

입자/가스상 오염물질 필터링 시스템

남승백 | (주)신성이엔지 기술연구소 부장
E-Mail : namsb@shinsung.co.kr

1. 서론

황사는 삼국시대 역사기록에서도 발견되는 아주 오래된 자연적인 기후현상으로 우리나라의 황사 발생일수가 매년 점차 증가하고 있으며 중금속이 포함된 미세먼지 농도도 크게 증가함에 따라 그 피해가 심각하다.

황사에 의한 피해는 인체뿐만 아니라 산업계 전반에 적지 않은 악영향을 끼치고 있다. 이 중 특히 반도체, FPD(Flat Panel Display)산업과 자동차 엔진, 정밀 전자부품 및 정밀기계 분야에서 불량률 증가와 생산성 감소 등 문제를 일으키고 있으며, 대기 중에 시정을 악화시켜 항공기의 이착륙시 운항 지연 및 결항사태를 초래하기도 한다.

황사의 피해는 황사자체의 피해와 더불어 중국의 산업화로 인한 각종 유해가스의 동반유입이 큰 문제를 일으키고 있다. 따라서 기업들은 피해를 최소화하기 위해 시설투자 및 공정개선 등 대책마련에 부심하고 있다. 미세먼지($0.1\mu\text{m}$ 이하)로 인한 수율저하 방지를 위해 멤브레인 필터(Membrane Filter) 등 고가의 필터 등을 적용하고 있으며, 황사와 동반한 유해가스의 피해를 최소화 하기 위해서 외기도입 공조기에는 케미컬필터의 사용이 강화되고 있다.

최근의 반도체 및 FPD 산업 분야에서는 미세선 폭 관리를 요구하며, 생산설비와 제품의 수율향상을 위해 입자상 오염물질은 물론 화학물질로 인한

가스상 오염물질 오염에 대한 대책마련에 부심하고 있는 실정이다.

황사에 의한 피해는 황사가 발생하기 2일전부터 마이크론 단위의 미세먼지가 먼저 도달하여 피해를 주는 경우가 있다고 알려져 있다. 하지만 황사에 의한 갑작스런 입자상 오염물질의 상승과 같은 자연환경 변화에는 아직까지 대응방법이 매우 미비한 상태이다.

클린룸에 도입되는 외기는 공기에 포함된 분진(particle, 塵埃)이나 각종 화학물질을 제거하여 공급할 필요성이 있다. 이러한 요구는 경제가 발달함에 따른 대기 환경의 오염이 증가하여 반도체 공장 주위환경이 악화됨과 아울러, 반도체의 집적도가 증가할수록 엄격히 요구되고 있는 실정이다. 화학물질을 제거하는 대책으로서는 일반적으로 케미컬필터(chemical filter)를 이용하면, 대기 중의 이산화황(SO_2), 암모니아(NH_3), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO_2), 유기물질 등을 제거할 수 있다. 케미컬필터는 상대적으로 먼지입자를 제거하는 집진용필터에 비하여 고가이고, 수명이 일반적으로 1년 정도로 비교적 짧기 때문에 클린룸에서는 다른 대책도 강구하고 있다.

최근에는 일본을 중심으로 반도체 공장의 다양한 외기처리 장치로 사용되고 있는 에어와셔를 이용하는 것을 검토하고, 이 시스템의 가스제거 효과를 확인하는 연구결과가 꾸준히 발표되었다. 에어와셔를 이용하는 경우 대기 중의 오염물질은 장치

내에서 분무되는 물에 흡수되어 제거되는 메카니즘으로 되어있다. 그러므로 물에 용해되기 쉬운 수용성 물질이 제거되기가 쉽게 된다. 에어와셔 시스템은 분무되는 물에 흡수된 물질과 공기 중에 물질 간에 평형관계가 있으며, 분무되는 물의 수중 농도가 높게 되면 공기 중의 농도도 높게 되어, 제거 효율이 저하된다.

2. 국내외 관련 연구 및 연구목적

국내 반도체 제조용 클린룸에서는 이미 외기처리공기조화기를 통해 유입되는 가스상 오염물질이 공정내에 유입될 경우 문제가 될 수 있는 공장용 기준으로 에어와셔 시스템이 도입되고 있다.

에어와셔는 일반적인 공조 시스템에서 주로 공급되는 공기 중에 물을 분무하여 수분을 증가시키기 위한 기습 목적으로 사용되는 시스템에 적용되고 있으며, 특히 섬유산업에서는 작업공정상 분진이 많이 발생하는 지역의 공기를 청정화 시키기 위한 수단으로 적용되기도 하며, 도장과 같은 특수한 공정에서는 공기 중의 오염가스(분진 및 휘발성 유기화합물 등)를 제거하기 위하여 사용되기도 하는 시스템이다. 이러한 에어와셔 시스템이 최근에는 일본을 선두로 클린룸의 외조기에 적용하여 외기에 포함된 가스상 오염물질을 제거하기 위한 수단으로 개발하여 실제 클린룸에 적용하는 연구가 진행되어 왔다.

여기에서는 그 동안 일본의 “공기청정 및 contamination control 대회”에 발표된 관련 논문을 검토하여 내용을 정리하여 보았다.

Kazuaki Iijima(1997) 등은 실험장치의 풍량을 $9000\text{m}^3/\text{h}$ 로서 실용규모의 크기를 실시하였다. 에어와셔 후단부에 설치한 송풍기의 풍량측정 장치로부터 일정량의 공기를 실험장치 입구까지 공급하고 장치의 입구에서 각종 실험가스를 $20\text{ppb}\sim 150\text{ppb}$ 의 농도가 되도록 가스통으로부터 공급하여, 입구(C_{in}) 및 출구(C_{out})의 농도를 측정하여 제거량을 측정하였다. 제습에 의한 가스제거 효과는 에어와셔를 운전함과 동시에 에어와셔의 후단부에 설치된 냉각코일에 약 10°C 의 냉수를 흘려보내 공기를 냉각제

습하고, 이 코일을 통과한 기류에서 가스농도를 측정하여 제거량을 검토하였다. 실험대상물로 사용했던 가스는 이산화유황(SO_2), 암모니아(NH_3), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO_2)의 4 종류를 사용하였다. 실험결과 에어와셔에 공급되는 분무수는 공업용수를 그대로 사용하여도 ppb Level로 외기에 포함된 화학물질의 일부를 제거할 수 있다는 것이 명확하게 밝혀져 유효성이 입증되었으며, 에어와셔 후단에 냉각코일을 설치하여 제공하는 것은 가스제거 효과를 높이기 때문에 유효하며, 암모니아에 대해서 에어와셔 수중의 농도와 제거율과의 관계를 구하여 필요한 제거율을 유지하기 위한 공급수량을 계산하였고, 에어와셔에 사용하는 수중의 칼슘, 나트륨 등의 불순물의 수중농도에는 커다란 변화가 나타나지 않음을 밝혔다.

Takahiro Watanabo(1998) 등은 유해한 공기 중의 화학성분 내의 암모니아(NH_3)에 착안하여 에어와셔를 설치한 외기처리 장치를 시작으로 제작하고, 제거를 위한 유효한 변수사양의 확인실험을 수행하였다. 실험에서는 암모니아(NH_3) 가스를 에어와셔 흡입가스로 사용하고, 변수로서는 수량, 풍량, 수질, 수온, 분무 단수, 냉수코일의 유무를 고려하여 실험한 결과 액 중 전도도는 시간경과에 대해 거의 직선적으로 상승하며, 액 중 NH_3 농도는 시간경과에 대해 지수함수적으로 상승한다. 그리고 분무수량 상승은 공기 중 NH_3 제거에 유리하지만, 그것에도 한계가 있다. 수량변화에서 $L/G = 1.0$ 이상은 필요한 것으로 판단되어지며, 풍량(풍속) 상승은 공기 중 NH_3 제거에 불리하다. 풍량변화에서 $L/G = 1.5$ 정도는 필요하고 시수에서도 수량 상승으로 순수와 동일한 정도의 제거효과를 얻었으며, 공기 중 NH_3 의 용해제거의 추진력은 공기액 중 NH_3 농도차로 고려할 수 있으나, 분무수량 상승으로 녹아서 존재하는 기타 가스의 영향이 무시되고 검토되었다.

또한 수온 저하는 공기 중 NH_3 제거에 상당히 유리하다. 냉수(약 6°C)는 온수(약 30°C)에 비해 약 2배의 효과가 나타났으며, 2단(병렬) 에어와셔의 공기 중 NH_3 의 제거는 1단으로 수량을 2배로 사용하는 것보다 높게 나타나고, 액 중 NH_3 의 농도 상승

에 비해서 이것의 우위성은 높게 나타나고 있다. 냉수 코일을 에어와서 입구측에 사용한 경우 공기 중 NH_3 제거효과는 상승하였다. 수온이 약 6°C 이하가 된 결과라고 판단된다. 한편, 출구측에 사용시에는 제거효과 상승이 없음이 밝혀졌다.

Hiroyuki Nakajima(1998) 등은 반도체 제조공장에 있어서, 외조기 내부에 설치된 에어와서의 암모니아를 중심으로 하는 수용성 물질의 제거성능을 실측하고, 이의 효과에 대해서 검토한 결과 에어와서에 의해 외기 중의 수용성 물질이 제거되었으며, NH_4^+ 의 제거율은 16~48%, SO_4^{2-} 는 63~80%, NO_3 는 36~48%로 나타났고, 냉수코일의 응축효과에 의해 수용성 물질이 제거되어 감소되었음을 밝혔다. 이러한 효과는 여름철 제습시 가장 효과가 크게 나타났다. 외조기 출구에서는 에어와서·코일의 효과에 비하여, 외기보다도 저농도인 기간에는 안정한 농도의 공기가 얻어졌다. 특히 NH_4^+ 농도는 연간 안정적으로 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지할 수 있었으며, 에어와서 보급수를 상수(시수)에서 회수순수로 변경하면 암모니아의 에어와서용 물로의 흡수효과가 증대함을 밝혔다.

Hiroyuki Nakajima(1999) 등은 에어와서 실험장치를 2뱅크 대향류형으로 제작하여 통과 풍속을 2.5m/s, 처리풍량은 100,000 m^3/h , L/G비는 1.0으로 제작하여 실험을 실시하였다. 에어와서의 수질에 따른 제거성능의 차이를 확인하기 위하여 시수 및 순수 2종류의 보급조건을 선정하여 반도체 제조공장의 에어와서가 있는 외조기에서 수용성 물질의 제거성능을 실측하고, 이의 효과에 대해서 검토한 결과, 에어와서에 의하여 외기 중의 무기·금속·유기 물질이 저감되었으며, 후단에 설치된 냉각 코일에도 냉각응축 효과에 의하여 수용성 물질이 저감되었다. 이것은 코일에 응축된 응축수를 분석한 결과 확인되었으며, 하절기 제습 시기에 효과가 더 크게 나타났다. 외조기 출구에서는 외기 보다도 저농도로 되어 안정된 농도의 공기가 얻어졌다. 특히 NH_4^+ 농도는 1년 반 동안 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하가 되었다. 따라서 클린룸용 공급공기의 허용 NH_4^+ 농도가 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도인 경우 에어와서를 채용한 외조기로 외

기처리를 하면 NH_4^+ 와 같은 유기이온 제거용 케미컬 필터를 설치할 필요가 없다고 생각된다. 에어와서 보급수를 시수에서 순수로 변경하면 에어와서의 물로부터 암모니아 흡수효과가 증가함을 밝혔다.

Kazuaki Iijima(1998) 등은 에어와서 실험장치를 약 370mm × 370mm의 단면으로 제작, 처리풍량은 1,000 m^3/h 를 적용하였다. 장치에 공급되는 대기는 프리필터에서 진애류를 거른 다음, 히터와 냉각코일, 기습기에 의해 온도 및 습도를 일정한 요구치까지 조절하게 된다. 이후에, 케미칼 필터, 헤파(HEPA) 필터에 통과되면서 대기 중의 화학물질과 먼지의 농도를 낮추게 된다. 다시 한번 시험가스를 소정의 농도가 되기 위하여 일정량의 보충가스를 에어와서 입구부분에 주입하였다. 에어와서의 입구와 출구의 공기를 샘플 채취하여 시험가스 농도를 측정하고, 제거율을 산출하였다. 또한 정기적인 에어와서의 순환수를 샘플 채취하여 수중의 각 물질의 농도를 측정하고, 제거율과의 관계를 검토하였다. 공기 중의 SO_2 가스를 에어와서로 제거하는 경우에 관해서, 분무용 물을 순수를 사용하는 경우와 수도수를 사용하는 경우를 비교하고, 이에 대해 수중의 SO_4^{2-} 이온농도가 미치는 영향 및 Ca^{2+} 등의 양이온의 영향에 관하여 조사하여 다음의 결과들이 확인되었다. 순수만으로 SO_2 가스를 주로 함유한 공기를 흡수하는 경우에 순수의 보급수량과 제거율의 관계를 얻을 수 있었으며, 수도수를 사용한 경우에는 순수를 사용하는 경우와 비교하여 보급수량은 적은 수량 사용이 가능하여 경제적이다. 수중에 Ca^{2+} 이온 등 양이온이 포함되어 있는 경우, 수중에 녹아드는 SO_2 의 양이 증가하므로 보급수량이 적어짐을 밝혔다.

Seijirou Yoshizaki(1999) 등은 실험장치를 풍량 1000 m^3/h 를 이용하여 실험적으로 황화합물과 암모니아 가스는 정상상태에서 입구공기의 습구온도가 올라갈수록 제거효율은 점점 감소함을 밝혔으며, 희박한 가스를 대상으로 하는 물 흡수의 경우에는 온도의 변화에 비하여 흡수속도는 가스의 확산계수보다 헨리정수의 영향이 크다는 것을 실험적으로 밝히고, 외기의 계절에 따른 온습도의 변동에 비

하여 가스제거 효율의 변동이 없는 시스템으로 에어와셔의 양단에 냉각코일을 설치하고 후단에 냉각수를 먼저 공급한 다음 출구의 물을 다시 전단 냉각 코일에 공급하는 시스템을 제안하였다.

기존의 연구에서 나타나는 바와 같이 기본적인 가스상 오염물질 제거 시스템에 대한 연구를 수행하여 가스상 오염물질의 제거 성능에 관련된 결과를 밝히고 있으나, 입자상 오염물질의 성능에 대한 연구결과나 언급이 없으므로 이와 관련된 연구가 병행될 필요가 있음을 알 수 있다.

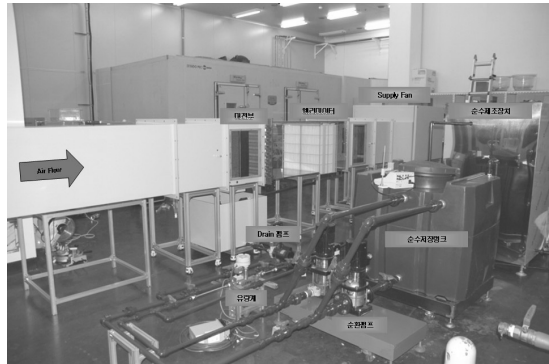


그림 1. 풍동 시스템의 사진

2.1 연구 목적

전술한 바와 같이 지금까지의 에어와셔는 공기 중에 존재하는 가스상 오염물질을 제거하기 위한 수단으로 연구되고 클린룸에 적용되어 왔다. 본 연구에서는 반도체, FPD 산업 및 정밀제품 제조분야에서 황사와 같은 외부 환경에 의해 발생하는 입자(particle)상태나 가스(gas)상태의 오염물질을 동시에 제거할 수 있는 장비를 개발하고자 하였다. 따라서 가스상 오염물질과 입자상 오염물질로부터 발생하는 제품의 수율저하를 방지하기 위한 청정공기 공급 시스템을 설계하고 풍동시스템을 제작하여 입자/가스상 오염물질 제거에 대한 성능평가를 수행하였다.

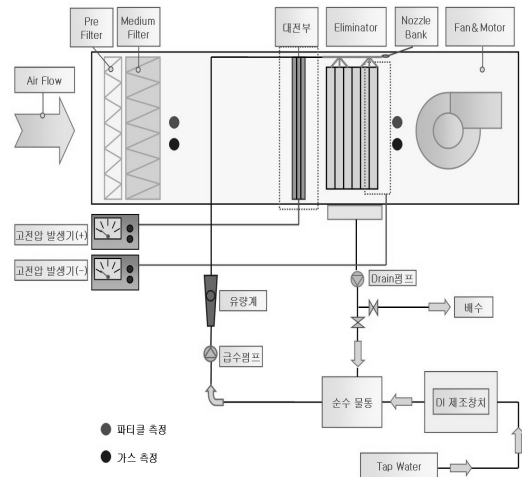


그림 2. 풍동 실험장치의 개략도

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 구성

입자/가스상 오염물질 제거성능을 평가하기 위해 3,200CMH급 풍동시스템을 설계 제작하였다. 본 연구에 사용된 풍동은 각 부품의 위치변경이 용이하도록 설계하였고, 특히 주요 핵심부품인 엘리메네이터를 설치하는 덕트는 무정전 아크릴로 제작하여 가시화가 가능하도록 하였다.

전체 풍동은 7개 파트로 구분되어 있으며 크기는 640(W)× 630(H) ×5,400(L)이다. 그림 1에 풍동시스템 사진을 나타내었다.

그림 2는 실험장치의 개략도이다. 도입된 외기는 프

리필터와 중성필터에서 큰 사이즈의 입자상 오염물질을 제거한 후 대전부 및 엘리메네이터를 통과하면서 입자/가스상 오염물질이 제거되도록 구성하였다.

공급되어지는 순수는 초순수 제조장치에서 18.2 MO/cm 전도도를 갖는 초순수를 제조하여 순환수통으로 공급한다. 펌프를 통해 엘리메네이터용 노즐뱅크로 순환수가 공급되고 엘리메네이터에서 도입된 외기와 열 및 물질전달 후 드레인된다. 드레인된 물은 드레인펌프를 통해 80%는 순수수물통으로 보내어지고 20%는 배수된다. 20%를 배수 시키는 이

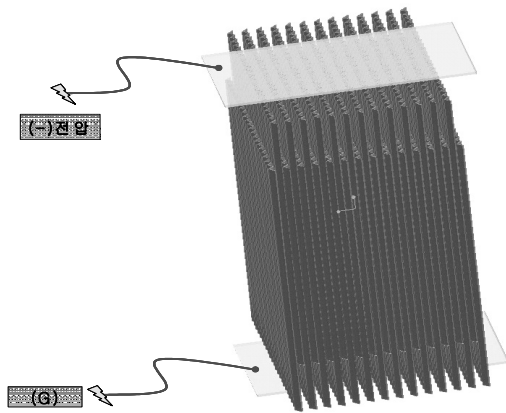


그림 3. 엘리미네이터 대전방법의 개략도

유는 도입된 외기에 포함된 오염물질이 엘리미네이터에서 제거되면서 순환수의 전도도값이 상승하게 되고 초순수를 공급하지 않고 연속운전하게 되면 염기성 가스인 NH₃에 의해 pH가 상승하게 되어 NH₃의 제거율이 저하되는 등의 문제가 발생하므로 공급되는 순수의 전도도 및 pH 조절을 위해 반드시 필요하다.

본 연구에서는 기존의 전기집진방식인 대전⊕집진하는 방식을 응용하였다. 대전부는 기존의 공기청정기 등에서 사용하는 대전방식과 같지만 집진부는 엘리미네이터 자체에 (-)전하를 띄게하는 방식을 채택하여 입자/가스상 오염물질을 엘리미네이터에서 동시에 제거할 수 있도록 하였다. 엘리미네이터에 (-)대전 방법에 대한 개략도를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 엘리미네이터 날장을 번갈아 가며 (-), (접지), (-), (접지) 설치하는 방법이다. 설치를 쉽게하기 위해 엘리미네이터의 높이차를 두고 상부, 하부에 각각 STS판을 두어 STS판으로 (-), (접지) 결선이 용이하도록 하였다.

3.2 실험방법

성능평가는 반도체 제조공장 외조기 실제 운전 조건인 전면풍속 2.5m/s, 액기비(L/G) 0.05를 기준으로 수행하였다. 액기비의 정의는 식(1)에 나타내

었으며, 액기비는 공기(가스)의 질량유량대비 물(액체)의 질량 유량의 비를 의미한다.

$$L/G = \frac{\text{액체의 질량유량}}{\text{공기의 질량유량}} \quad (1)$$

입자상 오염물질 제거를 측정을 위해 (+)대전부의 전압은 4.8~6.0kV, (-)집진부의 전압은 -2.0~-3.5kV 범위에서 수행하였다.

전압을 이 이상의 고전압으로 승압시키지 못한 이유는 오존(O₃)발생과 플라즈마 방전이 아닌 아크방전이 발생하였기 때문이다. 아크방전은 고전압발생기와 각종 장비에 심각한 영향을 초래하게 된다.

가스상 오염물질의 제거성능은 액기비를 변화시키며 측정하였고 액기비의 범위는 0.03~0.07 범위에서 수행하였다. 표 1은 실험 중 기본적인 입구 공기 온습도 및 분무수의 온도, 전도도 그리고 pH를 나타내었다.

3.3 입자/가스상 오염물질 측정방법

3.3.1 입자상 오염물질 측정방법

입자상 오염물질 측정방법은 본 연구에서 상당히 중요한 부분을 차지한다. 기존의 입자상 오염물질을 측정하는 파티클 카운터의 경우 측정 가능한 입자의 크기나 양이 제한적이어서 일반 대기중의 입자상 오염물질을 측정하기에는 부적절하다. 따라

표 1. 풍동장치의 운전 조건

항 목	단 위	조 건	비 고
통과풍량	CMH	3,200	
입구공기 온도	°C	21~22	
입구공기 습도	%RH	65~70	
분무수 온도	°C	22~23	
분무수 전도도	MΩ/cm	0.1~0.3	
분무수 pH	-	4.7~7.7	
입구가스농도	NH ₃	22~33	ppb
	SOx	0.2~2.8	ppb
	NOx	5.0~15.9	ppb
액기비(L/G)	-	0.05	

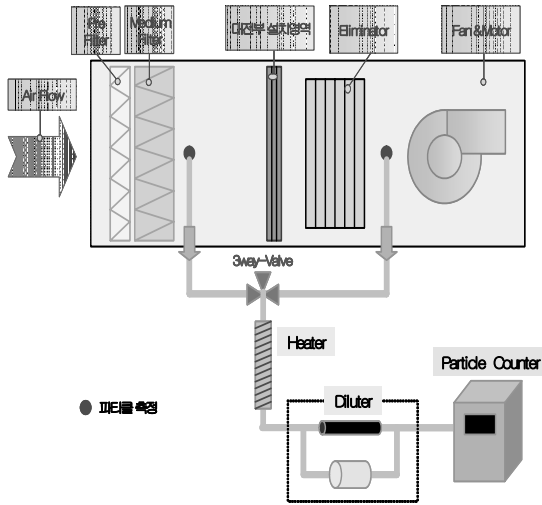


그림 4. 입자상 오염물질 측정 개략도

표 2. 파티클 카운터의 규격

제 조 사	Particle Measurement System (미국)	
모 델 명	LASAIR II	
주 요 사양	유 량	1 CFM (28.3 lpm)
	최 소 측정입경	0.1 μm
	채 널 수	6채널 (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.5 μm)
	최 대 측정농도	500,000/ft ³

서 본 연구에서는 Diluter(희석기)를 설계 제작하여 입자상 오염물질 측정시 사용하였다. 희석기의 희석비는 1:200으로 인입되는 입자상 오염물질의 개수를 1/200으로 줄게하는 효과가 있다.

제거효율은 실험장치 전단의 입자상 오염물질 개수와 엘리미네이터 후단의 입자상 오염물질 개수의 비율로 계산된다. 특히 엘리미네이터 후단의 경우 상대습도 90% 이상 되므로 수분에 의한 데이터의 오차를 줄이기 위해 희석기 전단에 히터를 설치하여 수분의 영향을 최소화하였다. 또한 전후단 측정시 3-way 밸브를 설치하여 전후단 측정을 용이하게 하였으며, 외기에서 인입 되는 입자상 오염물질의 개수는 주변의 다른 요인으로 인해 쉽게 변동되기 때문에

입자상 오염물질 측정시 전단 2회, 후단 2회 번갈아 총 10회를 측정한 뒤 평균하여 제거효율을 계산하였다. 그림 4에 입자상 오염물질 측정 개략도, 표 2에 사용된 파티클 카운터의 사양을 나타내었다.

3.3.2 가스상 오염물질 측정방법

가스상 오염물질의 측정위치는 입자상 오염물질 개수를 측정하는 위치와 동일선상에 위치시켰으며 그림 5는 가스상 오염물질 측정 개략도이다. 순환수통의 순환수는 엘리미네이터 상부에 위치한 노즐뱅크를 통해 분무되며, 공기중의 가스상 오염물질인 NH₃, SO_x, NO_x 등은 엘리네이터에서 제거된다. 에어와셔의 가스 제거성능을 측정하기 위해 임핀저(Impinger)법을 사용하였다. 임핀저법을 이용한 가스분석은 1회 포집으로 여러 가지 이온분석이 가능하며, 최적의 조건에서는 99% 이상의 포집효율을 가질 수 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 임핀저 포집방법은 습식 샘플링 방법 중 대표적인 포집방법으로 저농도에 대한 샘플링시 장시간의 샘플링을 통하여 가스를 농축함으로써 분석의 효율성을 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

공기 중에 존재하는 산, 염기 가스는 수용성 성분으로 흡수용액(초순수, DI)을 넣은 임핀저에 Air pump를 연결하여 흡입하면 공기중의 수용성 성분이 용해된다. 가스상 오염물질을 포집한 흡수용액을 IC(이온크로마토그래피)로 분석하면 각 성분의 정성, 정량 분석이 가능하다. 분석 대상 물질은 이

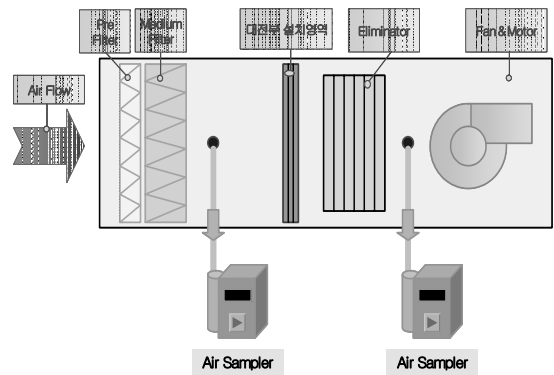


그림 5. 가스상 오염물질 측정 개략도

온교환수지에 포함된 분리칼럼의 리텐션타임(Retention time)의 차이에 따라 분리되며 전기 전도도 검출기에서 각 성분의 전도율을 검출한다.

정량은 표준용액으로부터 검량선을 작성하여 수행한다. 본 연구에서는 100ml 초순수에 2LPM의 유량으로 2시간의 샘플링을 통해 오염가스 분석을 수행하였다. 표 3에 분석에 사용된 이온크로마토그래피의 사양을 나타내었다.

표 3. 이온크로마토그래피의 규격 및 분석조건

항 목	규격 및 운전 조건	
	양이온	음이온
Model	DX 600	ICS 2000
펌 프	GS 50 Gradient Pump	Gradient Pump
검 출 기	CD25 Conductivity Detector	Conductivity Detector
컬 럼	IonPac CG12A, CS12A(4mm)	IonPac AG18, AS18(4mm)
서프레서	CSRS 2, Dionex, 100 mA	ASRS 2, Dionex, 120 mA
용 리 액	20 mM Methane Sulfonic Acid	KOH (Eluent generator)
시료주입량	500 μ l	1000 μ l
시료 주입	Auto ampler(AS40)	Auto sampler(AS40)
유 속	1 ml/min	1 ml/min

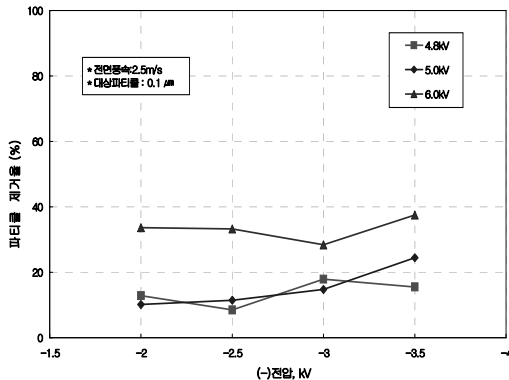


그림 6. 전압변화에 따른 입자상 오염물질 제거성능 (전면풍속 : 2.5m/s)

4. 실험결과

4.1 입자상 오염물질 평가 결과

그림 6은 전면풍속 2.5m/s에서 (+), (-) 전압변화에 따른 0.1 μ m 크기의 입자상 오염물질 제거 성능을 나타낸 그래프이다. (+)6.0kV, (-)3.5kV 일때 0.1 μ m 크기의 입자상 오염물질 제거율은 약 39% 임을 알 수 있다. 즉, (+)대전부의 전압이 4.8kV에서 6.0kV로 증가할수록 입자상 오염물질의 제거성능은 약 25% 향상됨을 보이며, 엘리미네이터에 인가한 (-)전압 증가에 따른 입자상 오염물질 제거성능은 약간 상승하는 경향은 있지만 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구를 통해 입자상 오염물질 제거성능은 (+)대전에 의한 영향이 크며 제거효율 향상을 위해 (+)대전을 보다 효과적으로 해야 함을 알 수 있다.

그림 7은 (+)6.0kV일때 전면풍속 변화에 따른 입자상 오염물질 제거성능을 나타낸 그래프이다. (-)3.5kV, 1.5m/s 영역에서 50% 제거효율을 보이지만 풍속에 따라 입자상 오염물질 제거성능은 30~40% 내외로 큰 차이가 없다. 즉 입자상 오염물질 제거성능은 전면풍속의 영향을 크게 받지 않음을 확인할 수 있다.

그림 8은 전면풍속 2.5m/s 일때 입자상 오염물질 크기별 제거성능을 나타낸 그래프이다. 입자상 오

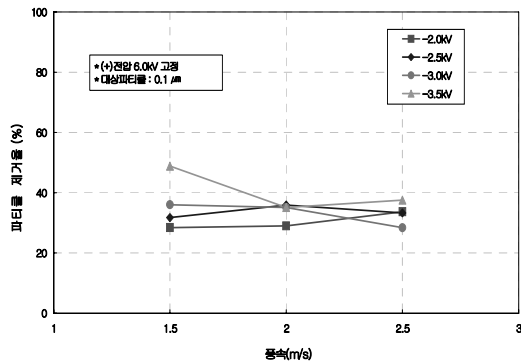


그림 7. 전면풍속 변화에 따른 입자상 오염물질 제거성능 (대전부 전압 : +6.0 kV)

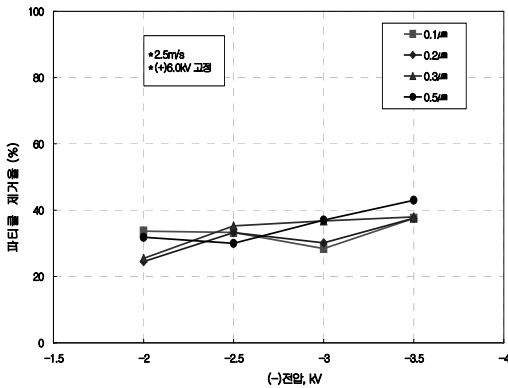


그림 8. 입자상 크기에 따른 오염물질 제거성능

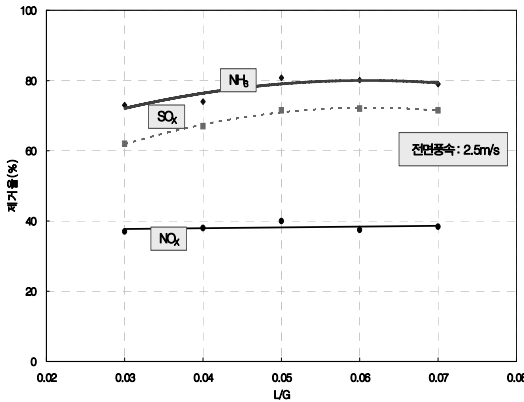


그림 9. 액기비(L/G)에 따른 가스상 오염물질 제거성능

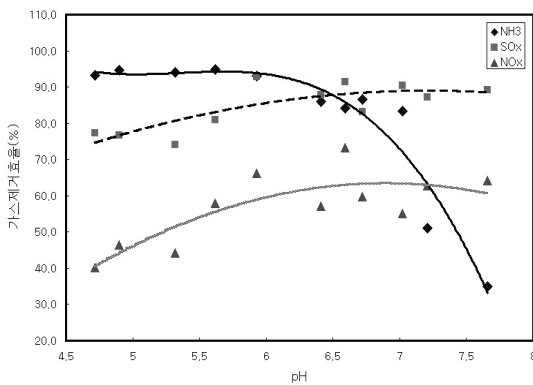


그림 10. 분무수의 pH에 따른 가스제거 성능

염물질 크기에 따라 제거율은 10% 내외로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 입자상 오염물질 사이즈에 따른 관성력보다 전자기력의 지배가 크기 때문으로 판단된다.

결과적으로 공조기 등에 적용하는 미디엄필터 이상의 제진효과를 얻기 위해서는 일반적인 풍속 조건인 2.5m/s내외에서 80% 이상(0.1μm기준)의 효율을 보여야 제품화가 가능할 것으로 예상된다. 따라서 향후 연구목표는 일반적인 공조기의 풍속에서 80% 이상(0.1μm기준)효율을 달성하는 것이다.

4.2 가스상 오염물질 평가 결과

그림 9는 액기비(L/G)에 따른 가스상 오염물질 제거 성능 그래프이다. 전면풍속 2.5m/s 일때의 결과로 NH₃와 SO_x는 액기비가 증가할수록 제거효율이 증가하나 액기비 0.05 이상인 경우에는 제거효율에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 NH₃와 SO_x는 수용성 가스로 분무되는 물의 양에 따른 영향이며, 액기비 0.05 이상인 경우는 그 영향이 크지 않는 것으로 판단된다. 그러나 분무수의 pH변화에 따른 가스제거성능은 그림 10처럼 다양한 결과를 얻을 수 있었다.

4.2.1 pH에 따른 NH₃의 제거성능 실험결과

그림 10에 분무수의 pH에 따른 가스제거 성능을 NH₃, SO_x, NO_x에 대해서 나타내었다. NH₃의 경우 pH가 6이하인 경우에는 90% 이상의 효율을 지속적으로 나타내었으나, pH가 7.2에서는 제거효율이 50%로 급격히 낮아지는 것을 볼 수 있다. 에어와셔의 가스제거 메카니즘은 수용성 가스가 물에 흡수되는 과정으로 볼 수 있다. 이 때 가스의 제거효과는 분무수에 대한 대상가스의 이온해리도 및 물질 전달계수와 관련되는 것으로 판단된다. 본 연구에서 분무수의 pH가 7이상이 되면 알칼리성을 띄기 때문에 알칼리성 가스인 NH₃의 분무수에 대한 이온해리도가 낮아져서 제거성능이 감소하는 결과로 나타난다. 이를 뒷받침하는 연구결과로서 그림 10의 pH에 따른 이온해리도의 계산결과를 들 수 있다. 그림 10에서 NH₃의 이온해리도는 pH 6 근처

에서는 100%이나 pH 6 이상에서는 급격히 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 가스제거 성능이 대상가스의 물에 대한 이온해리도의 영향을 직접적으로 받는다는 것을 알 수 있다. 그림 11은 NH₃와 SO_x의 이온해리도 곡선으로서, 그림 10의 실험결과와 SO_x는 정확하게 일치하지는 않지만 NH₃의 경우에는 아주 잘 일치함을 알 수 있다.

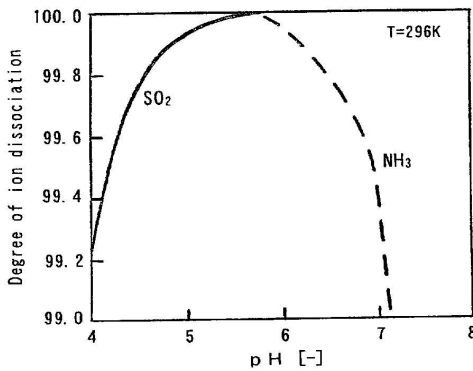


그림 11. NH₃와 SO_x의 이온해리도 곡선

4.2.2 pH에 따른 SO_x의 제거성능 실험결과

산성가스인 SO_x의 제거효율은 NH₃와는 대칭적으로 나타난다. pH가 6이상에서는 80~90%의 제거성능을 나타내며, pH가 6이하이면 70~80% 범위로 제거성능이 낮아진다. NH₃와 비교하면 pH가 산성 쪽으로 이동함에 따라 가스제거 성능의 감소율이 낮음을 알 수 있다. 이는 그림 10에서 pH에 따른 SO_x의 이온해리도가 pH 6을 기준으로 pH 4까지 완만하게 떨어지는 것과 관계가 있다. 즉 pH에 대한 이온해리도의 감소율에 있어서, pH 6을 기준으로 pH가 증가하는 경우의 NH₃의 이온해리도 감소율보다 pH가 감소할 때의 SO_x의 이온해리도 감소율이 더 작아 SO_x의 제거효율이 pH 4.7인 경우에도 70% 이상의 결과를 나타내고 있다고 판단된다.

4.2.3 pH에 따른 NO_x의 제거성능 실험결과

역시 산성가스인 NO_x의 경우는 pH 6.5이상에서는 50~70%의 넓은 범위에서 가스제거율을 나타냈고, pH가 4.7까지 낮아지면 40%정도로 제거효율이

낮아지고 있다. 전체적인 가스제거효율은 NH₃와 SO_x보다 낮다. 다만 이 결과는 임핀저 법에 의한 것이다. 산성가스의 측정방법에 있어서 NO_x는 임핀저법과 화학발광법에 의한 NO_x계를 사용하는 방법이 있다. 화학발광법은 실시간으로 NO_x의 농도를 가스별로 측정할 수 있으며 NO_x의 전체량을 비교적 정확하게 측정하는 것으로 알려져 있다. 임핀저법은 산성가스에 대해서 사용하는 일반적인 방법이나 NO_x계를 사용하는 경우와 비교하면 대기 중 NO_x의 80~90%를 차지하는 NO₂에 대하여 전체 양 중의 10~30%만 포집하고 있는 것으로 발표되었다. 이러한 결과를 토대로 볼 때 NO_x의 물에 대한 용해도 및 이온해리도가 NH₃와 SO_x에 비해서는 매우 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서 에어와셔에 있어서 NO_x의 제거성능이 NH₃와 SO_x의 제거성능보다 현저히 낮게 나타남을 알 수 있다.

4.2.4 최적의 가스제거 성능 확보를 위한 에어와셔 분무수의 pH 관리방안

에어와셔는 주로 반도체용 클린룸의 외조기(out door air conditioning unit)에 설치되며 주로 외기에 포함되어 있는 수용성 가스를 제거한다. 클린룸용 에어와셔는 순수를 공급수로 사용하며 분무수의 약 20%를 시스템 외부로 배출시키고 10~15MΩ·cm 정도의 2차 순수를 다시 보충하는 시스템으로 구성하고 있다. 그러나 외기의 상황이 계절별로 변동하고 특히 외기 중에 알칼리성 가스보다는 산성가스가 다량 포함되어 있어 에어와셔를 순환하는 물은 pH가 낮은 쪽으로 변화할 가능성이 높다. 따라서 이러한 경우에 대비하여 pH 변화에 따른 제거대상가스의 제거성능에 대한 기초자료를 확보할 필요성이 있는 것이다. 본 실험결과에 의하면 에어와셔에서 제거대상가스인 NH₃, SO_x, NO_x에 대하여 총괄제거효율을 높이기 위해서는 pH를 6~6.5의 범위에서 운전하는 것이 최적임을 도출해 내었다.

5. 향후 추진방향

지금까지 수행한 연구결과에서 입자상 오염물질의 제거효율향상이 만족할 만한 성과를 나타내지 못했다고 판단된다. 기존의 가스상 오염물질만 제

거하는 기능으로서의 에어와셔 시스템과 다르게 입자상 오염물질의 제거성능이 중성능 필터의 기능을 수행할 수 있다면 후단에 설치된 필터(HEPA, ULPA)의 수명은 한층 연장할 수 있기 때문에 매우 중요한 역할을 수행할 수 있다고 판단된다. 따라서 향후 좀 더 기능을 보완하여 입자제거성능을 개선할 수 있는 추가적인 연구를 수행하고 있다. 또한 By-product의 적절한 제어방법도 해결해야할 과제로 남아 있으므로 함께 진행예정이다.

6. 결 론

외기중의 입자/가스상 오염물질 제거를 위한 공동시스템 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 입자상 오염물질 평가 결과, 전면풍속 2.5m/s, 액기비 0.05, 대전부 (+)5.8kV, 엘리미네이터에 (-)3.5kV 하전하였을 때 제거효율이 0.1 μ m 기준으로 약 40%이며, 입자상 오염물질 크기에 따른 제거성능 변화는 10% 내외로 큰 차이가 없음을 확인하였다.
- (2) 가스상 오염물질 평가 결과, 액기비 0.05 이상에서는 액기비 증가에 따른 제거효율의 증가가 크지 않음을 확인하였다.
- (3) 순수를 분무수로 사용하는 에어와셔에 있어서, 제거대상가스인 NH₃, SO_x, NO_x의 제거효율을 최적으로 제어하기 위해서는 분무수의 pH를 6.0~6.5의 범위에서 조절해야 함을 알 수 있었다.

- 후 기 -

본 연구는 소방방재청 지원으로 수행하는 퇴적황사재해 피해평가 및 대응기술개발의 일환으로 수행되었습니다.

- 참 고 문 헌 -

1. 안문수, 2003, “황사피해 저감대책” 방재연구 제5권 제1호 통권 17호 pp.23~30.
2. 주장민, 정희성, 강광규, 유난미, 김미숙, 2003, “동북아 지역의 황사 피해 분석 및 피해저감을 위한 지역협력방안 1” 한국환경정책평가연구원, pp.77.

3. Kazuaki Iijima, Teruyuki Kawashima, Masanri Fujii, Tsutomu Hasegawa,(Sanki Engineering Co., Ltd.), 1998, “Removal of chemical compounds from outside air by air washer(part 2)”, 16th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control. pp.9~12.
4. Kazuaki Iijima, Teruyuki Kawashima, Masanri Fujii, Tsutomu Hasegawa,(Sanki Engineering Co., Ltd.), Shuzo Akita, Tsuguaki Uemura, Shouzo Tomita, Toshihisa Shimizu(Kubota Corporation), 1997, “Removal of chemical compounds from outside air by air washer”, 15th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control. pp.75~78.
5. 渡辺高弘, 井美彦, 村田耕一, 和田力, 1998, “Removal of chemical compounds in air by air washer”, 16th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control. pp. 1~4.
6. Hiroyuki Nakajima, Shigeo Honda(Asahi Kogyosha Co., Ltd.), 1998, “Removal of chemical compounds in air by air washer”, 16th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control. pp.5~8.
7. Hiroyuki Nakajima, Shigeo Honda(Asahi Kogyosha Co., Ltd.), 1999, “Measurement of removal efficiency for inorganic compounds by air washer(part 2)”, 17th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control. pp.9~12.
8. Seijirou Yoshizaki, Tsutomu Hasegawa, Masanri Fujii, Kazuaki Iijima(Sanki Engineering Co., Ltd.), 1999, “Removal of chemical compounds from outside air by air washer(part 3)”, 17th Annual Tech. Meeting on Air Cleaning and Contamination Control. pp.1~4.
9. 박근우, 2004, “친수성 엘리미네이터를 이용한 에어와셔의 가스 제거 성능”, 신성이엔지 사내논문집 제7호, pp.53~63.
10. Hitoshi Inaba, Noriaki Okamura, Atsushi Takahashi, “Effectiveness of hydrophilic eliminator installed in air-washer”, 1999 일본공기청정 37권 4호, pp.39~45.
11. 榎間 智明, “임편저에 의한 NO_x 측정에 있어서 화학발광법과의 상관관계”, 2005. 7 Clean Technology pp. 80~83.
12. “클린룸 환경의 계획과 설계”, 2000, 사단법인 일본공기청정협회, pp.36~37.