

클린룸의 에너지 효율 (Cleanroom Energy Efficiency)

출처 : ASHRAE JOURNAL, October 2010, pp.24-32

저자 : Paul A. Mathew; William Tschudi (ASHRAE 회원)

번역 : 경 대 호

(주)선엔지니어링 (ddhojn@naver.com)

클린룸은 에너지 집약적으로 청결이 요구되기 때문에 높은 비율의 공기순환이 필요 하며 정압이 높고 냉각부하가 크게 요구되는 시스템이다. 본 연구는 광범위하게 설치된 클린룸의 에너지 소비를 보여주며, 설비책임자가 클린룸설비에서 미처 알아차리지 못하는 에너지 효율에 있어 동급의 클린룸설비와 어떠한 상관관계가 있는가 하는 것이다. 성능측정과 벤치마킹은 자체시설과 타시설을 비교하고 주어진 시설의 성능을 향상시키는 효과적인 방법이다.

성능측정과 벤치마킹은 여러 다른 시설을 비교하고 주어진 설비의 성능 및 투입시간을 추적하기 위한 효과적인 방법인 것이다. 이 장은 매니저가 그들의 클린룸 에너지 효율을 평가 추적하고 관리하거나 신축 설비의 에너지효율의 목표치를 설정하여 사용할 수 있도록 성능측정과 벤치마킹의 열쇠를 제공하는 것이다. 이들은 환기비율(air change rates), 공기조화(W/cfm) 및 필터의 압력강하 등 시스템레벨의 성능측정을 포함 한다. 20 개 이상의 클린룸의 운전데이터를 제공하게 되는데, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)에 의하여 유지되었던 클린룸의 운전데이터를 벤치마킹 데이터 일부분을 성능측정에 벤치마킹 했던 내용이다. 미국 내 28개 반도체 클린룸의 총생산효율 성능측정과 Fabs21(Benchmarking

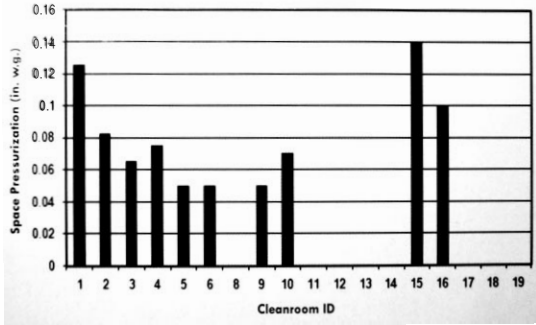
Energy & Water Use in Semiconductor Fabrication Facilities)에서 보고된 데이터베이스도 제공된다.

환경조건 성능측정(Environmental Condition Metrics)

클린룸 에너지 사용을 감소시키기 위한 최초의 방법은 클린룸 내에서 실질적으로 요구되는 공정이 최적화된 운전환경에 맞게 조성 되었는가와 불필요하게 엄격하지 않는가를 확실하게 하는 것이다. 클린룸환경조건은 자주 제어되며 공간의 여압, 온도 및 상대습도 등을 포함한다.

공간여압(Space Pressurization)

이 성능측정은 클린룸과 주변공간과의 차압을 칭하는 것이다. 초과되는 여압은 팬정압의 증가를 요구하며 에너지 사용이 증가 된다. 클린룸의 공간차압을 최소화하기 위하여 청정도 분류가 공간여압의 최소화와 낮은 에너지사용에 대한 팬정압의 필요성을 확실히 하는 것이다. 그림 1에서 보여주는 것은 공간의 여압이 벤치마킹 데이터 상 0.05 in.w.g.에서 0.14 in.w.g. (12 Pa에서 35 Pa) 범위를 지정한다. 복합적인 청정지역 설비에서 공



[그림 1] LBNL 벤치마킹 데이터 상 공간여압 값

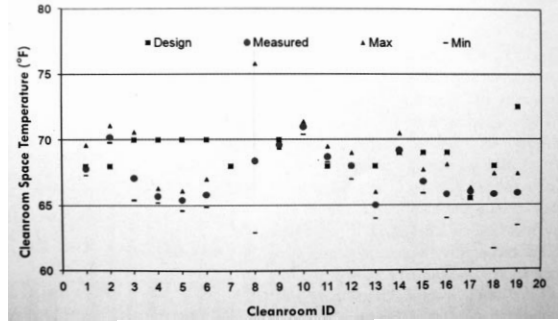
간의 레이아웃은 압력편차의 폭을 한정짓는 것을 만족해야 한다.

공간 온도와 습도 (Space Temperature and Humidity)

공간의 온도와 습도의 범위를 좁히기 위하여 보통 냉각, 재열 및 급기의 가습에 대부분의 에너지를 필요로 한다. 운전범위의 폭을 넓게 허용하면 공간의 온도와 습도를 위한 에너지의 사용을 줄일 수 있다. 만일 현재의 클린룸이 온·습도를 위한 좁은 범위의 운전조건을 갖고 있다면 실제 운전범위가 좁은 조건에 부합되는지 어떠한지를 주의깊게 재검토 하여야만 한다. 그림 2와 3은 벤치마킹 데이터 내에 넓은 범위의 온·습도를 보여준다. 어떤 설비에서는 측정 온도가 설계 값 이하 2.7℃까지 이었다. 상대습도 운전범위는 일반적으로 설정점의 5%내지 10% 사이 이었다.

공기순환 시스템의 성능측정 (Airflow System Metrics) 회전비율 (Recirculation Air Change Rates)

이 성능측정은 클린룸의 시간당 공기재순환횟수로 다루어진다. 그림 4는 벤치마킹 데이터 값 ISO Class 5 클린룸의 재순환 공기의 변환 비율을 보여준다. 클린룸의 재순환 공기비율은 청정도에 만족스러워야 하며 운전 중 요구되는 먼지



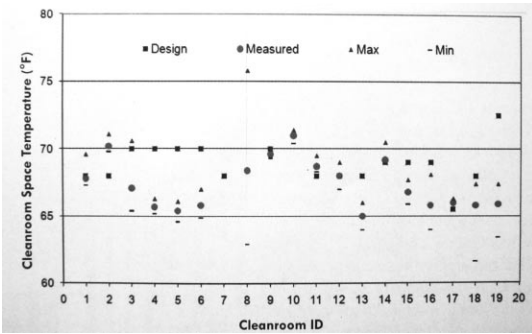
[그림 2] LBNL 벤치마킹에 근거한 설계온도와 측정온도

수보다 많아서는 않된다. 벤치마킹 데이터는 동일한 청정도를 갖는 여러 다른 클린룸에서 다양한 순환공기비율을 보여준다. 필요한 재순환횟수 (ACH or ACR)는 설계 시 잘 이해하는 것이 필요할 뿐만 아니라 총 오염물질에도 달려 있는 것이다. 그러므로, 보수적인 설계자는 클린룸의 청정도가 300 ach 이면 적정함에도 500 ach로 운전하게 할지도 모른다. 벤치마킹 공기순환 비율은 첫 단계로 잠재적인 효율을 명확히 하는데에 도움이 된다. 요구 제어(Demand Control)에 의한 환기(즉, 입자의 모니터링에 기반을 둔 환기회수의 변환)는 여압에 기반을 두는 대신에 재순환을 만족케 하는 하나의 방법이다. 그러나 지정 값이 있는 한, 최소의 순환은 변화무쌍한 흐름에도 유지되어야만 할 것이다.

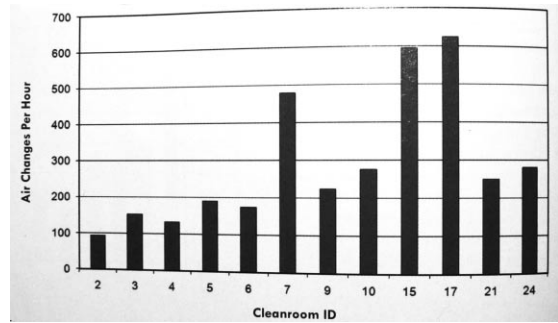
공기조화기의 공기흐름 효율 (Air-Handling System Airflow Efficiency)

이 성능측정은 공기의 흐름 상 필요하게 되는 총 팬동력에 대한 공기조화기 효율의 총합으로 수행한다. 그것은 클린룸의 기계적 시스템을 통해 얼마나 효율적으로 이동되었나 하는 총 측정치를 제공한다. 공기순환 효율은 배기시스템은 물론 RCU(Recirculation Units), MAU(Make up Air Units) 등에 대하여 각각 분석될 수 있다. 그림 5 및 6과 같이 벤치마킹 데이터 값은 광범위한 순환 범위를 보여준다.

RCU 벤치마크 데이터는 평균 순환 효율이



[그림 3] LBNL 벤치마킹에 근거한 설계상대습도와 측정 상대습도



[그림 4] LBNL 벤치마킹에 근거한 ISO Class 5 크린룸의 공기재순환비율 ISO Class 5는 FS 209의 Class 100임.

0.43 W/cfm(0.9 W/L/s)이었는데, 여압급기챔버에 대한 팬-필터유닛 값이 0.63 W/cfm (1.34 W/L/s)와 비교했을 경우 이다. 몇 가지 동작이 순환 효율을 향상시키기 위하여 작용 할 수 있는데:

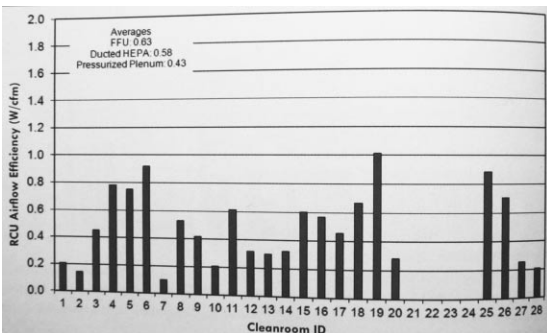
- *시스템의 압력강하를 줄인다.
(즉, 과도한 두께의 필터를 제거하거나, 더러운 필터를 교체하거나, 압력손실이 적은 필터를 사용하는 등 구성요소를 제거하거나 교체하는 등에 의해)
- *팬 시스템 효율을 향상시킨다.
(즉, 모터, 벨트 및 운전방식의 개선에 의해)
- *효율적 팬-필터 유닛의 선정.
(즉, 압력조건에 맞는)
- *새로운 시스템의 설계(즉, 변속팬, 낮은 압력손실 필터, 낮은 압력손실덕트 및 급기챔버 등)

그림 7은 RCU의 순환효율과 천정 HEPA필터 출

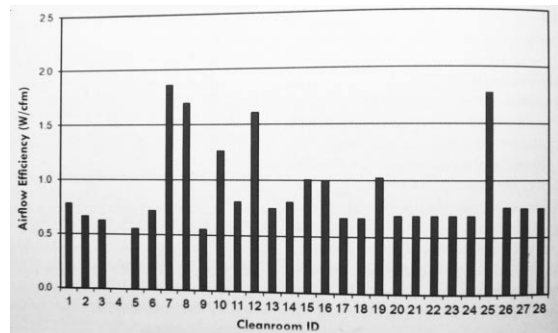
구풍속과의 관계를 보여준다. 유사하게도 그림 8은 RCU의 순환효율과 천정 필터의 적용 범위와의 관계를 보여준다. 비록 천정필터의 유속과 필터의 적용 범위가 공기흐름의 효율에 영향을 줄 수 있다 하더라도 데이터가 제시하는 바, 공기흐름 효율과 천정필터의 출구풍속 또는 천정필터의 적용 범위 등 사이에는 강력한 상호관련이 없다는 것이다. 다음 섹션은 필터의 압력강하가 가장 중요하다는 것을 보여준다.

HEPA 필터의 압력강하 (HEPA Filter Pressure Drop)

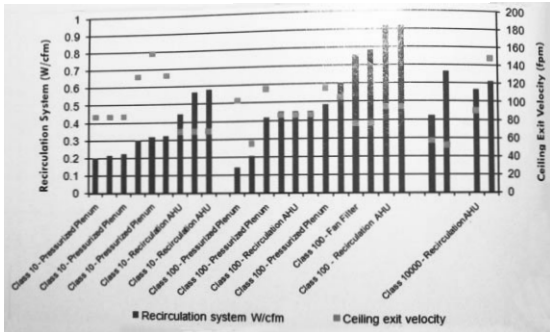
이 성능측정은 RCU 혹은 MAU에서 필터를 통한 압력강하를 취급 한다. 벤치마킹 데이터는 그림 9와 10에서 보여주듯 주어진 청정도 내에서 높은



[그림 5] LBNL 에 근거한 RCU의 공기순환 효율



[그림 6] LBNL에 근거한 MAU의 공기순환 효율

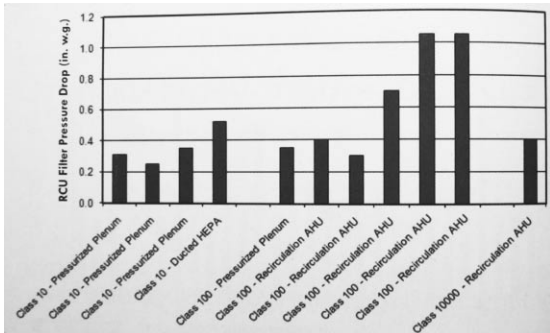


[그림 7] 재순환시스템과 천정 필터의 토출풍속과의 상관관계

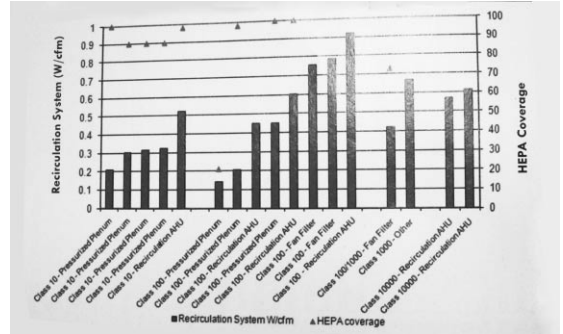
변화를 보여준다. 그림 11에서는 RCU순환 효율과 필터 압력강하 사이의 강한 관계를 보여준다. 낮은 압력강하의 필터는 RCU의 에너지 사용을 감소시키는 중요한 역할을 한다. 마찬가지로 필터의 증가는 덕트 또는 챔버 시스템을 통틀어 낮은 압력강하 시스템 이어야 한다.

냉·난방 시스템 측정 (Heating and Cooling System Metrics)

클린룸을 위한 칠러와 보일러의 효율을 평가하기 위한 기본적인 성능측정과 벤치마킹은 일반 상업 및 공업용 빌딩에 일반적으로 사용되는 것과 다르지 않다. 이러한 것들은 칠러플랜트 효율(kW/ton), 실제 최대부하 대 설치용량, 보일러효율(%), 펌프효율(hp/gpm[W/L/s]) 등이다. 이러한 것들은 다른 곳에 좋은 자료가 있기 때문에 이곳



[그림 9] 재순환시스템효율과 필터를 망라한 상관관계

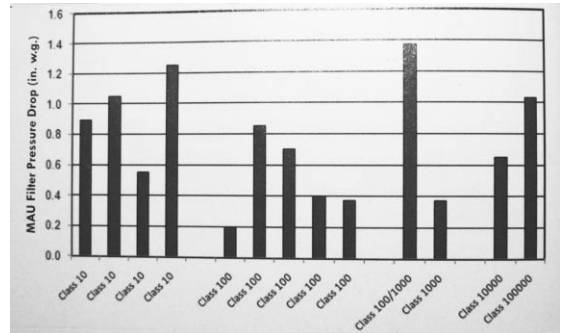


[그림 8] 재순환시스템 효율과 필터의 상관관계

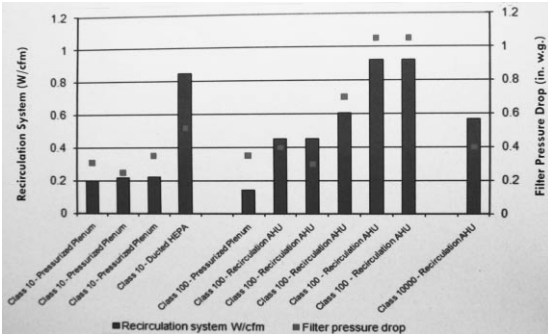
에서는 논의하지 않기로 한다. 그러나, 한 가지 자주 간과하는 성능측정의 핵심은 재열에너지의 총합이다. 클린룸의 재열에너지 사용은 매우 중요한 것으로 필요한 온도와 엄밀한 상대습도, 변동폭이 넓은 냉각부하, 혹은 잘못된 자동제어의 설정 또는 부족한 자동제어의 통합(즉, 독립적인 RCU와 MAU 제어)에 사용된다. 재열에너지사용의 평가에 대한 잘 확립된 성능측정 방법은 없으나 재열에너지사용 요소라든가 총 에너지사용량에 대한 재열에너지의 비율 등 정의된 성능측정을 제안할 수 있다. 이렇게 하기 위한 최상의 실질적인 벤치마킹은 0%일 수도 있다(즉, 온도제어를 위하여 재열에너지사용을 완전히 제거).

반도체설비에서 에너지 사용 (Energy Use in Semiconductor Facilities)

일반적인 설비수준의 에너지사용 성능측정은



[그림 10] LBNL에 근거한 MAU 필터의 압력강하



[그림 11] RCU W/cfm과 필터 압력강하 사이의 상관관계

(Btu/ft² [kWh/m²]) 에너지사용이 집중되는 대부분 설비의 일반적 비교 방법이다. 그렇지만, 그러한 성능측정은 클린룸에 대하여는 그렇게 효과적이지 못하다. 왜냐하면 클린룸 에너지사용은 보통 클린룸별로 다양하고 광범위한 공정부하에 의해 취급되기 때문이다. 만일 클린룸 내부에서 공정의 성능측정이 정량화 된다면, 단위공정 당 클린룸 에너지사용 총효율을 측정하는 것을 포함하여 가능하다. 예로서, 반도체 조립 설비가 두 개의 기초 단위:실리콘 웨이퍼 1cm² 와 각 웨이퍼에 여러 개의 마스크로 나뉘어진 1cm² 의 웨이퍼. 이들의 성능측정은 두 설비 총에너지 사용의 표준

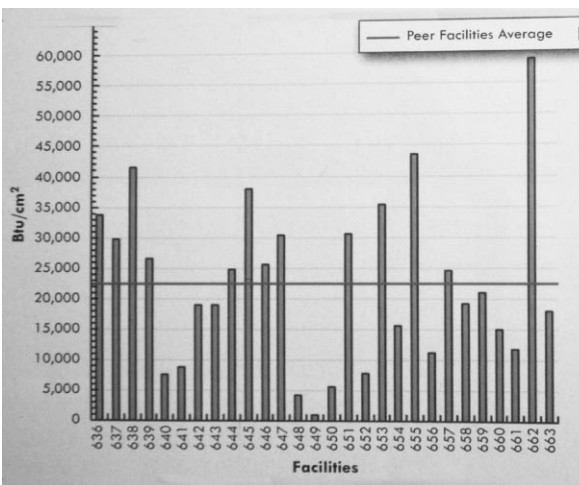
화로도 할 수 있고, 전체 에너지생산성(생산된 웨이퍼의 Btu/cm²(kWh/cm²)과 생산된 웨이퍼의 Btu/cm² × 마스크)의 측정을 산출하는 것으로도 할 수 있다.

그림 12와 13은 Fabs21 벤치마킹 틀에서 보고된 미국의 28개 조립설비를 위한 성능측정 값을 보여준다. 데이터는 광범위한 효율을 보여준다. 그림 13의 마스크 표준화에서 까지도 대부분의 효율적 설비는 최저설비의 효율보다 거의 6 배이다.

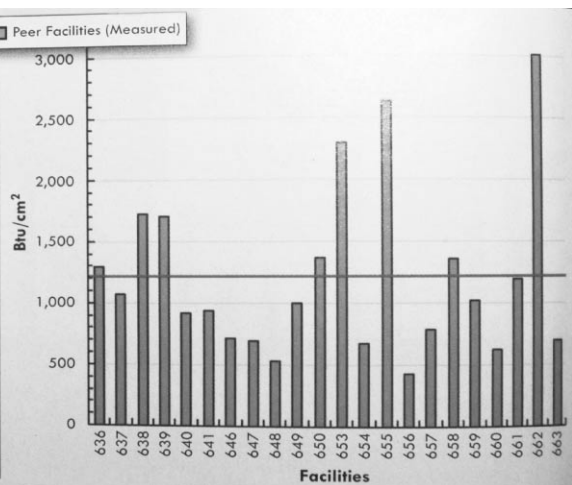
결언(Conclusion)

클린룸 운전자는 양적인 성능측정 대상에 솔직한 확인과 정해진 메뉴얼로 간다면 에너지 효율의 목표에 더욱 쉽게 도달 할 수 있다. 여압과 온도 및 습도와 같은 환경적 성능측정의 설정점이 공정과 재실자에게 실질적으로 요구되는 것보다 너무 강하게 요구되어서는 안된다. 순환시스템의 성능측정의 요체는 RCU와 MAU 시스템 순환공기의 효율 (W/ cfm[W/L/s])그리고, RCU와 MAU 필터의 압력강하이다.

클린룸의 냉·난방시스템의 효율성능측정은 상업적 또는 공업적 빌딩에 사용되는 것과 크게 다



[그림 12] Fabs21에 근거한 반도체 조립설비에서 웨이퍼 생산의 에너지 강도



[그림 13] Fabs21에 근거한 반도체조립설비에서 웨이퍼와 마스크 생산의 에너지 강도

르지 않다. 설비수준에서 총에너지 생산성 성능측정이 출력측정에서 표준의 에너지가 사용 되어 왔다면 몇 개 타입의 클린룸에 대하여는 개선시킬 수 있을 것이다.

이 장에서 제공되는 생산성 성능측정은 에너지 사용에 있어 반도체 조립설비에서 웨이퍼 생산과 마스크 층(Layer)에 의하여 표준화 될 수 있다. 성능측정과 벤치마킹은 효과에 있어 설계품질을 위한 기본적인 성능지표이며 시공과 운전에서 있어서도 같다.

클린룸 운전자와 설계자들이 효과적으로 사용하게 된다는 것을 확신시키기 위하여는 투자자들에게 계획된 문서를 제공하며 지속적인 추적이 되도록 하여야한다.

감사표시(Acknowledgments)

본 원고는 New York State Energy Research and Development Authority(NYSERDA)에서 자체 벤치마킹 추진 안내서와 California Energy Commission(CEC)에서 지원된 벤치마킹 자료를 기초로 하였다. Fabs21 데이터베이스는 International SEMATECH Manufacturing Initiative (ISMI)에 자세히 기술되어 있다.

References

1. Tschui, W., K. Benschine, S. Fok, and P.

Rumsey, 2001. "Cleanroom energy benchmarking in high-tech and biotech industries." Proceedings of the 2001 ACEEE Industrial Conference.

2. Xu, T. and W. Tschudi, 2002. "Energy performance of cleanroom environmental systems." Proceeding of the 48th Annual Technical Meeting and Exposition of the Institute of Environmental Science and Technology (ESTECH).

3. Darby, S. 2006. "The Effectiveness Of Feedback On Energy Consumption." Environmental Change Institute, University of Oxford. <http://www.eci.ox.ac.uk/energy/downloads/smart-metering-report.pdf>.

4. Tschui, W. F., P. Rumsey. 2004. "Using benchmarking to identify energy efficiency opportunity in cleanrooms: the Labs21 approach." ASHRAE Transactions 110(2).

5. Cleanroom self-benchmarking guide: <http://hightech.lbl.gov/benchmarking-guides/clean.html>.

6. Fabs21 database of energy efficiency for semi-conductor manufacturing facilities: <http://fabs21.lbl.gov/>. 