되었던 외기의 가열가습 에너지를 일부 배기 열회수로 보충하고 일부 반환냉수의 냉각능력으로 이용하는 것으로 인해 2배의 에너지절약 효과를 얻을 수

있음을 확인하였다. 따라서 조건에 따라서는 외기의 연간 필요에너지, 즉 외기부하가 전혀 없는, 심지어는 마이너스가 될 수 있는 획기적인 에너지절약 효과를 얻을 수 있는 외기공조시스템의 개발이 실현 가능함을 확인하였다.

한편, 필자는 본 원고를 마름하면서 국내 모 대기업의 4선 전략을 문득 떠올리게 된다. 즉, 선견(先見), 선수(先手), 선제(先制), 선점(先占)이라는 시장을 지배하기 위한 4가지 전략을 생각하게 된다. 300 mm 반도체 웨이퍼 수십장을 더 가공해서 에너지 비용을 커버해 버리면 되겠지라는 자세는 세계 1등을 향해 나아가기 위한 우리의 전략은 아니라고 본다. 필자가 아는 한, 아직까지 국내 반도체/디스플레이 공장에 에너지절약 개념을 본격적으로 도입한 곳이 단 한군데도 없다는 현실이 우려되지 않을 수 없다. 가장 높이 나는 새가 가장 멀리 바라볼 수 있듯이, 2013년도에 편입될 온실가스 의무감축 및 1배럴당 100달러의 고유가라는 기정 사실을 받아들여야 하는 우리의 처지를 인식하고 에너지 절감이 반도체/디스플레이 산업의 발등의 불이 된 당장 눈앞의 현실이라는 적극적인 자세를 요구하고 싶다. 선견지명으로 반도체/디스플레이 세계시장을 계속적으로 선점하기를 바라는 간절한 마음으로 본고를 마감하고자 한다.

#### - 참고문헌 -

1. 유경훈, 2004, “클린룸 설비의 에너지절약 대책”, 공기청정기술, 제17권, 제4호, pp. 1-19, 한국공기청정협회.
2. 양성철, 2005, “반도체 클린룸에서의 에너지절약 대책”, 공기청정기술, 제18권, 제3호, pp. 15-33, 한국공기청정협회.
3. 양성철, 유경훈, 2005, “LCD 클린룸에서의 에너지절약 대책”, 공기청정기술, 제18권, 제3호, pp. 34-46, 한국공기청정협회.

4. 유경훈, 2006, “클린룸 에너지절약”, 제6회 클린룸 기술 전문가 교육 자료집, 한국공기청정협회.
5. 유경훈, 2007, 반도체/LCD 클린룸 에너지절약 기술 개발, 에너지자원기술개발 중대형과제 2 차년도 공개평가 보고서, 에너지관리공단.
6. 柏瀬 芳昭, 2001, “クリーンルーム設備における省エネルギー”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 1월호, pp. 51~53.
7. 田中 宣雄, 2002, “半導體工場における省エネルギー対策”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 9월호, pp. 16~22.
8. 野澤 英美, 2002, “半導體工場のエネルギー消費變動要素”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 9월호, pp. 22~26.
9. 木暮 健兒, 2001, “LCD工場ライン構築におけるエネルギー有効活用”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 4월호, pp. 12~21.
10. 藪原 要治, 2002, “半導體デバイスメーカーにおける省エネルギー活動の概要”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 9월호, pp. 1~3.
11. 大下 之, 2005, “半導體工場空調設備の省エネ対策”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 7월호, pp.11~13.
12. 松木 幹雄 et al., 2005, “省エネルギー型外調機”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 10월호, pp.50~54.
13. 渡部 純三, 2005, “クリーンルームにおける高効率熱源システムのCO2削減対策”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 12월호, pp.1~4.
14. Hogan, H., 2007, “Going for the green”, CleanRooms, July, pp.10.
15. Fujisawa, S., Moriya, M., Yosa, K., Ikuta, M., Yamamoto H. and Nabeshima, Y., 2001, “Removal of chemical contaminants as well as heat recovery by air washer”, Proc. of the 19th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 166-168.
16. Fujisawa, S., Moriya, M., Yosa, K., Nishiwaki, S., Yamamoto H., Katsuki, T., Nabeshima, Y. and Oda, H., 2002, “Removal of gaseous chemical contaminants as well as heat recovery by air washer (Part 2)”, Proc. of the 20th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 162-165.
17. Yamamoto H., Katsuki, T., Fujisawa, S., Yosa, K., Nishiwaki, S., Nabeshima, Y. and Oda, H., 2003, “Removal of gaseous chemical contaminants as well as heat recovery by air washer (Part 3)”, Proc. of the 21st Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 151-154.
18. Shiroma, S., Tomita, H., Yoshizaki, S. and Suzuki, K., 2002, “Heat recovery system for exhaust air by the water spray”, Proc. of the 20th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 260-262.
19. Ebine, T., Yoshida, H. and Nishikawa, M., 2003, “Precision humidity control system by wetted-element humidifier and the cost reduction effect”, Proc. of the 21st Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 72-74.
20. Ebine, T., Yoshida, H., Nishikawa, M. and Taura, H., 2005, “Precision humidity control system by wetted-element humidifier and the cost reduction effect”, Proc. of the 23rd Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination Control, pp. 190-193.