

일유체 노즐을 이용한 실내 수분무 가습 클린룸 시스템

○ 송원 일*, 유경훈**, 태경응***, 김용식****

한국생산기술연구원 나노오염제어연구실
*연구원, **수석연구원, ***은성화학(주), ****(주)삼우시스템
E-mail : keven1004@kitech.re.kr

1. 서론

우리나라 정부는 2015년 12월 도출 예정인 신 기 후체제를 앞두고 우리나라의 자체적으로 결정한 온실 가스 감축목표를 2030년 BAU (851백만톤) 대비 37%로 결정하였다. 기본적인 감축 목표는 25.7%로 채택하고, 나머지 11.3%는 국제시장을 통한 온실가스 배출권을 사서 상쇄하는 것을 채택하였다. 이에 따라 온실가스 배출과 직결되는 에너지의 소비 감축이 반드시 필요하다. 따라서 지식경제부가 지정한 에너지 다소비 업종 중의 하나인 반도체/디스플레이 산업에서는 제품을 제조하기 위해 필수적으로 운용되는 초정정 클린룸의 에너지 절감에 대한 요구가 증대되고 있다. 클린룸에서는 연간 항온·항습을 유지해야 하고, 동시에 청정도를 관리하여야 하므로 그동안 에너지절약 개념보다는 오염제어 및 청정도관리 분야에만 국한하여 발전하였다. 그리하여 제품 제조를 위한 고청정도를 유지하기 위한 에너지 소비가 과대하다는 것이 실정이다.

유가는 안정적으로 30달러 전후에서 큰 변화 없이 산업계를 발전시키는데 지대한 역할을 하였다. 최근에 유가가 40달러 전후로 유가가 유지되고 있으나, 세계경제에 따라 유가가 언제 변동할지 모르는 상황이다. 따라서 반도체/디스플레이 산업은 유

가, 에너지비용(energy cost, EC) 등에 민감할 수밖에 없으며, 에너지 절감이 제품 원가의 경쟁력에 직결되는 상황에 이르렀다. 따라서 클린룸설비의 초기투자비(initial cost, IC) 관점뿐만 아니라 운전유지비(running cost, RC)를 고려한 라이프 사이클 비용(life cycle cost, LCC) 측면이 점점 중요해지고 있다. 그러므로 클린룸의 최적화 설계를 위해서는 청정도 향상과 더불어 운전비용을 최소화시키기 위한 에너지 절약 기법의 개발이 무엇보다 필요한 실정이다. 본 지면에서는 클린룸의 에너지 절감 문제를 해결할 수 있는 수단으로 에너지 절약형 일유체 노즐을 이용한 실내 수분무 가습 클린룸 시스템을 검토하고 기존 시장에서 사용 중인 증기 가습 클린룸 시스템, 단순 에어와서 수분무 가습 클린룸 시스템의 에너지 소비량에 대한 비교하고자 한다.

2. 가습 시스템에 따른 클린룸의 종류

2.1 증기 가습 클린룸 시스템

현재 클린룸에서 널리 사용되어지고 있는 증기 가습 시스템은 증기 가습 장치를 이용한 시스템으로 원리는 보일러에서 발생한 증기(steam)를 직접 주입(Boiler Steam - Direct Injection) 하는 방식으

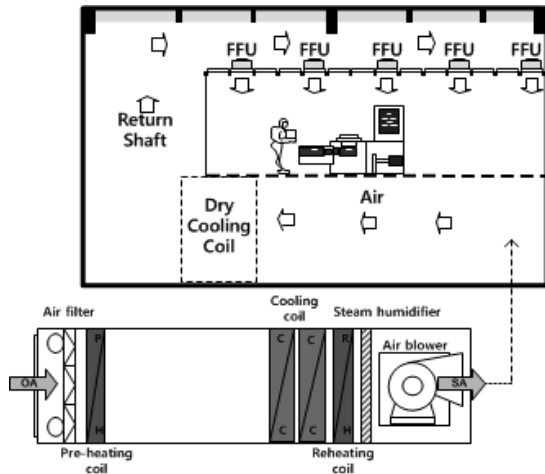


그림 1. 공업용 클린룸 증기 가습 시스템의 개략도

로 사용되고 있다.

증기 가습 시스템은 그림 1에서처럼, 에어필터 (Air Filter), 예열코일(Pre-heating Coil), 냉각코일 (Cooling Coil), 재열코일(Reheating Coil), 증기가습기(Steam Humidifier), 송풍기(Air blower), 드라이 코일(Dry Cooling Coil) 등으로 구성되어 있다. 외기 (OA)가 온·습도 조절용 건구온도 및 노점 온도 센서들로 구성된 공조기를 지나면서 급기(SA)의 온·습도가 일정하게 유지된다. 이 방법은 증기가 추가 되더라도 공기의 온도는 거의 일정하는 것이 특징이다. 증기 가습 시스템에 사용하는 증기는 주로 저압용 보일러에서 공급된다. 일반적으로 압력이 높으면 소음이 커지기 때문에, 15 psig (103 kPa) 이하의 증기를 공급하는 것이 이상적이다. 증기 가습의 장점으로는 공기 중에 흡수가 빠르다는 점이다. 또한 부하변동이 적고 제어가 용이하다는 특징을 갖고 있다. 이에 비해 소음이 크고 연료 소모가 많은 것이 단점이다.

증기 가습 시 증기 내 수분을 제거하여 증기분사 중 응축을 방지해야 하며 공기와 신속히 혼합하여야 한다는 것을 항상 유의해야 한다.

2.2 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템

에어와셔(air washer)는 공기에 분무수를 접촉시킴으로써 물과 공기의 열 교환과 동시에 수분의 교환에 의해 공기의 습도 조절(가습, 감습)과 먼지, 냄새를 제거하는 것으로서 주로 산업용 가습 및 가습 장치로 사용된다.

그림 2에서 보이는 바와 같이 공기 출구 측에는 물방울이 급기와 함께 혼입되지 않도록 엘리미네이터(eliminator)를 둔다. 또한 분무수와 공기를 접촉시키는 세정실(spray chamber)에는 몇 개의 스탠드 파이프(stand pipe)를 세우고 분무노즐로 분무한다. 바닥에는 배수구 및 오버 플로우(over flow)를 두어야 하며 이때, 트랩(trap)장치가 설치되어 있어야 한다. 기존의 증기 가습 시스템 클린룸에서 예열 코일과 냉각 코일의 사이에 2단 에어와셔(Air washer) 및 엘리미네이터(Eliminator)로 구성된 에어와셔부가 추가로 편성되어, 증기 가습의 일부 혹은 전체를 수분무 가습으로 대체하는 시스템이다. 수분무 가습은 분무된 물이 공기로부터 증발 잠열을 흡수하여 기화되는 방식이기 때문에, 물을 100 ~ 120 °C의

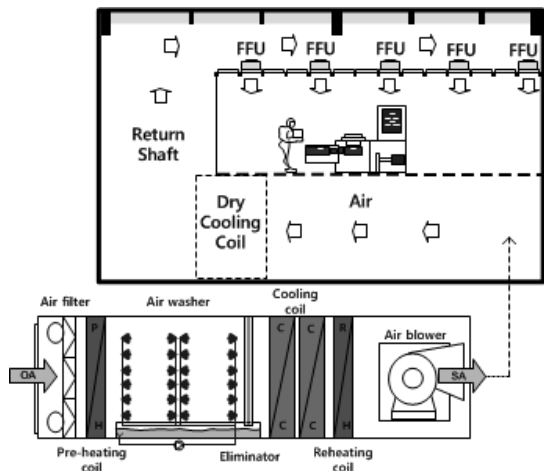


그림 2. 공업용 클린룸 단순 에어와셔 수분무 가습 시스템의 개략도

증기로 만들기 위한 가열 에너지가 소비되지 않아 증기 가습에 비해 에너지 소비가 적다는 장점을 가지고 있다.

하지만 공조기 내부에 2단 에어와셔(Air washer) 및 엘리미네이터(Eliminator)로 구성된 에어와셔부를 추가적으로 설치해야 하므로 공조기의 크기가 커진다. 그렇기 때문에 증기 가습 시스템 클린룸을 개조하여 사용하기에는 초기 비용과 공조기의 면적 등에서 문제가 발생할 수 있다. 또한 에어와셔를 이용한 수분무 가습시 클린룸 습도를 일정하게 하기 위해 예열코일 출구의 온도가 높아야 하므로 기존의 증기 가습 시스템에 비해 예열 코일에서 발생하는 전력량이 증가한다는 문제가 있다.

2.3 실내 수분무 가습 클린룸 시스템

그림 3에서 보이는 바와 같이 실내 수분무가습 시스템은 공조 공기의 순환경로, 예를 들면 리턴샤프트(Return Shaft) 내부나 하부 플레넘의 공간에 미세안개를 분무해서 직접 수분무 가습을 실시하는 것이다. 여기서 물방울은 이류체 혹은 일류체 노즐을 이용해 5~20 μm 정도까지 미세화되고, 물방울

은 공기 중에서 100% 증발해서 내장을 적시지 않는다. 습도 제어는 종래의 온·오프가 아니고, 이류체 동시 비례제어 방식 혹은 일류체 단독 제어 방식을 이용하는 것에 의해서, 뛰어난 제어 특성을 확보할 수 있다. FFU 이전에 엘리미네이터(eliminator)를 두어 물방울이 급기와 함께 혼합될 가능성을 배제할 수 있다. 단순 에어와셔 수분무 가습과 마찬가지로 분무된 물이 공기로부터 증발잠열을 흡수하여 기화되는 방식이기 때문에, 물을 증기로 만들기 위한 가열 에너지가 소비되지 않아 증기 가습에 비해 에너지 소비가 적다는 단순 에어와셔 수분무 가습의 장점을 그대로 가질 수 있다.

하지만 공조 공기의 순환경로 공간에 미세안개를 분무하기 때문에, 공조기의 크기가 커진다는 단순 에어와셔 수분무 가습 시스템의 단점을 해소할 수 있다. 또한, 클린룸의 하부 플레넘 공간에서 클린룸 실내 공기의 절대 습도와 공조기를 지나면서 만들어진 급기(SA)의 절대 습도가 단순 혼합되기 때문에 별도의 에너지 소비 없이 가습의 효과를 얻을 수 있다는 장점을 가진다.

3. 실내 수분무 가습의 노즐 방식

실내 수분무 가습 시스템의 공조 공기의 순환경로에서 미세안개를 분무하기 위해 사용되는 노즐의 종류는 크게 일류체(one fluid) 노즐과 이류체(two fluid) 노즐로 나눌 수 있다. 일류체 노즐과 이류체 노즐에 대한 특징은 다음과 같다.

3.1 일류체 노즐 방식

표 1에 일류체 노즐의 종류를 나타낸다. 이 그 중에서도 부채형노즐이 액정·프린트 기판의 세정에 잘 이용된다. 특징으로서 직진 노즐에 이어 강한 타력과 광범위를 커버할 수 있다는 점이 있다. 충전추노즐도 세정에 이용되는 것이지만, 부채형노즐에 비해 타력이 약하고 입자 지름도 크기 때문에 도포

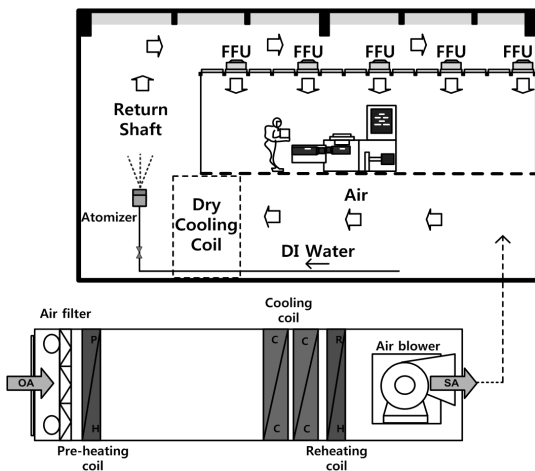

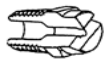




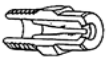


그림 3. 공업용 클린룸 실내 수분무 가습 시스템의 개략도

표 1. 일유체 노즐의 종류

대분류	소분류	발산형태	기본구조
일유체 노즐	부채형		
	공원추		
	충원추		
	직진형	•	

의 용도로 사용되는 경우가 많다. 공원추 노즐은 입자 지름이 작지만, 타력이 현저하게 약하기 때문에 세정에는 이용되지 않는다. 직진노즐은 타력이 강하지만, 커버하는 범위가 너무 좁기 때문에 국소적인 세정에서만 이용된다.

3.2 이유체 노즐 방식

압축 공기와 액을 혼합시켜 분무하는 이유체 노즐은 일유체 노즐에 비해 뛰어난 미립화 특성과 큰 턴 다운을 가지고 있다. 또, 입자의 스피드가 빠른 것도 특징의 하나이다. 이유체노즐은 구조로부터 3

종류의 노즐로 분류할 수 있다 (그림 4 참조).

3.2.1 내부 혼합형

노즐 내부에서 압축 공기와 액이 섞여서 미립화한다. 일반적으로 미립화가 뛰어나다. 내부 혼합형은 한층 더 다음의 3 종류가 있다.

(1) 내기형

노즐 내부의 중심이 압축공기, 그 외주에 액이 흐른다. 액의 통과지름이 커서 액체에 의한 이물질에 의한 막힘에 대해 매우 강하다(막힘이 거의 없다).

(2) 외기형

노즐 내부의 중심이 액, 그 외주에 압축공기가 흐르는 일반적인 타입이다. 약간 입자지름이 거칠고 영성하지만 분출구 부분의 통로(개구)를 크게 취할 수 있다.

(3) 프리믹스형

낮은 기체·액체비에서도 액체 방울의 분사 속도를 가속시키므로 타력이 강하다. 이물질 통과지름이 커서 이물질 막힘에 강하다. 게다가 압축 공기를 이용하는 것으로 턴 다운을 크게 취할 수 있다.

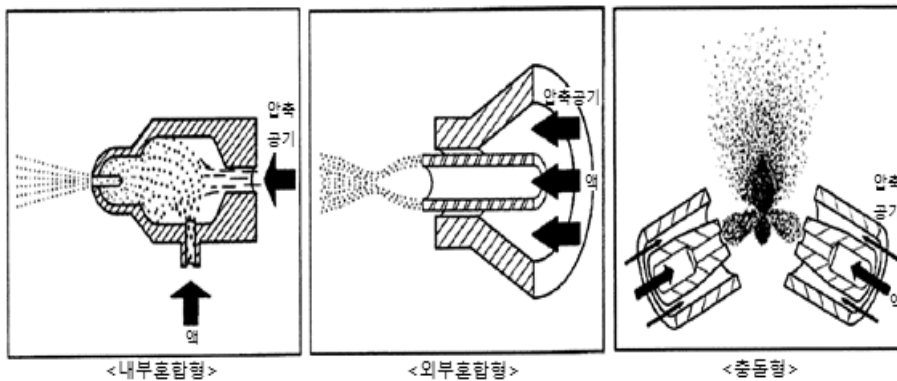


그림 4. 이유체 노즐 종류

3.2.2 외부 혼합형

노즐 밖에서 압축 공기와 액이 혼합하기 때문에 일반적으로 이물질 막힘에 강한 타입이다. 외부 혼합형에서도 내기형과 외기형이 있다.

3.2.3 충돌형

미립화한 액적 끼리를 한층 더 충돌시켜서 균질화·미립화하는 타입이다.

3.3 미스트용 강타력 이유체 노즐(VVEA)

VVEA는 내부 혼합형 프리믹스형에 속하는 이유체 노즐이다. 액정·프린트 기관의 세정에 적합한 성능을 가진다.

3.3.1 분포 형상

그림 5에 종래의 이유체 노즐과 미스트 세정용 강타력 이유체 노즐(VVEA)의 타력 분포를 비교했다. 주목해야 할 점은 두께 방향으로 VVEA의 두께가 얇아지고 있다는 것이다. 안개의 두께를 얇게 하는 것으로 단위면적당으로 내뿜는 안개의 양이 증가하기 때문에 보다 큰 세정 효과를 기대할 수 있다. 또, 폭(넓이) 방향의 분포가 사다리꼴로 되고 있는 것에서 노즐을 복수 배열시켰을 때에 균등한 분포를 실현하기 쉬워지게 된다.

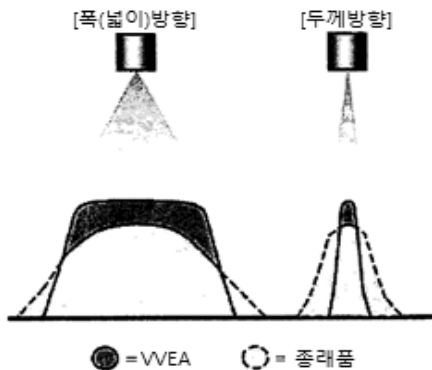


그림 5. 종래품과 VVEA의 타력 분포 비교

3.3.2 분무의 확대

그림 6에 유량이 변화했을 때의 분무 넓이를 비교했다. 종래의 이유체노즐은 분무량이 변화하면 분무의 넓이도 크게 변화하고 있었다. 이 경우에는 분무량·분무 높이로부터 최적의 노즐 피치(Pitch)를 결정해도, 분무량을 변화시키면 균등한 분포를 재현할 수 없게 되어 버린다. 실제로 이러한 일이 많이 일어나고 있었다.

그것에 비해 VVEA는 분무량이 변화해도 분무의 넓이는 크게 변화하지 않는다. 따라서 당초의 설계와 분무량이 바뀌어도 균등한 분포를 재현할 수 있게 되었다.

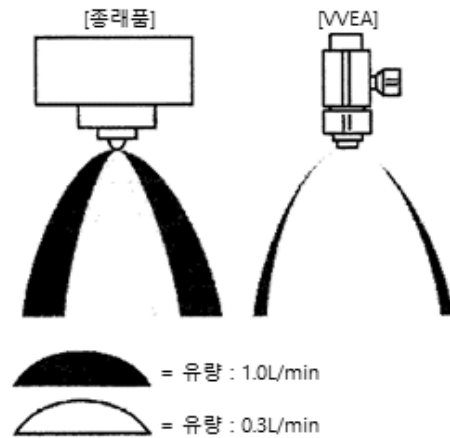


그림 6. 이유체 노즐 분무 넓이 비교

3.3.3 입자의 지름

일유체 노즐에서는 평균 입자 지름이 150 μ m 정도였지만 VVEA에서는 평균 입자 지름을 70 μ m 정도까지 작게 할 수 있다. 또한 일유체 노즐과 VVEA의 입자 지름 분포를 비교하면, VVEA의 액적이 더욱 미세한 안개를 많이 포함하고 있다는 것을 알 수 있다.

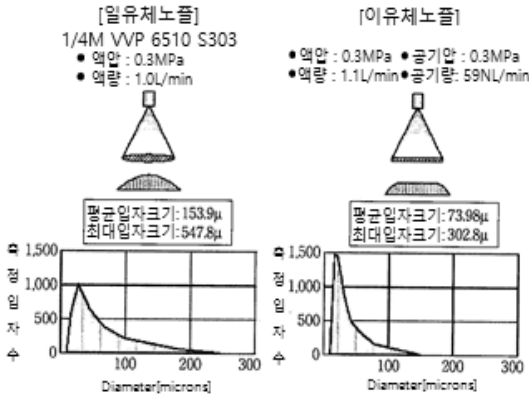


그림 7. 일유체노즐과 VVEA 입자의 지름 비교

3.3.4 유속

세정력을 주는 하나의 요인으로서 액적을 힘차게 부딪히는 것으로 생각할 수 있다. 같은 분무량에서도 일유체 노즐에 비해 VVEA의 평균 유속은 2배 이상이 된다.

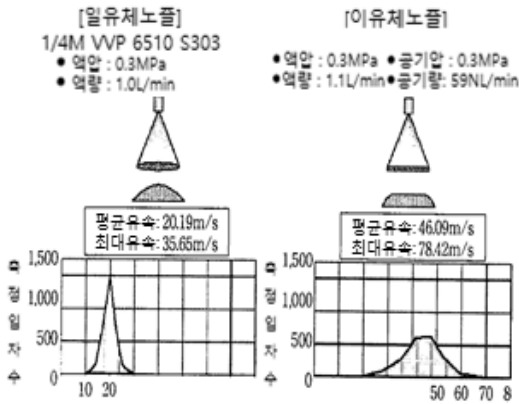


그림 8. 일유체노즐과 VVEA의 유속 비교

3.3.5 타력

세정력을 평가하는 기준으로서“타력”을 생각할 수 있다. 타력이란 분무가 대상을 누르는 힘을 수치화한 것이다. 세정력=타력라고 단정짓는 것은 아니

지만 어느 정도의 기준은 된다고 판단할 수 있다. 같은 액압, 같은 분무량에서도 타력은 일유체 노즐에 비해, VVEA가 2배 이상의 값을 나타내고 있다. 분무 높이로부터 최적인 노즐 피치(Pitch)를 검토할 수 있으므로, 노즐 피치를 고정한 일유체형의 콤팩트 헤더에서도 균등한 분포의 재현이 가능하게 되었다.

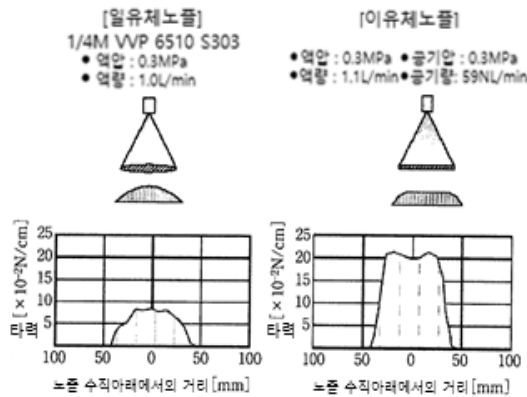


그림 9. 일유체 노즐과 VVEA의 타력 비교

3.3.6 이유체 노즐 대비 일유체 노즐 가습방식의 에너지 절약성

현재 실용화되고 있는 수분무 가습 기술에서는, 수분무 발생에 이유체 노즐(two fluid nozzle)을 이용하고 있다. 이유체 노즐이란 압축 공기로 물방울(수액적)을 날려 버리면서 미세화하는 노즐이며 물방울을 미세화하는 성능이 뛰어난 한편 압축 공기와 수압을 제어하면 넓은 비례 제어 범위(최대 분무량에 대한 최소 분무량은 10% 정도 가능)를 가진다. 그러나 공장 전체를 가습하기 위해서는 대량의 압축 공기를 필요로 하기 때문에 기존의 하우스 라인으로부터 필요량을 확보하는 것은 어렵고, 신규로 압축기를 준비해야 하는 케이스가 많다.

하지만 물을 미세 분무하는 노즐에는 이유체 노즐 외에, 농약 살포 등에 이용되는 일유체 노즐(one

표 2. 20°C의 물 1톤을 기화(증발)시키는데 필요한 에너지 비교

방 법	소모 에너지	비 고
증기 가습	720.89 kWh	
이유체노즐 방식	81.63 kWh (압축기)	부피당 압축기 동력 0.15 kWh/Nm ³
일유체노즐 방식	2.22 kWh (고압 펌프)	펌프 압력 6 MPa, 펌프 효율 75 %

fluid nozzle)이 있다. 종래의 일유체 노즐은 이유체 노즐에 비해 분무 입경이 영성하기 때문에, 실내에서 분무하면 벽이나 마루를 적서 버릴 우려가 있었다. 그런데 최근 히트 아일랜드 대책으로서 이유체 노즐이 주목받아서, 사람이 모이는 장소에서도 분무할 수 있도록 개발이 진행된 결과, SMD(샤우터 평균 입경 Sauter Mean Diameter)가 20 μm를 만들게 되어 실내 가습용으로 사용할 수 있을 가능성이 높아졌다.

일유체 분무 방식은 압축 공기가 불필요하고, 운전 동력을 매우 작게 할 수 있다. 일례로서 1 ton의 20°C의 물을 사용해서 가습하는데 필요한 에너지를 유도한 것을 다음에 서술하며 그 값들을 비교한 것을 표 2에 나타낸다.

증기 가습에서는 물을 승온 및 증발시키기 위해서 720 kW의 에너지가 필요하지만, 이유체 수분무 방식에서는 물을 미세화시키기 위한 압축 공기 동력으로서 80 kW로 가능하다. 한층 더 일유체 수분무 방식에서는 이것을 2.2 kW까지 줄일 수 있다.

(1) 증기 가습

증기가습에 투입되는 에너지는 20°C의 물 1톤 → 100 의 물 1톤 → 증기의 순서로 필요한 에너지를 합산하면 소모된 에너지를 산정할 수 있다.

$$m_w C_{pw} \Delta T = 1000 \times (4.19 \times 10^3) \times 80 = 3.352 \times 10^8$$

$$J = \frac{3.352 \times 10^8}{3600 \times 1000} \text{ kWh} = 93.11 \text{ kWh}$$

$$m_w h_{fg} = 1000 \times (2260 \times 10^3) = 2.260 \times 10^9 \text{ J}$$

$$= \frac{2.260 \times 10^9}{3600 \times 1000} \text{ kWh} = 627.78 \text{ kWh}$$

$$\therefore E_{steam} = m_w C_{pw} \Delta T + m_w h_{fg}$$

$$= 93.11 + 627.78 = 720.89 \text{ kWh}$$

(2) 이유체 노즐 수분무가습

일반적으로 사용되고 있는 이유체 노즐의 사양은 아래와 같다.

표 3. 이유체 노즐 수분무 가습의 사양

항 목	사 양 (공기압 0.3 MPa)
SMD (Sauter Mean Diameter)	11.1
분무량	4.3 L/h
공기소비량	39 NL/min

물 1톤의 부피는 1 m³ 이므로 1 m³의 물을 분무하는데 걸린 시간은

$$\frac{1 \text{ m}^3}{4.3 \text{ L/h}} = \frac{1 \text{ m}^3}{4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \text{ h} = 232.56 \text{ h}$$

이유체노즐에 필요한 공기량 = (39 NL/min) × (232.56 × 60 min) = 544.19 Nm³

$$\therefore E_{2fn} = (544.19 \text{ Nm}^3) \times (0.15 \text{ kWh/Nm}^3)$$

$$= 81.63 \text{ kWh}$$

(3) 일유체 노즐 수분무가습

단위 유량당 소비동력

$$\dot{W}_{pump} = \frac{\dot{V}_w \Delta P}{\eta} = \frac{(1 \text{ m}^3/\text{s}) \times (6 \times 10^6 \text{ Pa})}{0.75} = 8 \times 10^6 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \therefore E_{1fn} &= \frac{8 \times 10^6 \text{ W}}{1 \text{ m}^3/\text{s}} = \frac{8 \times 10^6}{3600 \times 1000} \\ &= 2.22 \text{ kWh/m}^3 \quad (\because \text{물 } 1 \text{ m}^3 \text{은 물 } 1 \text{톤}) \end{aligned}$$

3.3.7 일유체 노즐의 특성

그림 10은 일유체 노즐의 압력과 분무 유량 사이의 특성을 나타내고 있다. 세로축은 분무 유량을 나타내고, 가로축은 압력을 나타낸다. 오리피스 직경 $d=0.15 \text{ mm}$, $d=0.20 \text{ mm}$ 의 경우에 대해 조사했다. $d=0.20 \text{ mm}$ 의 노즐은 오리피스 압력 6 MPa일 때 분무 유량은 3.1 L/h이고 압력을 내려서 2 MPa일

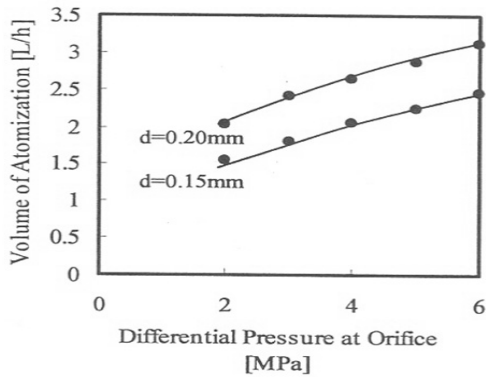


그림 10. 일유체 노즐의 압력과 분무 유량 사이의 특성

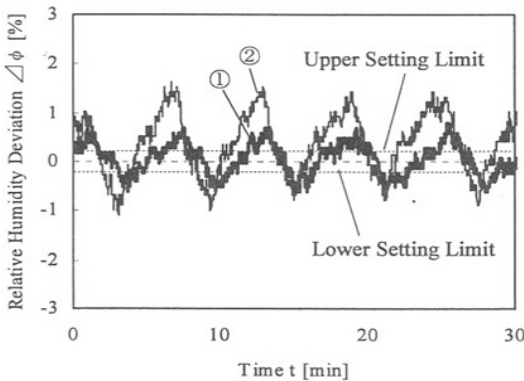


그림 12. 온·오프 제어 방식에서의 상대 습도 편차 ($\pm 0.2\%$)

때 2.0 L/h (최대량에 대해서 65%)이다. $d=0.15 \text{ mm}$ 의 노즐에서는 6 MPa일 때 2.4 L/h, 2 MPa일 때 1.6 L/h (최대량에 대해서 67%)이다. 또한 일유체 분무 노즐에서는 2 MPa보다 압력을 내리면 급격하게 분무 입경이 영성해지는 경향이 있어, 압력에 의해서 유량을 제어하는 경우 2 MPa이하만이라고 생각된다.

따라서 일유체 노즐을 가압 압력에 의해서 제어하는 경우 제어 범위는 65~100%이며, 이는 비례 제어에는 부적합하다.

일반적으로 전극식 가습기의 제어로서 시간 비례

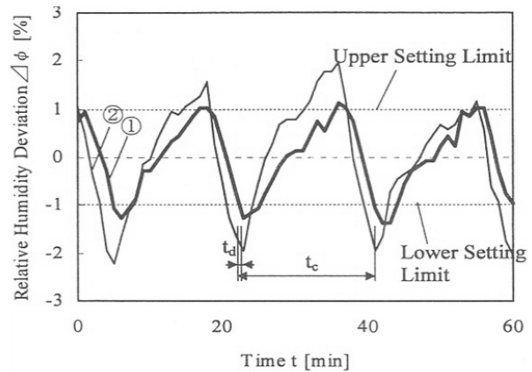


그림 11. 온·오프 제어 방식에서의 상대 습도 편차($\pm 1\%$)

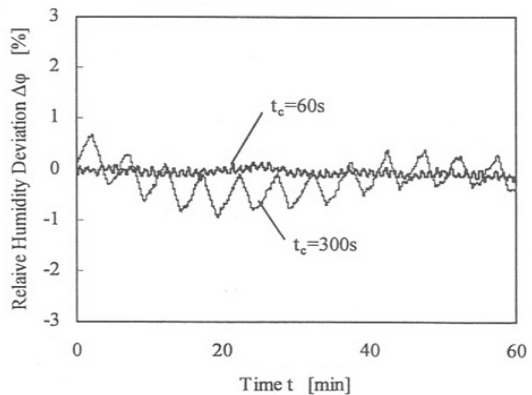


그림 13. 비례제어 방식의 상대 습도 편차

제어가 이용되고 있다. 시간 비례 제어는 자체의 조 작은 온·오프(On/Off) 조작이지만, 어느 시간 주기에 있어서의 온 시간 top를 제어하는 것으로 비례 제 어하는 방법이다.(그림 11) 온(On) 시간 top은 습도 설정치(SP)와 습도 측정치(PV)의 편차로부터 PID 연산해서 결정한다. 설정 편차 $\pm 1\%$ 로 온 오프 제 어를 실시했을 경우의 실내 습도의 설정 습도에 대한 편차의 결과를 그림 11에 나타낸다. 측정은 클린룸 내부의 중심부와 측면부에서 하였으며, 중심부를 측정점 ① 측면부를 측정점 ②로 도시하였다. 측정점 ①에 대해 제어의 시간 지연 td 때문에 상한 설정치, 하한 설정치를 초과해서 실질적으로는 $\pm 1.3\%$ 의 제 어가 되어 있었다. 또 측정점 ②는 측정점 ①에 비해 편차가 커졌다. 제어 주기 tc는 18 min이었다. 설정 편차 $\pm 0.2\%$ 로 온 오프 제어를 실시했을 경우의 결 과를 그림 12에 나타낸다. 측정점 ①에서는 간신히 $\pm 1\%$ 이내에 들어갔다. 제어 주기 tc는 6 min였다.

비례 제어와 온·오프 제어의 특성을 비교하기 위해 시간 주기 tc=60 sec, 300 sec로 시간 비례 제 어를 실시했을 경우의 결과를 그림 13에 나타내었다. tc=300 sec의 경우는 온오프 제어 $\pm 0.2\%$ 일 때와 가까운 주기였기 때문에, 마찬가지로 $\pm 1\%$ 정도의 편차였다. tc=60 sec의 경우는 주기를 짧게 한 것에 의해, tc=300 sec의 경우에 비해 편차가 작 고, 제어성이 양호하다.

온·오프 제어의 결과로부터, 온·오프 제어는 어느 정도의 제어성을 가지지만, 제어의 시간 지연 이 백이 되어 있는 정도 이상으로 제어할 수 없는 것을 확인할 수 있다. 위 실험의 경우 $\pm 1\%$ 보다 좁은 편차로 온·오프 제어하는 것은 불가능하다. 또 환기 성능의 차이에 의해, 습도 센서의 설치 장소에 대해서 편차의 차이가 생기는 것을 확인할 수 있다. 습도 센서의 설치 장소에 대해 환기 성능이 좋은 장소는 습도의 변화하는 스피드가 빠르기 때 문에 편차가 커진다. 센서 근방에 장애물이 설치되 는 등 환기가 악화되면, 실내 전체의 습도 편차가 커져 버린다. 시간 비례 제어에서는 온·오프의 간

격을 임의로 짧게 설정할 수 있으므로, 제어의 시간 지연의 영향을 받지 않고, 편차가 적은 양호한 제 어를 실현할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 실내 수분무 가습 시스템의 효과

반도체나 FPD(Flat Panel Display)등의 공업 제 품을 생산하는 클린룸 내부는 연간 24시간 항온· 항습을 유지해야 하기 때문에, 도입 외기는 하계에는 제습, 동계에는 가습되어 실내에 공급되고 있다. 또한 제조 장비로부터의 발열량은 크고, 실내는 연 간을 통해 냉방되고 있다. 동계에는 냉방과 가습이 동시에 필요해서 가습(혹은 가열) 용의 온열원과 실 내 냉방용의 냉열원이 동시 운전되는 상황이다. 이 러한 공장에 대한 동계의 가습 방식으로서 수분무 가습 기술은 매우 에너지 절약적인 방법이다. 공기 중에 분무된 물이 공기로부터 기화열을 빼앗아 증 발하므로, 물을 수증기로 증발시키는 에너지(온열 원)와 공기를 차게 하는 에너지(냉열원)의 양쪽 모 두를 줄일 수 있기 때문이다. 그러나 종래의 수분무 가습 기술에서는 내장 젖음이나 제어성 등의 문제 가 있어 실내에선 사용하기가 힘들다는 단점이 있 어 외기 공조 시스템에서 증기 가습이나 수분무 가 습 등의 방법을 통하여 도입되는 외기를 가습하여 클린룸 실내로 송풍하는 것이 일반적이었다. 따라 서 아래는 반도체/FPD등 공업용 클린룸에서 자주 채용되는 증기 가습 시스템 또는 단순 에어와셔 가 습 시스템과 비교하여 실내 수분무 가습 시스템의 에너지 절약 효과를 나타낸다.

4.1 가열 코일 증기량 저감의 효과

외기 공조 시스템 전단 예열 코일의 가열 온도는 동계 피크(peak)시에 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 근처가 되기 때문에 증 기 혹은 온수 열원의 가열 코일이 필수적으로 요구 된다. 그러나 실내 수분무 가습 시스템을 추가하였 을 경우, 외기 공조 시스템에서의 가습은 최저로 실

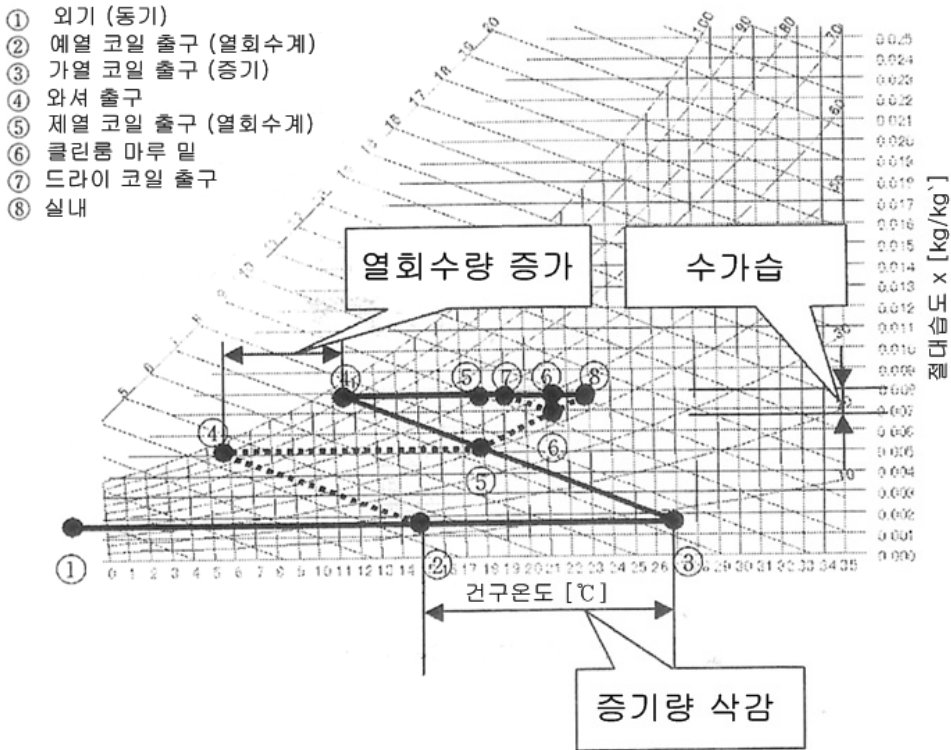


그림 14. 수분무 가습 추가 전후의 공기선도

시할 수 있고, 이로 인해 예열 코일의 가열 온도를 낮게 할 수 있다. 예를 들어 외기 공조 시스템 내 가습 장치의 출구 이슬점 온도 설정을 5 °C로 하면 예열 코일의 가열 온도는 15 °C 정도가 되고, $\Delta T = 12$ °C에 해당하는 가열 열량 (외기량 10,000 m³/h 때, 약 40 kW 정도)을 저감할 수 있다. 또 기존의 예열 코일 능력에 여유가 있으면 재열 코일의 증기량을 0으로 하는 것도 가능하다.

4.2 재열 코일 열 회수량 증가의 효과

외기 공조 시스템의 출구 외기온도가 일정하다면 출구 외기온도를 낮게 할 수 있어 재열코일에서의 가열량을 크게 할 수 있다. 재열 코일에서는 설

비 냉각수와의 상호 열 회수가 가능하기 때문에 재열코일 가열량의 증가량은 곧 열 회수량의 증가를 의미하고 이로 인해 에너지 절약 효과를 기대할 수 있다. 다만 기존 외기공조시스템의 재열 능력은 코일 능력, 열 회수 펌프 용량, 배관 사이즈 등에서 증가량을 확인할 필요가 있다.

4.3 수가습의 기화열에 의한 냉각의 효과

클린룸 실내에서 분무한 물방울이 공기 중에 기화하는 것에 의한 냉각량으로, 가습량에 물의 증발 잠열 539 cal/g을 곱한 양 만큼 실내 측의 냉각 부하가 경감되어 DCC(Dry Cooling Coil)의 운전시간을 감소시켜 냉열원의 운전비용을 저감할 수 있다.

부가적으로 냉방부하의 감소는 냉동기 용량감소, 냉수량 감소에 의한 배관직경과 펌프용량감소, 이에 따라 초기 공사비 저감 효과가 있다.

5. 기습 클린룸 시스템별 소비 전력량 비교 분석

우리나라 기흥 지역에 대한 증기습도 및 단순에어와서 외기공조시스템의 연간 에너지소비량을 산출하기 위한 수치해석을 실시하였다. 외기(OA) 조건은 그림 15에 도시된 바와 같이 우리나라에서 반도체 공장이 집중적으로 배치되어 있는 기흥 지역에 대한 2014년도의 1시간마다의 8,760개의 온습도 기상데이터를 사용하였다.

그림 16은 본 실험실에 연구용으로 설치된 Twin 클린룸에 대한 개략도이다. 이 외기량은 Twin클린룸에서와 마찬가지로 10,000 CMH로 설정하였고,

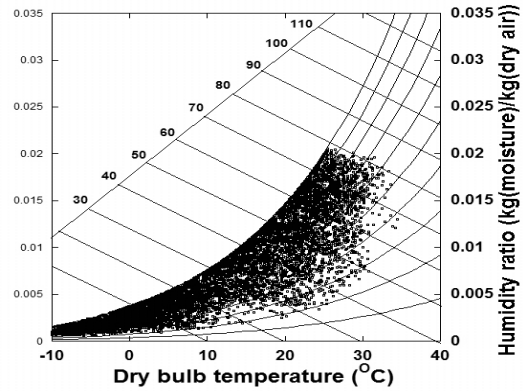


그림 15. 2014년도 기흥지역의 연간 기상청 온습도 데이터

기흥지역의 연간 기상청 온·습도 데이터를 이용하여 수치해석을 진행하였다.

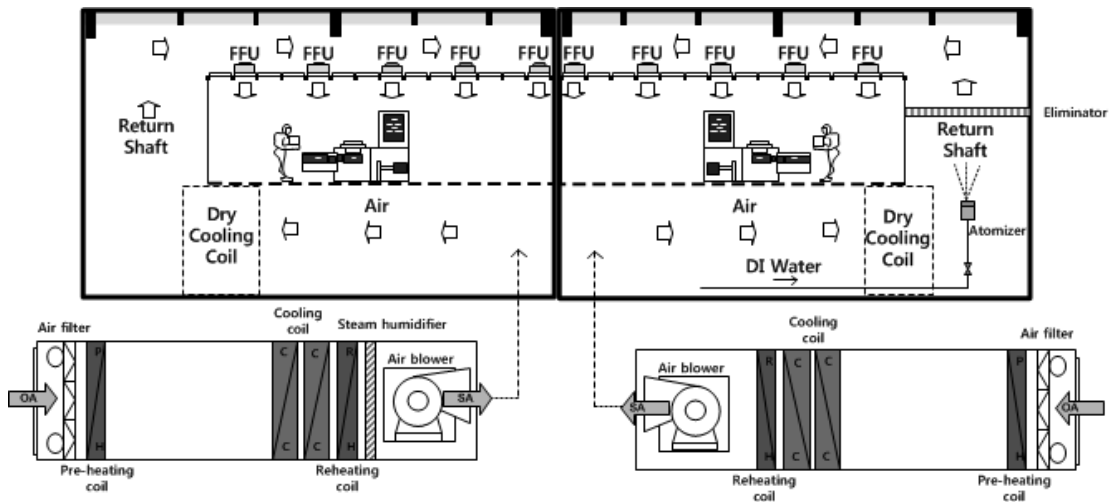


그림 16. 수치해석에 사용된 조건의 Twin 클린룸의 개략도



그림 17. 수치해석에 사용된 조건의 증기 가습 클린룸 시스템의 공조기



그림 18. 수치해석에 사용된 조건의 실내 수분무 가습 클린룸 시스템의 공조기

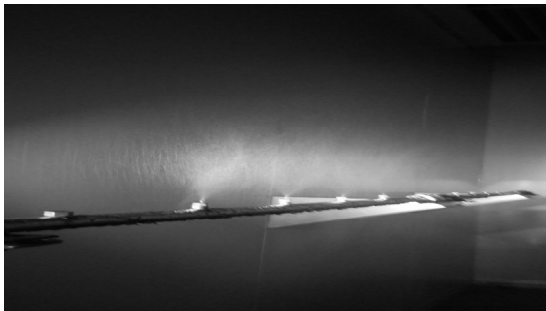


그림 19. 수치 해석에 사용된 조건의 일유체 노즐을 이용한 실내 수분무 가습기

그림 17, 18, 19는 수치해석에 사용된 조건의 증기 가습 클린룸 시스템의 공조기, 실내 수분무 가습

시스템의 공조기, 일유체 노즐을 이용한 실내 수분 무 가습기에 대한 사진이다.

또한 그림 20은 연간 수치 해석을 한 것을 월별로 나누어 그래프로 표시하였다. 가습이 거의 필요하지 않은 5월부터 9월까지는 비슷한 소비 전력량을 나타낸다. 하지만 가습량이 많은 11월부터 4월까지는 실내 수분무 가습 클린룸 시스템이 증기 가습 클린룸 시스템과 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템에 비해 현저히 낮은 소비 전력량을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그림 20에서 나타난 소비 전력량을 아래의 표 4에서 수치로 도시하였다.

표 4. 각 가습 시스템에 따른 연간 전력 소비량 비교

	증기 가습 시스템	단순 에어와셔식 수분무 가습 시스템	실내 수분무 가습 시스템
1월	223,361 [kWh]	146,105 [kWh]	98,919 [kWh]
2월	165,920 [kWh]	108,620 [kWh]	73,995 [kWh]
3월	161,623 [kWh]	105,862 [kWh]	70,722 [kWh]
4월	123,882 [kWh]	80,821 [kWh]	59,211 [kWh]
5월	77,157 [kWh]	67,516 [kWh]	65,419 [kWh]
6월	81,672 [kWh]	80,907 [kWh]	80,860 [kWh]
7월	101,212 [kWh]	101,212 [kWh]	101,212 [kWh]
8월	107,267 [kWh]	107,267 [kWh]	107,267 [kWh]
9월	87,114 [kWh]	84,087 [kWh]	83,854 [kWh]
10월	88,160 [kWh]	71,911 [kWh]	64,409 [kWh]
11월	141,118 [kWh]	93,254[kWh]	64,783 [kWh]
12월	198,580 [kWh]	130,112[kWh]	87,705 [kWh]
전체	1,557,000 [kWh]	1,177,674 [kWh]	958,357 [kWh]
공조 에너지 소비량	0.001777 [kWh/m ³]	0.001344 [kWh/m ³]	0.001094 [kWh/m ³]
Proportion	100 %	75.63 %	61.55 %

이를 보면 알 수 있듯이, 증기 가습 클린룸 시스템과 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템이 실내 수분무 가습 클린룸 시스템에 비해 많은 전력을 소비하고 있으며, 실내 수분무 가습 클린룸 시스템

템의 연간 전력 소비량은 증기 가습 클린룸 시스템에 비해 약 38.45 %, 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템에 비해 약 14.09 %의 에너지 절감율을 나타내는 것을 알 수 있다.

또한 이를 이용하면 단위 풍량당 공조 에너지 소비량을 구할 수 있다. 단위 풍량당 공조 에너지 소비량에서 증기 가습을 이용한 클린룸 시스템은 0.001777 [kWh/m³], 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템은 0.001344 [kWh/m³], 실내 수분무 가습 클린룸 시스템의 경우 0.001094 [kWh/m³]로 계산되며, 전체 에너지 절감율과 마찬가지로 38.45%가 절감 되는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본고에서는 연간 냉방운전이 요구되는 FFU 방식 반도체/디스플레이 제조용 클린룸에서 사용되는 가습 시스템에 따른 에너지 소비량과 절약 대책에 대해 논의하였다. 또한 에너지 절약형 일유체 노즐을 이용한 실내 수분무 가습 클린룸 시스템을 소개하고, 증기 가습 시스템 클린룸, 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템, 실내 수분무 가습 시스템 클린룸의 연간 소비 전력량을 분석하였다. 이를 이용하여 실내 수분무 가습 클린룸 시스템의 에너지 절약 성능에 대해서도 평가해 보았다. 기존에 일반적으로 사용되는 증기 가습 클린룸 시스템과 단순 에어와셔 수분무 가습 클린룸 시스템을 실내 수분무 가습 클린룸 시스템으로 대체하면 에너지 절약 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

- 참고문헌 -

1. 유경훈, 2004, “클린룸 설비의 에너지절약 대책”, 공기청정기술, 제17권, 제4호, pp. 1-19, 한국공기청정협회.
2. 유경훈, 2006, “클린룸 에너지절약”, 제6회 클린룸 기술 전문가 교육 자료집, 한국공기청정협회.

3. 유경훈, 2015, “공업용 클린룸을 위한 실내 수분무 가습 시스템 개발”, 에너지기술개발사업 단기 핵심과제 최종 보고서, 한국에너지기술평가원.
4. 송원일, 유경훈, 태경웅, 김용식, 2015, “반도체 클린룸용 공조시스템의 연간 에너지 소비량 수치해석”, 대한기계학회 열공학 부문 춘계학술대회, pp. 215-216, 15TE-Th06P115.
5. 유경훈, 김기철, 2012, “첨단전자산업 클린룸용 외기공조시스템의 에너지소비량 평가” 한국공기청정협회 기술지.
6. Satoshi Uemura., Kazuaki Iijima., Koji Suzuki, 2007, “Development of one fluid nozzle humidifying using time proportional controlling method”, Proc. of the 25th Annual Technical Meeting on Air Cleaning and Contamination control, pp. 94-96 (in Japanese).
7. JACA, 2007, “The energy conversion factors for a semiconductor factory”, Journal of Japan Air Cleaning Association, Energy saving technical committee 45 16-28 (in Japanese).
8. 榎藤 政則, 2008, “液晶・プリント基板等のミスト洗浄用強打力2流体ノズル”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 7호, pp. 62~64.
9. 植村 聡, 2004, “半導体工場における室内水噴霧加湿技術”, クリーンテクノロジー(클린테크놀로지), 11월호, pp.55~61.
10. J.M. Tsao, S.C. Hu, T. Xu, D.Y.L. Chan, 2010, “Capturing energy-saving opportunities in make-up air systems for cleanrooms of high-technology fabrication plant in subtropical climate”, Energy and Building 42 2005-2013.