

클린룸 에너지절감 핵심 기술

노광철 | 에어랩(Air Lab)

대표

E-mail : creative@c-airlab.com

1. 서론

국내의 클린룸 에너지 절감기술은 최신 10여 년 간 많은 발전을 이루어오고 있다. 가장 많이 적용되고 있는 기술로는 열교환을 통한 에너지 회수, 고효율 기기의 사용, 순환 풍량의 환기횟수 절감, 수가습 시스템 등이다. 대부분의 에너지 절감기술들은 요구수준의 에너지 절감을 달성하기 위하여 초기투자비용이 적지 않게 드는 것이 사실이고, 이로 인해 중견기업과 중소기업들이 기술적용에 어려움을 겪는 이유이기도 하다. 이러한 이유로 2010년 한국공기청정협회에서 주관한 클린룸전문가 양성교육에서 “에너지효율적 클린룸 운영 실증사례 - 무투자를 기반으로”(삼성전기 박정일, 2010)라는 제목으로 중소, 중견기업에 효율적인 에너지 절감기술을 소개한 바 있다. 그 이후로 한국공기청정협회의 전문가교육 및 심포지엄, 한국전자정보통신산업진흥회의 심포지엄 및 세미나를 통해 국내외의 다양한 클린룸 에너지 절감기술들이 소개되었고 일부는 실증을 통해 그 효과가 검증되기도 하였다.

본고에서는 이전에 소개된 다양한 클린룸 에너지절감 기술 중에 투자대비 효과가 크다고 알려진 기술들에 대해 소개하고자 한다. 클린룸에서 에너지 절감기술이 효과적으로 적용되기 위해서는 기존에 발굴된 현장기반 기술들이 클린룸 설계기술로

확산되어야 가능한 일이다. 그러나 설계, 시공, 운영 프로세스의 역방향 전이는 기존의 관성과 기술 검증의 한계, 초기 비용 등으로 인하여 많은 시간이 필요한 것, 또한 사실이다.

여기에서는 클린룸에서 에너지절감량이 크고 설 계상에 반영되어 쉽게 적용될 수 있는 기술들에 대해 설명한다. 본 저자가 바라보는 관점에서는 변풍량과 변수량 기술, 공조 운전 모니터링 및 제어기술, 잠열 및 자연 열원 활용 기술이 클린룸에 꼭 적용되어야만 하는 기술로 판단하고 있으며 그 만큼 클린룸 에너지절감 효과가 크다고 볼 수 있다. 본고의 내용들은 본 저자가 개발자로 참여한 “클린룸 공조에너지 최적화 운용가이드 II”(한국전자정보통신산업진흥회, 2016)의 내용을 재편집한 것이다. 여기서는 각 기술들에 대해 기본적인 원리와 사례를 위주로 설명한다.

2. 변풍량 기술

2.1 수요기반 풍량 제어

2.1.1 개요

수요기반 풍량 제어 방식은 수요가 발생하지 않은 경우(실내 입자농도가 매우 낮은 상태)에는 최저 운전조건으로 팬이 가동되고 입자의 농도가 증가

하면 클린룸이나 국소환경을 기존 청정도 이하로 감소시키기 위하여 팬의 스피드를 변화시키는 것이다.

현재 알려진 권장 환기횟수는 유사한 오염 제어 환경에서 성공적이었던 과거의 경험에 근거한 역사적 규칙에 의거하여 결정되었다. 그러나 이전의 연구들이나 실증 사례에 의하면 여러 가지 제어 방법이 풍량을 가급적 줄인 상태에서 청정도 수준을 유지할 수 있다는 것을 보여 주었다. 이러한 경험적 근거들은 환기횟수를 최저로 낮출 수 있도록 하는 원동력이 될 수 있으며 최종적으로는 수요기반 풍량 제어를 통해 오염제어의 목적을 달성할 수 있도록 한다. 현재까지 알려진 수요기반 풍량제어 방식으로는 타이머의 사용, 정교한 입자 모니터링, 동작 센서를 이용하는 방법 등이 있다.

2.1.2 사례 1 : 제조상황에 따른 급기 풍량 제어

국내에 있는 일반적인 클린룸들은 24시간 운전을 기준으로 설계되고 운영된다. 하지만 일부 생산량이 일정하지 않거나 주말과 같은 비근무 시간에는 클린룸을 섯다운 시키는 것이 필요할 수도 있다. 클린룸을 일단위 또는 주단위로 운전을 제어하는 것은 에너지 절감에 있어서 매우 중요한 방법이라 할 수 있겠다. 그러나 클린룸을 최저 풍량 운전모드로 가동하고 다시 복귀 재가동시킬 때에는 오염물질 및 온습도의 급격한 변화가 필연적으로 발생하기 때문에 제품과 클린룸을 보호하기 위해서 일정한 절차가 필요하다. 그림 1은 국내의 한 대기업에서 제조상황에 따라 가변운전을 수행하기 위해 만든 절차의 예를 보여준다.

일요일과 같은 정기 휴무일에는 근무자가 최소화되고 제품의 생산이 이루어지지 않는 경우가 발



그림 1. 가변운전에 따른 공조운전 절감운전 및 복귀 재가동 절차(박정일, 운영관점의 CR에너지 효율화, KEA, 2013)

생하기 때문에 클린룸 운전풍량의 최소화가 가능하다. 이때 오염물질 및 온습도 환경에 대해 클린룸이 오염되지 않도록 하는 것이 중요하다. 오염의 최소화를 구현하기 위해서 클린룸의 배기 팬을 Off시키고 제습을 위한 최소 FCU 또는 DCC 만을 가동한 후 급기 팬과 순환 팬(FFU)의 RPM을 조정하여 최소 차압과 환기량을 유지시킬 수 있는 조건을 만든다. 이때 필요에 따라서는 외조기의 냉수를 이용하여 온습도를 조절해야 한다. 그림 2는 특정한 형태의 클린룸에서 가변운전을 통해 에너지 절감을 실현할 수 있는 포인트를 보여준다. 배기 팬과 순환 팬(FFU), 급기 팬 에너지를 절감시킬 수 있으며 생산장비의 비운전으로 가열과 가습을 하지 않고 FCU의 현열냉각 장치를 가동하지 않기 때문에 열원에너지를 절감할 수 있다. 또한 제조 장비에서 소비되는 프로세스 에너지도 절감할 수 있다.

주 1회 휴일 근무를 가정하여 연간 50일 동안 가변운전을 실시한다고 했을 때 공조에너지 운영 전력비 절감량은 연간 11% 정도 되는 것으로 예측되었다.

2.1.3 사례 2 : 입자 모니터링을 이용한 급기 풍량 제어

난류형 클린룸에서 내부 발생 입자농도와 환기 횡수는 큰 연관성을 갖는다. 내부 발생농도(105 particles/ft³/min 이내)가 작고 환기횡수도 작은 클린룸은 클린룸과 배기 덕트 내부에서의 오염물질 농도가 거의 유사하게 나타난다. 그러나 이러한 난류형 클린룸에서도 오염물질 제거효율을 고려한다면 배기 덕트 내부의 농도가 클린룸 평균 농도보다 낮을 것이다. 이와 관련한 자세한 내용은 “클린룸 공조에너지 최적화운용가이드 II”를 참고하기 바란다. 또한 내부 발생 입자농도가 작은 상태에서 환기 횡수가 증가하더라도 측정 위치에 따른 청정도는 크게 변하지 않는다. 그러나, 내부 발생농도가 증가와 함께 환기횡수도 증가하면 측정 위치에 따른 청정도의 변화는 점차 커지게 된다.

그림 3은 입자 모니터링을 이용한 급기 풍량 제어기술이 적용된 작은 규모 클린룸의 개념도이다. 입자 모니터링을 측정된 위치는 배기덕트를 포함하여 총 4곳이었으며 풍량제어를 통하여 클린룸 환

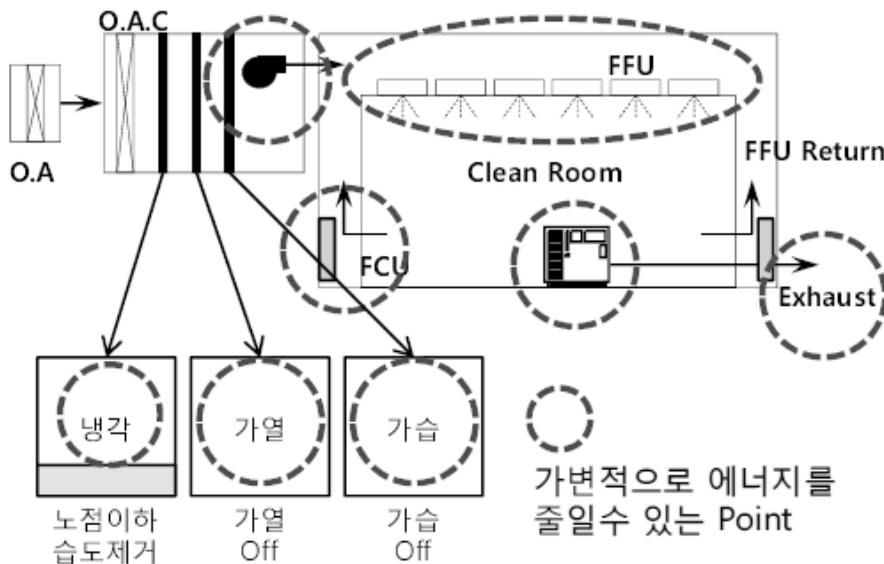


그림 2. 가변운전에 따른 클린룸 에너지 절감 포인트(박정일, 운영관점의 CR에너지 효율화, KEA, 2013)

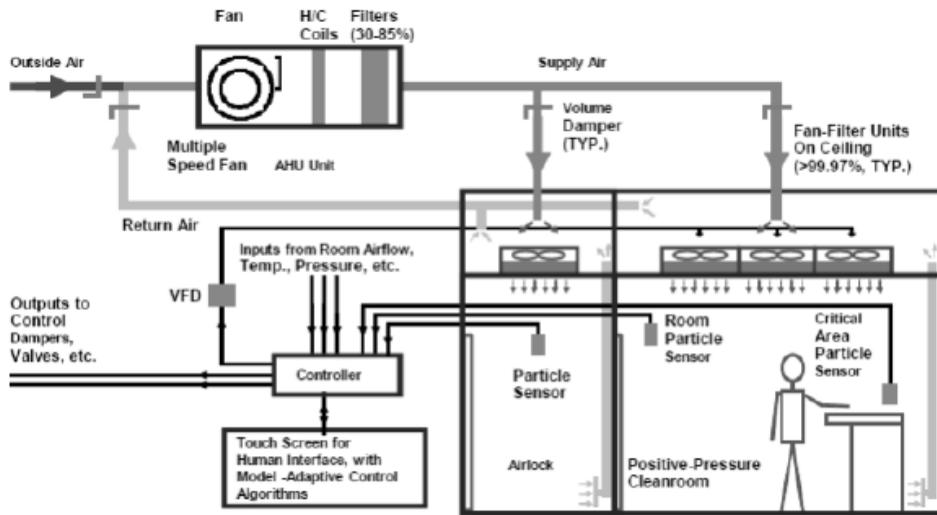
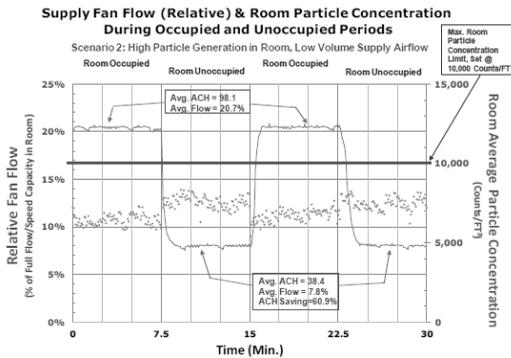


그림 3. 입자 모니터링 방식 급기 풍량 제어(Sun, W., Adaptive Fan Demand Control For Low-Energy-Consumption Cleanrooms, Energy Innovation Program-Final Report, 2015)

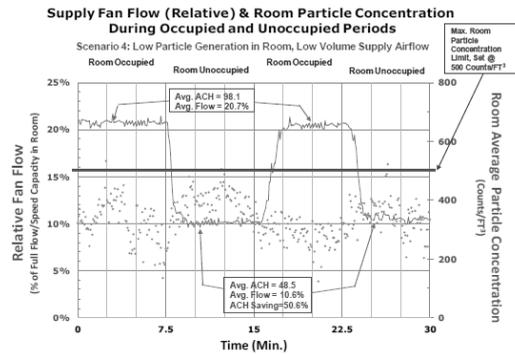
기환기횟수를 조절하였다.

그림 4는 그림 3의 클린룸에서 입자발생량과 환기횟수에 따른 청정도 변화시험의 결과를 보여준다. 입자 발생량이 많은 클린룸에서 작업자가 있는 경우 높은 환기횟수를 유지하고 작업자가 없는 경

우 환기횟수를 1/3 수준으로 감소시켜도 기준치보다 낮은 수준에서 청정도 변화가 관측되었다. 그러나 클린룸에서 입자 발생량이 작은 경우에는 환기횟수 변화에 따라 클린룸 청정도가 기준치에 근접하거나 초과할 수 있기 때문에 입자모니터링 방법



(a) High G, High ACH



(b) Low G, Low ACH

여기서, G는 클린룸 내 입자 발생량, ACH는 환기횟수

그림 4. 클린룸 내 발생량과 환기횟수에 따른 청정도 변화(Sun, W., Energy Innovation Program-Final Report, 2015)

의 적용 시에는 주의가 요구된다.

그림 3과 같은 클린룸에서 입자 모니터링 방식을 이용하여 풍량 제어를 수행한다면 연간 약 71%의 팬 에너지 절감효과가 있을 것으로 예측되었다. 71%라는 값이 과대예측된 측면이 있으나 큰 에너지 절감효과가 있는 것은 틀림없는 사실이다. 그러나 입자모니터링 방식을 이용하여 에너지 절감을 달성하기 위해서는 입자 모니터링 위치의 선정이 매우 중요하고 급기 팬에 인버터를 설치하는 것은 필수적이다. 그리고 클린룸 청정도와 필터의 상태 등에 따라 반응할 수 있는 적절한 PID 제어기를 설치하여 최적화시키는 것도 선택적으로 필요할 수도 있다.

2.2 중앙 풍도 설치

2.2.1 개요

최근 층류형 클린룸에서 서비스 영역(service zone)을 이용한 중앙풍도(central return duct, CRD)의 활용이 시도되고 있고 클린룸 에너지 절감에 있어서 상당히 효과적이라고 보고되었다. 중앙풍도의 설치

에 따른 에너지 절감 효과의 근본 원인은 FFU를 통과한 기류의 평균 이동 거리가 짧아지기 때문에 기외정압이 감소하게 된다. 이러한 기외정압의 감소는 동일한 운전조건에서 FFU 풍량을 증가시키게 된다. 반대로 FFU 운전대수를 기외정압 양만큼 감소시켜도 동일한 풍량을 유지할 수 있기 때문에 에너지 절감효과가 있다고 볼 수 있다. 그림 5는 기외정압에 따른 FFU 운전 대수 감소의 예를 보여준다.

이러한 현상은 난류형 클린룸에서도 유사하게 나타난다. 일반적인 난류형 클린룸은 공조기로부터 클린룸의 HEPA 필터까지 긴 덕트 길이는 갖고 있기 때문에 압력손실이 큰 편이다. BFU(Blower Fan Unit)가 설치된 경우에도 대부분의 리턴 위치가 벽면에 있기 때문에 기류의 평균 이동거리가 매우 긴 편에 속한다. 이러한 조건에서 BFU를 몇 개 단위로 연결할 수 있는 중앙풍도를 클린룸 내부에 설치한다면 기류의 이동거리를 감소시키고 기외정압을 감소시킬 수 있어 에너지 절감에 효과적이라고 볼 수 있다. 또한 중앙풍도를 클린룸 내부에서 기류가 정체되는 영역에 설치한다면 청정도 개선효과도

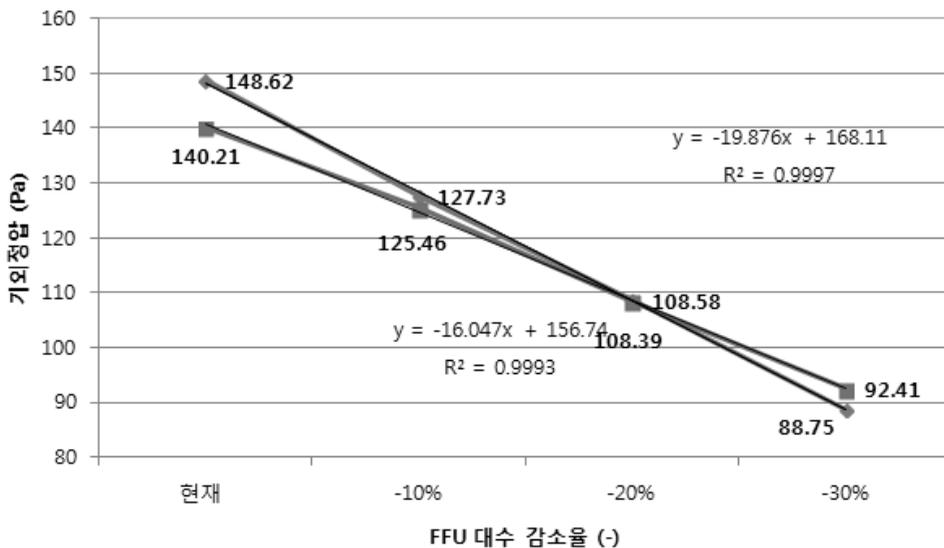


그림 5. 기외정압에 따른 FFU 운전 대수 감소 (노광철, 2015)

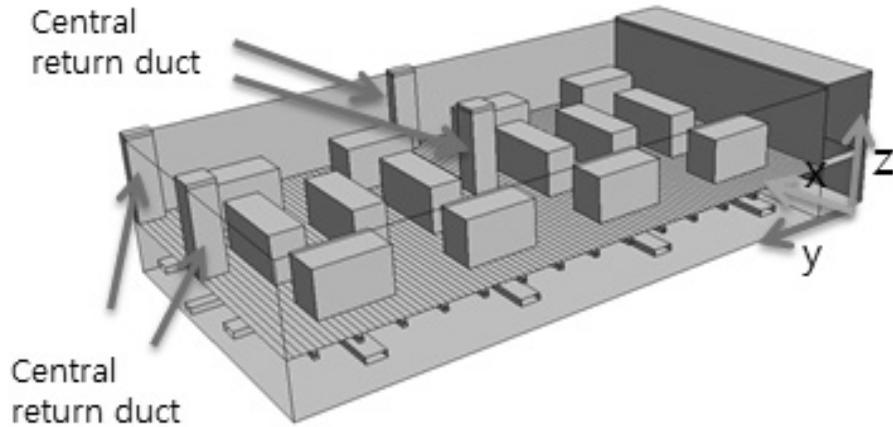


그림 6. 중앙풍도 위치에 따른 해석 모델링 (이상민&노광철, 클린룸 중앙풍동의 성능개선 효과, 2015)

나타나게 된다.

여기서는 층류형 클린룸에서 중앙풍도 설치를 통한 에너지 절감 효과를 CFD를 통해 연구한 결과를 소개한다. CFD를 수행한 연구결과이지만 실제 적용을 통하여 정성적인 에너지 절감효과가 검증된 것이다. 이 내용은 2015년 클린룸에너지기술 교류 워크샵(노광철, 클린룸에너지 절감기술 정리)과 클린룸 현장인력재교육(노광철, CFD를 활용한 오염제어)에서 발표된 것들이다. 최근 난류형 클린룸에서도 중앙 풍도의 설치가 에너지 절감효과에 매우 효과적이라는 것이 검증되었다.

2.2.2 사례 : 중앙풍도 위치 및 개수에 따른 기외 정압 감소

그림 6은 중앙풍도(CRD)의 설치 위치와 개수에 따른 기외정압 개선 효과를 분석한 클린룸 모델이다. 층류형 클린룸에 중앙풍도가 1~6 개가 설치될 때 기외정압 감소율을 분석하였다(그림 7). 중앙풍도 개수가 증가함에 따라 기외정압 감소율은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 중앙풍도가 6개 설치되면 중앙풍도가 없는 경우에 비해 약 9%의 기외정압 감소효과가 나타나고 이로 인해 FFU 운전대수를 약

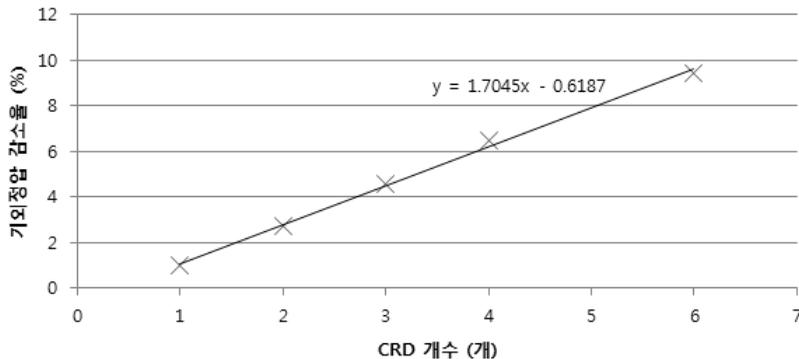
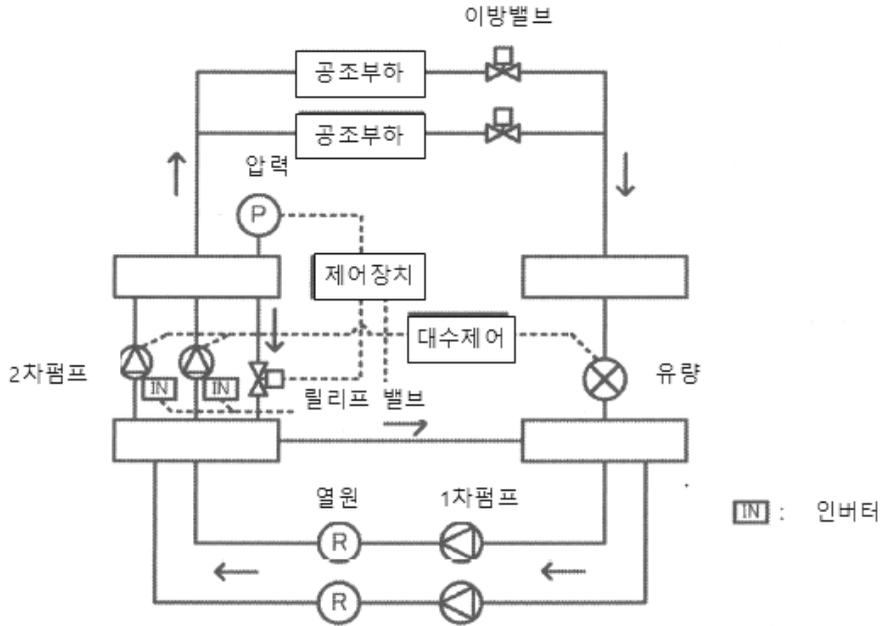
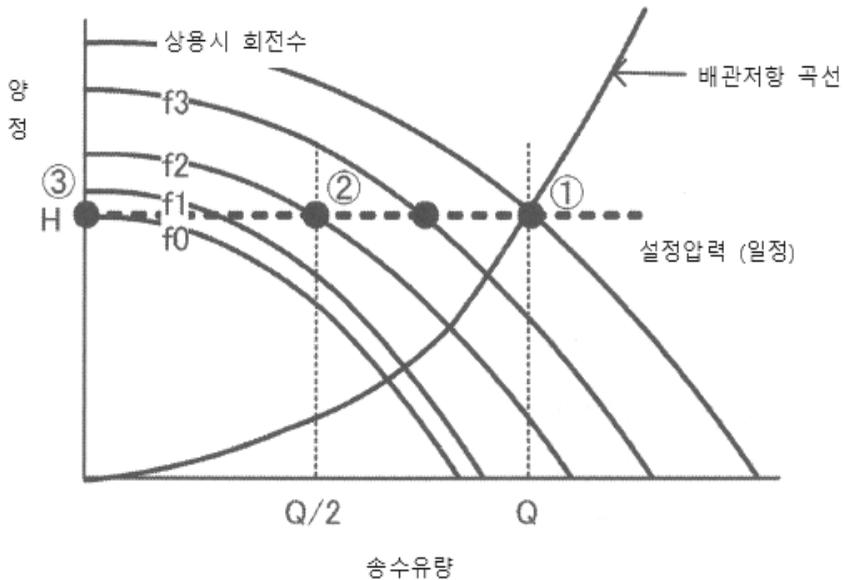


그림 7. 중앙풍도 개수에 따른 기외정압 감소 (이상민&노광철, 클린룸 중앙풍동의 성능개선 효과, 2015)



(a) 압력일정 회전수 제어 예



(b) 회전수 제어 펌프 특성

그림 8. 압력일정 회전수 제어 시스템

3% 감소시킬 수 있을 것으로 분석되었다. 그리고 중앙풍도의 위치가 리턴 덕트에서 멀리 설치된 경우에 기외정압 감소가 상대적으로 크게 나타났다. 또한 설치 대수가 증가함에 따라 중앙풍도가 리턴 덕트(Return duct)에서 더 멀수록 기외정압 감소율도 더 큰 폭으로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

3. 변수량 기술

3.1 개요

클린룸에서 오염제어 파트와의 연계를 통하여 비교적 쉽게 적용할 수 있는 에너지 절감 방법으로 앞서 소개된 변풍량 기술이 대표적이라고 볼 수 있다. 클린룸은 대표적인 발열 시스템이다. 외부에서 큰 전기에너지와 열에너지가 투입되기 때문에 클린룸을 항상 원하는 온습도 조건으로 유지하기 위해서는 냉동시스템의 적용이 필수적이다. 이러한 냉동시스템은 클린룸 외기 공조기와 순환계 공조기, 장비의 발열을 제어하기 위하여 냉수배관으로 연결이 되고 펌프를 이용하여 순환시키기 때문에 많은 양의 에너지를 소비하게 된다. 이 부분에 적용할 수 있는 에너지 절감기술이 변수량 기술이다.

변수량 기술은 대규모 공사를 수반하지 않고 신설설비나 기존설비에도 쉽게 대응할 수 있으며 비용대비 효과에 뛰어난 에너지절감 기술이다. 여기서는 관로저항특성 예측제어시스템의 특징과 반도체 공장에 도입했을 때의 에너지절감 효과의 사례를 소개한다.

3.2 공조용 송수펌프 에너지절감 제어시스템

3.2.1 압력일정 회전수 제어시스템

그림 8은 압력일정 회전수 제어시스템이 적용된 냉수 루프의 예와 압력일정 회전수 제어 펌프특성을 보여준다.

이 제어시스템은 공조용 2차 송수펌프에 인버터

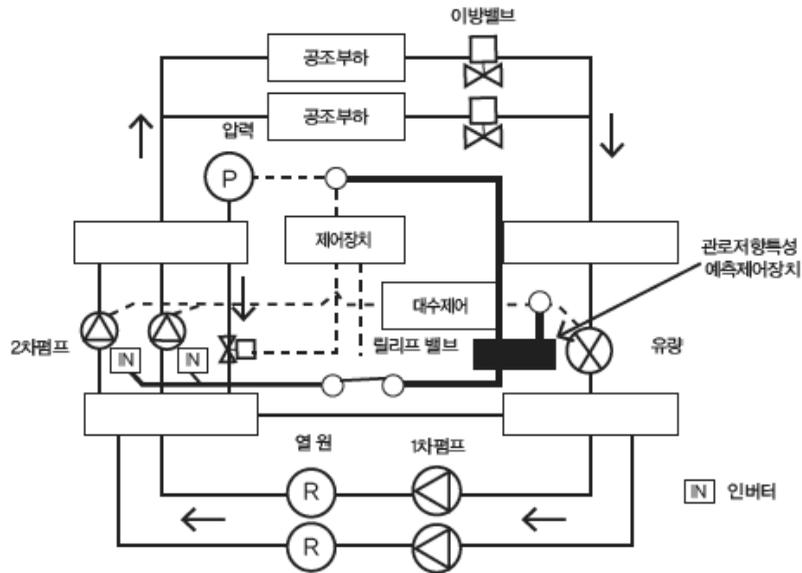
를 설치하여 릴리브 밸브로 물을 되돌리는 대신 인버터로 펌프 회전수를 낮춰 압력을 일정하게 유지 하면서, 필요한 수량만 송수하는 시스템이다. 정격 수량 Q에서의 운전 포인트는 배관저항곡선(이론곡선)과 상용시의 회전수에 있어서 펌프양정 곡선과의 교점 ①이 된다. 또한 수량이 줄어든 경우, 예를 들면 유량 Q/2에서는 펌프 회전수 f_2 와 양정 H와의 교점 ②가 운전 포인트가 된다.

이와 같이 압력일정 회전수 제어시스템은 송수 압력이 일정해지도록 제어하고 있기 때문에 필요 수량이 적어져도 펌프 회전수를 크게 낮출 수 없지만, 압력일정 대수제어와 비교해, 릴리브 밸브로부터 되돌아오는 물이 없어서, 에너지 절감율은 20~30% 정도가 된다.

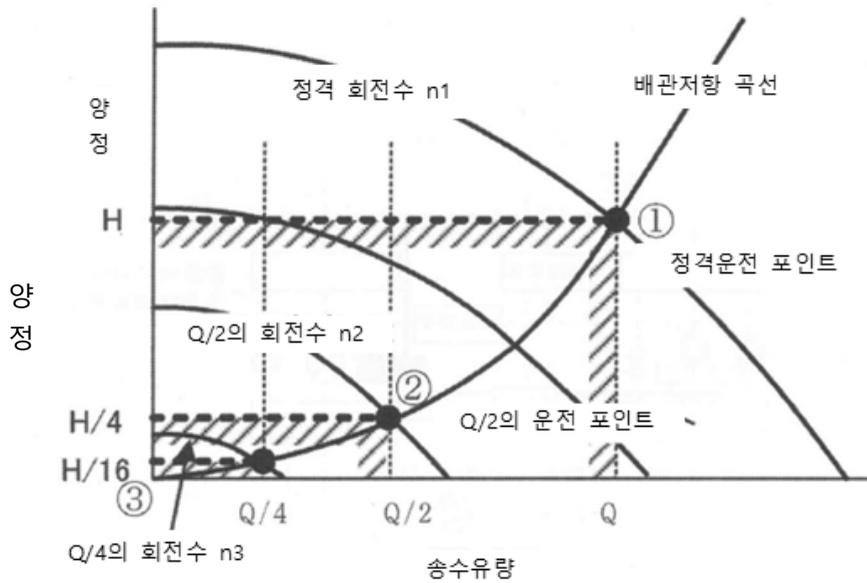
3.2.2 관로저항특성 예측 제어시스템

그림 9는 관로저항특성 예측제어시스템의 예와 관로저항특성 예측제어시 펌프 특성을 보여준다. 이 제어시스템은 관로저항특성 예측제어장치와 공조용 2차측 송수펌프에 인버터를 설치해 릴리브 밸브로 물을 되돌리는 대신에 송수 유량을 검출하여 그 유량에 대한 최적의 송수압력을 관로저항특성 예측곡선으로 연산한다(피드포워드 제어).

다음으로 그 압력이 되도록 인버터의 주파수 제어하여(피드백 제어), 최소압력으로 필요한 수량만을 송수하는 시스템이다. 정격수량 Q에서의 운전 포인트는 배관저항곡선과 상용시의 회전수 n_1 에서의 펌프양정 곡선과의 교점 ①이 된다. 또한, 유량 Q/2에서는 펌프 회전수 n_2 와 양정 H/4의 교점 ②가 운전 포인트가 된다. 이처럼 이 배관저항 곡선과 인버터를 사용한 펌프 양정곡선의 서로 닮은 점을 이용할 수 있다면 송수에 필요한 전력을 절감시킬 수 있다. 에너지 절감율은 밀폐형 송수계에 적용한 경우, 압력일정 대수 제어에 비해 최대 연간 80% 정도, 압력일정 회전수 제어에 비해 50~60% 정도 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.



(a) 관로저항예측 제어 예



의 범위는 펌프축 동력의 범위를 나타낸다.

(b) 관로저항특성 예측 제어 펌프 특성

그림 9. 관로저항특성 예측 제어시스템

4. 공조 모니터링 및 제어

4.1 개요

공조 모니터링이란 공조시스템 구성요소들(예열 코일, 냉난방 코일, 가습기 등)의 공기상태를 공기선도에 표시하여 실시간 또는 일정 기간 동안 공조기 내부 구성요소들을 거치면서 겪는 상태변화 전 과정을 파악하는 것을 말한다(그림 10). 클린룸에서 사용되는 공조기들은 에너지 소비가 최소가 되는 패턴을 따라서 움직이지 않고 운영자가 정한 제어 알고리즘에 따라 거동하게 된다. 경우에 따라서는 공조기 및 열원 시스템이 가열과 냉각을 동시에 운전하는 경우가 빈번하게 발생하고 이로 인해 에너지 소비량은 증가한다. 특히 온도 변화가 심하게 발생하는 간절기에는 이러한 현상이 자주 일어나게 된다.

이러한 현상이 발생하는 근본적인 원인 중 하나는 공조기를 운영하는 주체가 제어 알고리즘이나 시스템을 잘 이해하지 못한 부분이 있고 제어 담당자(주로 외주업체)는 공조시스템을 모르기 때문이다. 이러한 부분의 개선을 위해서는 먼저 공조기 내부에서 공기가 겪게 되는 온습도 상태의 변화를 관찰하고 이를 통해 운전상태를 분석해 보는 것이 효과적이다. 클린룸 현장마다 공조기를 운영하는 방식이 다르고 열원시스템은 여러 공조기에 다양하게 쪼여 있기 때문에 에너지 소비가 최소가 되는 최적의 운전조건은 클린룸마다 다를 수밖에 없다. 하지만 공조기 구성 요소들에 대해 공기 상태를 모니터링해 보면 어떠한 설비가 불합리하게 운전되고 있는지, 고장이 있는 설비가 어떤 것인지 등을 파악할 수 있고 이를 통해 개선작업을 진행할 수 있다. 이러한 것들이 공조모니터링의 장점이라 할 수 있겠다.

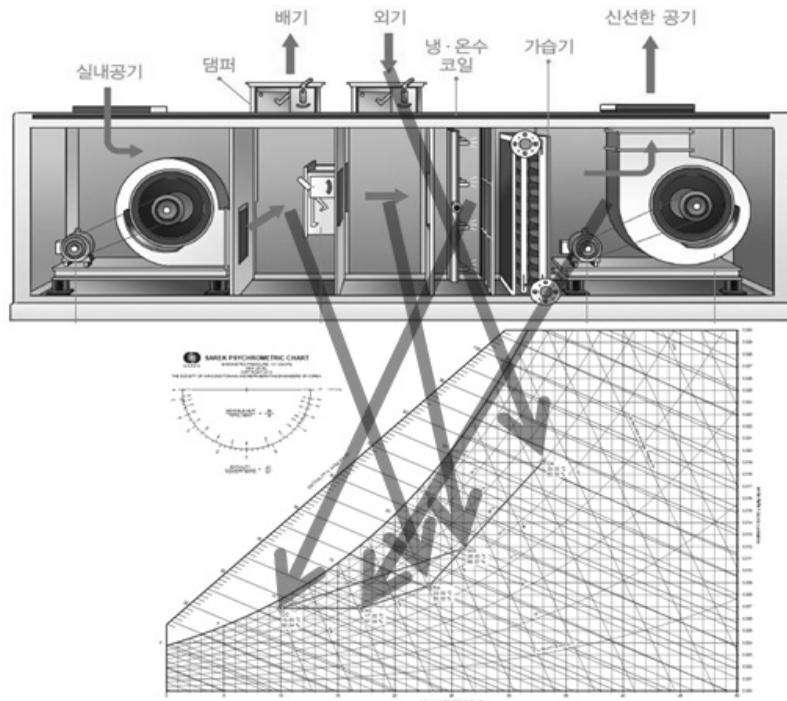
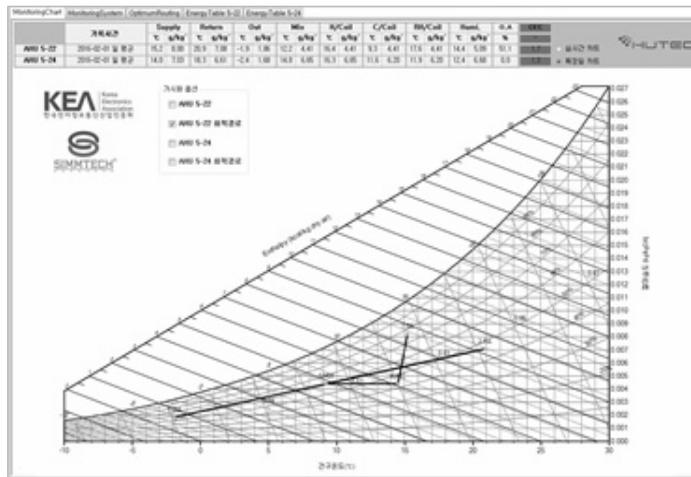
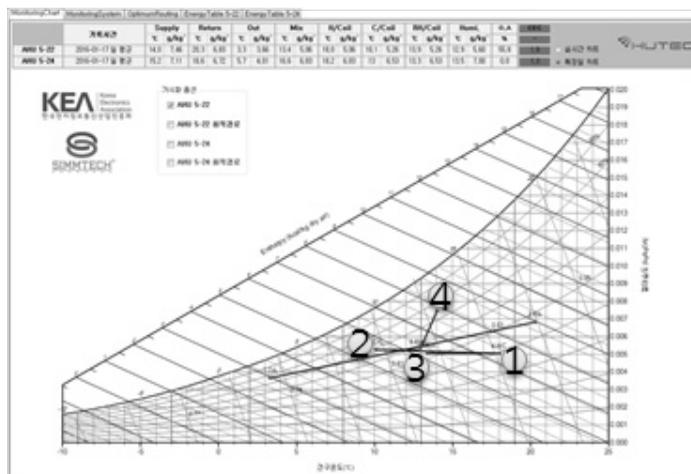


그림 10. 공조 모니터링의 개념



(a) 적정 운전경로



(b) 실제 운전경로

그림 11. 공조기의 적정 운전 경로와 실제 운전 경로 사례

공조모니터링은 공조시스템 구성요소별 특정시각의 공기상태를 공기선도 상에 표시하고 적정 운전경로(습공기선도상에서 최소에너지가 소비되는 상태변화 경로)와 실제 운전경로를 실시간 또는 기간별로 비교하여 전체적인 공조에너지 경로 효율을 산출할 수 있다. 이러한 경로 효율로부터 제습,

재열, 가습 등의 불합리한 운용을 한눈에 알아볼 수 있고 일반적인 운전의 최적 운전에 대한 추종상태를 확인한 후 문제점을 파악하여 개선에 이용할 수 있다.

그림 11은 공조 모니터링을 통하여 발견된 공조기 불합리 운전의 사례를 보여준다. 간절기에 적정

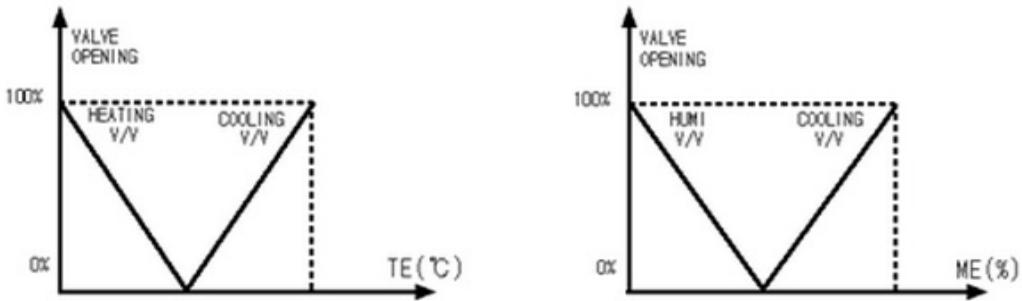


그림 12. High Select Control Logic

운전 경로는 그림 11 (a)와 같이 외기와 환기가 혼합된 후 가열 가습되는 것이다. 그러나 실제 운전경로는 그림 11(b)와 같이 외기와 환기의 혼합 후 가열①, 냉각②, 재가열③, 가습④의 과정을 거쳐 클린룸으로 유입되었다. 이는 가열, 냉각의 중복 운전에 의해 발생하는 것이었고 그 이면에는 냉각 코일의 동파방지를 위한 목적이 있었다.

4.2 개선 사례

그림 11과 같은 불합리 운전을 개선하기 위하여 High Select Control Logic을 적용하였다. High Select Control Logic은 가열코일 밸브와 냉각코일 밸브의 동작상황을 반전시켜 동시에 동작하는 요

소를 제거함으로써 환절기 중복 운전을 개선하는 것이다(그림 12).

표 1은 개선 전후 설정의 변화를 보여준다. 가장 중요한 것은 High Select Control Logic을 이용하여 설정점을 4개(냉방, 제습, 가열, 가습)에서 2개(온도, 습도)로 바꾸어 중복 운전을 방지하는 것이고 이후 온습도에 대한 적정 PI 값을 선정하는 것이다. P 값은 1에서부터 조금씩 증가시켜 가면서 오버슈트(Overshoot)이 생기지 않는 조건에서 최적 값을 도출하고 I 값은 0.01에서부터 조금씩 증가시켜 적정 값을 찾아가면 된다. 그림 13은 개선된 제어 화면의 예이다. 이러한 불합리 로직의 개선 실증 결과 환절기에 에너지 비용을 30% 정도 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

표 1. 개선 전후 제어방법 및 개선점의 변화

구분	As is	To be	비고
제어 방법	PI (비례,적분)	PI (비례,적분)	로직 수정
제어 설정 Point	大	감소	4 → 2 Point
냉방밸브	설정점 - 냉방, 제습	설정점 - 온도, 습도	
난방밸브	설정점 - 난방	설정점 - 온도	
	가습밸브	설정점 - 가습	설정점 - 습도
장점	온·습도 운영	上	동일
	설비 고장율	下	동일
개선	에너지 소비율	-	감소

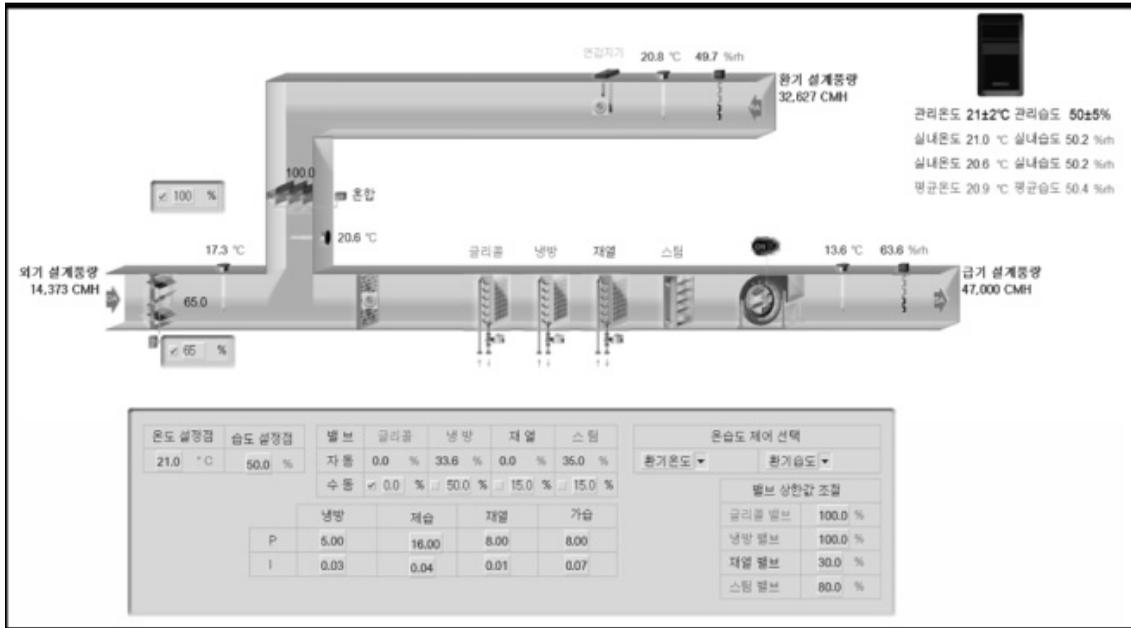


그림 13. 개선된 제어 화면의 예

5. 잠열 이용 기술수분무 가습

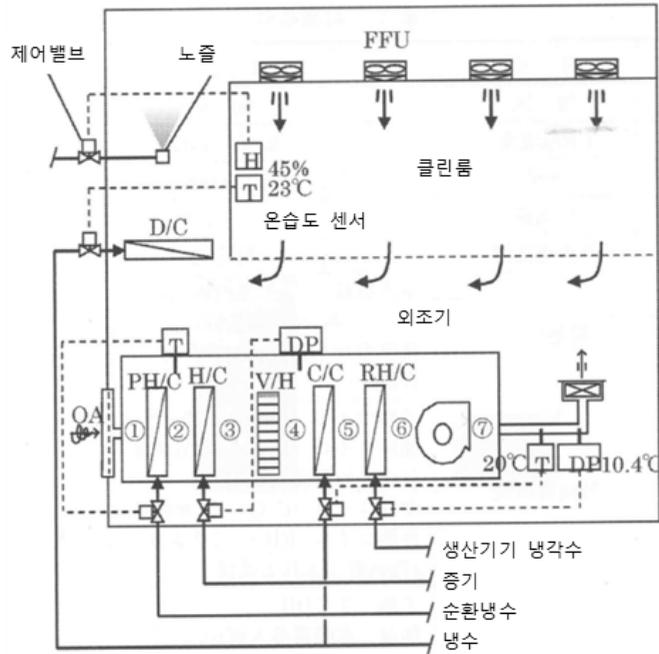
5.1 개요

클린룸에서는 공기 중에 포함되는 모든 물질이 관리되며 수분량도 그 대상이 된다. 조습은 공기 중의 수분량을 조정하는 것으로, 공기 온도만을 조정하는 현열제어에 반해 수분의 상태변화에 따라 숨어있는 열량의 이동이 수반한 잠열제어로서 현상이 다소 복잡하다.

조습(제습, 가습)은 주로 습도가 변동하는 외기를 끌어들이기 위해 필요하게 된다. 고습의 여름철 외기를 끌어들이기 위해, 냉각 코일과 가열 코일을 조합하여, 과냉각 제습 후 재열하는 것이다. 이 방식은 냉각과 가열의 양쪽에 에너지가 필요하며, 에너지 절감 대책이 요구된다. 실내 수분무 가습은 재열 온도를 가능한 낮게 설정하기 위해, 실내의 상황에 따라 자동적으로 재열 온도의 설정치를 판단해, 재열

과 관련된 에너지량을 절감하는 것이다. 실내 발열 부하로 겨울철에도 냉방을 실시해야 하는 클린룸에서는 증기가습을 채용하면 외조기에서 공기에 열을 가하게 되기 때문에, 냉방부하를 증가시켜 에너지절감이 되지 않는다. 증기가습 대신에 기화식 가습기(에어워셔)를 이용한 경우에도 취입외기를 필요한 습도까지 가습하려면 공기를 가열해야 하기 때문에 에너지 소비가 발생한다.

일반적으로 외조기에서 가습하는 증기가습 또는 에어워셔와 달리, 클린룸 공기 순환계에 가습하는 실내 수분무 가습시스템을 사용하면 보일러 및 냉동기에서 소비되는 에너지를 절감할 수 있다. 실내 수분무 가습 시스템의 구성 예는 그림 14에 나와 있다. 클린룸을 순환하는 공기가 상부 플레넘으로 돌아가기 전 위치인 리턴 샤프트에 수분무 가습시스템을 설치한다. 운전 중의 클린룸에 있어서도 순환공기 시스템에 가습 시스템을 설치하는 것이 비교적 용이하기 때문에 쉽게 에너지 절감을 이룰 수 있다.



PH/C: 예열 코일, H/C: 가열 코일, V/H: 기화식 가습기,
C/C: 냉각 코일, RH/C: 재열 코일, D/C: 현열 코일

그림 14. 실내 수분무 가습시스템

5.2 특징

기화식 가습시스템(에어워셔)의 외기의 처리과정을 그림 15와 같이 습공기선도 상에 나타내었다. 겨울철의 한냉으로 건조한 외기(①)는 예열되어 ②의 상태가 되고 다시 ③으로 가열된 후, 절대습도가 실내습도의 설정치가 될 때까지 ④의 상태로 기화식 가습된다. 기화식으로 가습된 공기는 수분의 증발로 인하여 온도가 감소하기 때문에 재열(⑦)을 받아 클린룸 내의 순환공기 중에 공급된다. 실내 수분무 가습 시스템은 외조기의 급기 온도를 실내 설정 온도까지 올릴 필요가 없으므로 가열도 ③'까지로 충분하며, 이로 인해 스팀 등의 가열 에너지를 절감할 수 있다. 더욱이 실내 측에서는 부족분의 수분량

을 보충하도록 순환 공기 중에 액적을 분무한다. 분무된 액적이 증발함에 따라, 증발 잠열로 인하여 공기가 냉각된다. 결과적으로 순환 공기 냉각용 현열 코일의 부하가 감소하여 냉각 에너지를 절감할 수 있다.

아래는 실내 수가습 시스템의 장점이다.

(1) 도입이 수월

외조기 가습시스템과 완전하게 독립되어 있어, 기존 시스템을 정지하지 않고 설치할 수 있다. 기존 설비에서 변경해야 하는 것은 외조기의 가습 이슬점 온도의 설정치 뿐 이다. 시스템의 설치 시에는 외조기의 이슬점 온도의 설정치를 서서히 낮춰 나감으로써, 실내의 습도를 일정하게 유지하도록 한

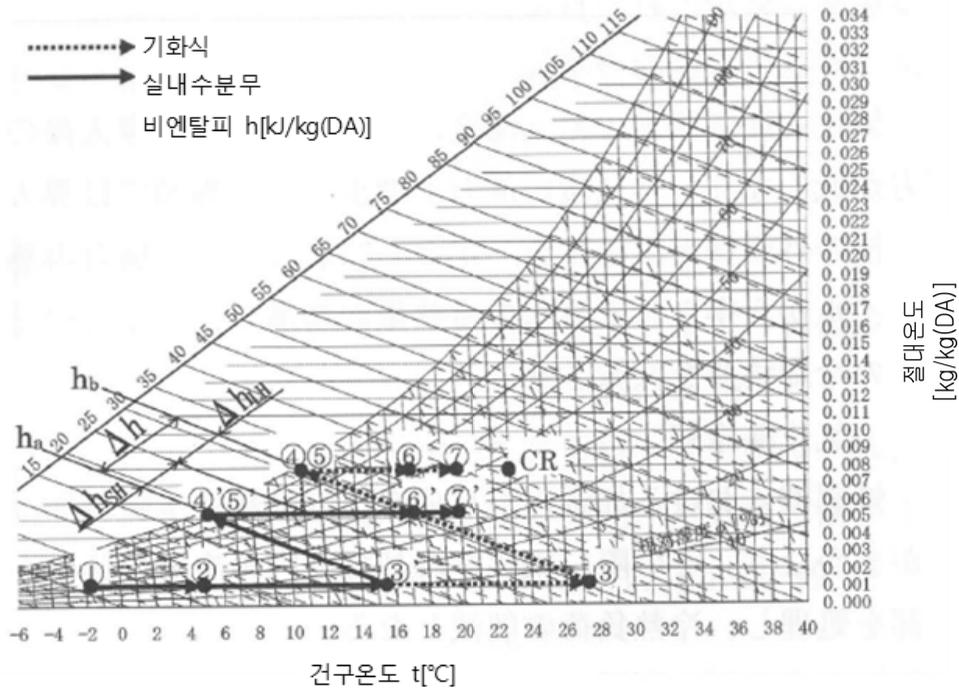


그림 15. 기화식과 실내 수분무 가습시스템의 습공기선도

다. 실내 수분무 가습 시스템이 운전을 개시할 때까지 부드럽게 설비를 변경할 수 있다.

(2) 외기 가열량의 에너지 절감

도입 후에는 도입 전에 비해 외조기 출구의 절대 습도 설정치를 낮출 수 있기 때문에, 기화식 가습기 직전의 가열온도가 낮아진다. 그 결과 가열 코일에서의 가열부하가 절감된다.

(3) 외기 냉방능력의 증가

실내 수분무 가습시스템의 급기온도는 기화식 가습시스템의 급기온도에 비해 낮아지며, 외기의 냉방능력이 증가한다. 그림 15의 습공기선도에서는 실내 수분무 가습이나 기화식 가습 모두 외조기의 출구온도를 일정하게 하고 있지만 실내 수분무 가습시스템의 재열 코일로부터 얻어지는 냉수의 냉

열량이 증가해, 냉동기 냉수의 냉각부하를 절감시킨다(그림 17 참조).

(4) 기화열 냉각

외조기에서의 가습 부족분을 실내 리턴 샤프트에서 수분무 가습으로 조달한다. 이때, 기화열 냉각으로 실내 냉방 에너지의 일부가 절감이 된다.

5.3 적용 사례

실내 수분무 가습시스템 적용을 통한 에너지 절감효과에 대해서는 생산장비용 냉각수 등의 열회수 이용이 이미 진행되고 있는 클린룸(그림 14)을 예로 검토한다. 산정조건은 표 2에 나타내며, 연면적 10,000 m²의 클린룸, 지역은 도쿄이다.

표 2. 계산 조건

항 목	산 정 조 건
지 역	도 교
CR 온습도	23℃ 45%
면 적	10,000 m ²
외기량	7,000 m ³ /min (0.7 m ³ /(min m ²))
외조기 기습	기화식
발열 부하	실내부하 580 W/m ² (장치발열 520 + 반송 60) 장치냉각수 부하 222 W/m ² 합계 802 W/m ²
외조기 구성	예열 코일(PH/C) : 귀환 냉수 열원 가열 코일(H/C) : 증기 열원 기화식 가습기(V/H) 냉각 코일(C/C) : 냉동기 열원 재열 코일(RH/C) : 생산용 냉각수 열원 (외기 취입 상류측에서)
제어 설정치	열원 5℃ DB 가습 물 분무 도입전 10.4℃ DP 물 분무 도입 후 5.0℃ DP 제습 10.4℃ DP 재열 외조기 출구 20℃ (재열 코일 출구 17.3℃)
냉각원 부하에 대한 냉열원 동력	0.26 kWh (동력) / kWh (부하)

겨울철 피크 시 기존 클린룸 공장(기화식 가습 적용)의 열량 흐름을 그림 16에 나타내었다. 화살표는 열의 흐름을 나타내며, 화살표의 방향은 고온 측에서 저온 측으로 한다. 단위는 클린룸 면적당 열량 W/m²이다. 실내 부하 580 W/m² 중 외기냉방으로 냉각되는 43 W/m² 을 제외한 537 W/m² 가 냉방 부하가 된다. 이 중 예열 코일의 가열에 이용되는 것이 94 W/m²(피크 시에는 외기를 -1.7℃에서 5℃로 가열)이며, 나머지 443 W/m²이 냉열원으로 조달하는 부하가 된다. 생산기기용 냉각수 계통은 장치의 수냉 부하 222 W/m² 중 재열 코일의 가열에 이용되는 것이 82 W/m²(외기를 11.2℃에서 17.3℃로 가열)이며, 나머지 135 W/m²가 냉열원으로 조달하는 부하가 된다. 따라서 냉열원 전달되는 총 부하는 578 W/m²가 된다. 또한 온열원으로 조달하는 부하는 외기를 예열 코일 출구 온도 5℃에서 가습기 입구온도 27.4℃까지 가열시키기 위한 315 W/m²가 된다.

이에 반해, 그림 17은 실내 수분무 가습 도입 후의 겨울철 피크 시 열량 흐름이다. 그림 16과 비교하면 실내 부하는 실내 수분무 가습의 기화열 냉각분인 87 W/m² 경감되어, 450 W/m²가 실내 계통의 냉방 부하가 된다. 예열 코일의 가열에 94 W/m²이

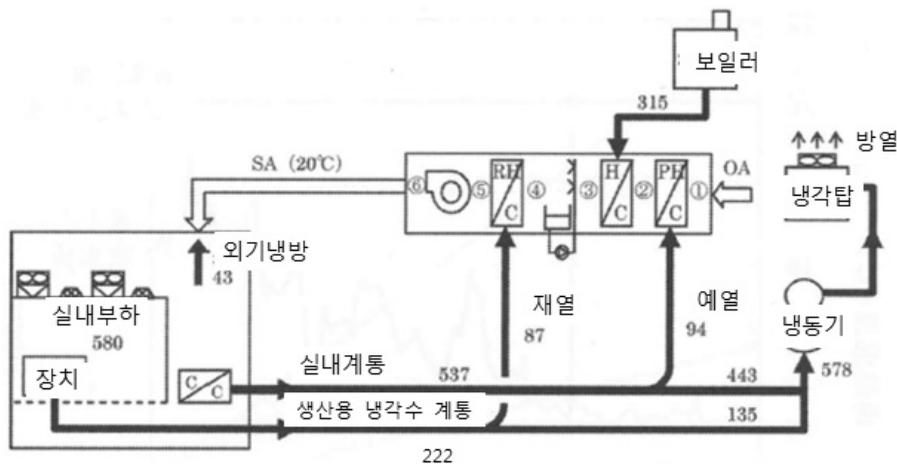


그림 16. 기화식 가습시스템 적용시 겨울철 피크부하 열량흐름(W/m)

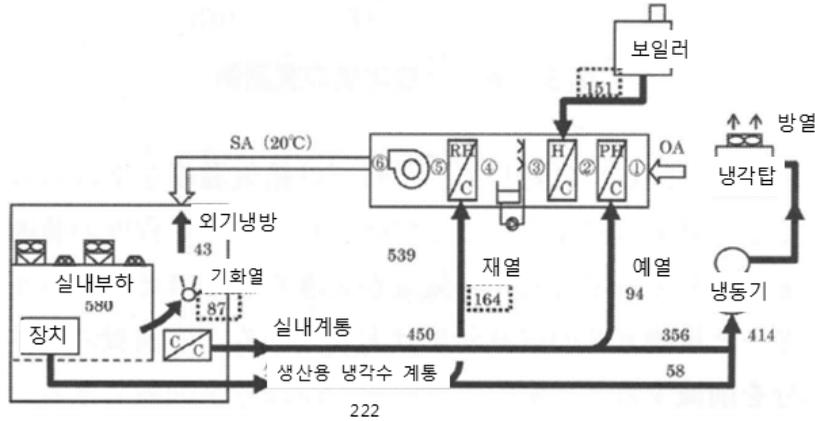


그림 17. 실내 수분무 가습 적용시 겨울철 피크부하 열량흐름(W/m²)

용되므로, 나머지 356 W/m²가 냉열원으로 전달되는 부하가 된다. 생산기비용 냉각수 계통은 장치의 수냉부하 222 W/m² 중 재열 코일(외기를 5.7 °C에서 17.3 °C로 가열)의 재열에 이용되는 열량이 164 W/m²으로 늘어나, 나머지 58 W/m²가 냉열원 부하가 된다. 따라서 냉열원으로 전달하는 총 부하는 414 W/m²가 되며, 기존보다 164 W/m²가 절감된다. 또한 가열 온도가 도입 전 27.4 °C에서 도입 후 15.7 °C로 감소되어, 가열 부하는 151 W/m²로 감

소된다. 그 결과 온열원으로 전달되는 부하는 냉열원과 동일하게 164 W/m²가 절감된다.

열량을 냉열과 온열로 나눠 계산한 결과를 그림 18에 나타내었다. 기화식 가습시스템이 사용되는 경우, 냉열 부하의 합계는 802 W/m²이며, 여기서 (1) 외기냉방(프리쿨링) 43 W/m², (2) 예열 코일(PH/C)에서의 열 회수 94 W/m², (3) 재열 코일(RH/C)에서의 열회수 87 W/m²의 합계 224 W/m²을 뺀 578 W/m²가 냉열원으로 전달되는 부하이다.

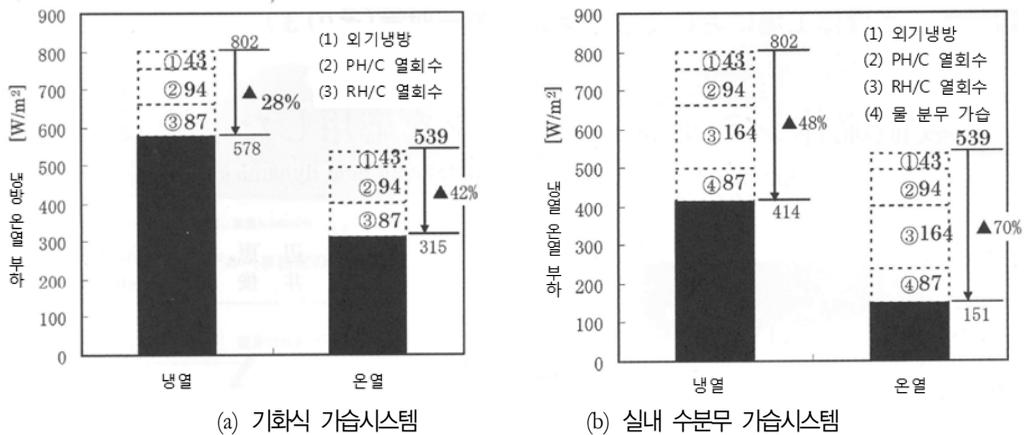


그림 18. 기화식 가습시스템과 실내 수분무 가습시스템 적용시 부하 절감량

이 때, 열회수율은 총 부하 802 W/m²에 대한 열회수량 224 W/m²의 비율로서 28%이다. 또한, 온열측에서 보면 열회수량 224 W/m²는 온열원으로부터 전달되는 부하 315 W/m²을 더한 합계 539 W/m²에 대해 42%의 열회수율이다. 한편, 실내 수분무 가습시스템을 도입한 경우의 열회수율은 냉열 부하에서 기화열 87 W/m²와 재열량의 증가 164 W/m²가 더해져 48%, 온열부하에서 70%까지 에너지절감 효과가 상승한다.

이처럼 실내 수분무 가습시스템 적용은 원래 약 30~40%라는 높은 열회수 효율로 운용되고 있는 클린룸에 대해서도 더욱 10~30% 열회수율을 상승시키는 효과를 초래한다. 특히 온열 부하에 관해서는 겨울철 피크 시의 부하가 최대 부하가 되기 때문에, 온열원 설비 용량을 절감하는 것도 가능하다.

6. 맺음말

클린룸이 에너지 다소비 시스템인 것은 분명하다. 그래서 지난 10년간 일부 대기업을 중심으로 클린룸 에너지 절감 기술이 많이 도입되었고 일부 기술들은 효과가 검증되어 빠른 횡전개가 진행되었다. 클린룸에서 에너지 절감은 고효율 기기를 사용하는 것도 중요하지만 각 사업장에서 운영되고 있는 클린룸과 플랜트의 에너지 효율화 포인트를 찾는 것이 더 중요하다고 볼 수 있다. 본고에서 소개된 기술들은 현재까지 알려진 다양한 기술 중에서, 사업장에 적용하면 효과가 클 것으로 예상되는 것들을 나열한 것이다. 물론 이는 저자의 관점에서 본 것들이라 다양한 전문가들의 의견을 청취할 필요는 있을 것이다.

아무쪼록 현재까지 개발된 또는 개발되고 있는 에너지 절감 기술들이 국내외 클린룸 사업장에서 올바르게 적용되어 목표로 하는 에너지 절감을 달성하고 세계적으로 탄소배출량의 감소 시점이 빨리 다가오길 기대해 본다.

- 참고문헌 -

1. 노광철, 2016, “클린룸 에너지절감 및 CFD 활용 기술”, 차세대 클린룸 오염제어 포럼, 한국공기청정협회.
2. 최호영, 2016, “산업현장 에너지 절감기술”, 차세대 클린룸 오염제어 포럼, 한국공기청정협회.
3. 한국전자정보통신산업진흥회, 2014, “클린룸 공조에너지 최적화 운용가이드”, 한국전자정보통신산업진흥회.
4. 한국전자정보통신산업진흥회, 2016, “클린룸 공조에너지 최적화 운용가이드 II”, 한국전자정보통신산업진흥회.
5. 이상민, 노광철, 오명도, 2014, “전산유체역학을 이용한 클린룸 중앙풍도의 성능개선 효과”, 동계 학술대회, 대한설비공학회.
6. 노광철, 2010, 클린룸 시장동향 및 ISCC2010 논문리뷰, 2010년 클린룸기술전문가교육, 한국공기청정협회.
7. 노광철, 2013, 클린룸 발상의 전환 - 오염제어 VS 에너지 절감, 클린룸 공조에너지 절감 최적화 운용 가이드 세미나.
8. 박정일, 이현철, 2010, 에너지 효율적 클린룸 운영 실증 사례 - 무투자를 기반으로, 2010년 클린룸기술전문가교육, 한국공기청정협회.
9. 한국전자정보통신산업진흥회, 2013, “에너지 다소비 제조공정 클린룸 분석, 한국전자정보통신산업진흥회.