

# 초청정 클린룸의 공기이온화에 대한 실험적 연구

## Experimental Study on Air Ionization Phenomena in the Super Clean Room

오 명 도\*, 배 태 식\*, 김 선 창\*  
M. D. Oh, T. S. Bae, S. C. Kim

Key Words : Air ionization(공기 이온화), Ion density(이온농도), Discharge time (중화 시간), Ion mobility(이온 이동도)

### ABSTRACT

Experimental study on air ionization phenomena has been conducted to analyze the propagation behavior and dischargeability of polarity air ions under the super clean room environments with the operation of prototype of Air Ionization System. Varying humidity and air velocity, the distribution of air ion density and the discharge time are measured and analyzed.

### 1. 서 론

오늘날 전자산업, 특히 반도체 산업의 급격한 발달로 생산 환경조건으로서 초청정 공간의 필요성이 늘어나고 있다. 초청정 기술의 발달로 오염입자 제어를 위한 효과적인 기술이 개발되어 가고 있지만 클린룸 공간내의 정전기에 의한 문제들도 해결해야 할 중요한 과제로 부각되고 있다.<sup>1)</sup>

정전기는 반도체 제조 등의 공정에서 쉽게 발생되는데 반도체 부품이 대전되면 주변 공기 중의 먼지 입자를 정전기적인 인력으로 끌어당겨서 표면이 오염되어 불량품으로 되거나 심한 경우 정전기 방전으로 인해 파괴되어 버리기도 한다. 정전기로 인한 이러한 피해를 방지

하기 위해서 클린룸 내부의 습도를 높게 유지하거나 전기 전도성이 좋은 재질을 사용하여 접지시키는 방법이 이용되지만 이러한 방법으로는 정전기를 신속하게 제거하는 것이 불가능한 경우도 많다.

공기 이온화 장치(Air Ionization System)는 클린룸 천정에 설치되어 양이온과 음이온을 교대로 발생시켜서 정전기를 빠른 시간 내에 효과적으로 중화시키는 장치인데 첨단산업에서 정전기에 의한 피해가 갈수록 심각해 짐에 따라 그 필요성이 커져 가고 있다.

공기 이온화 장치는 처음에는 전원장치에서 7~10kV 정도의 고전압 교류를 발생시켜서 클린룸 천정으로 배선하여 전극에 인가하는 방식이 이용되었다. 그러나 이 방식은 고전압이 클

\* 정회원, 생산기술연구원 기계기술실용화 센터

린룸 공간 전체에 인가되어서 이로 인한 전자과장에(EMC, Electromagnetic Interference, EMI)문제가 생기고 발생된 이온의 재결합율이 커서 이온 발생 효율이 떨어지며 이온농도의 불균형이 심하고 오존의 발생량이 많다고 보고되어 있다.<sup>2)</sup> 그런데 1991년 현재 일본의 Takasago Thermal Engineering 사에서는 격자 모양으로 배열된 전극침에 교류 11.5kV를 인가하고 그 주변에 그물눈 모양으로 배치된 접지극에 직류 -30~500V를 가변적으로 공급하여 기존의 교류인가 방식의 단점을 극복하였고, 전극에 석영(SiO<sub>2</sub>) 박막을 코팅하여 전극으로부터의 입자 발생율을 최소로 줄일 수 있는 제품을 개발하였다고 보고된 바 있다.<sup>3)</sup> 그리고 최근 미국 Ion Systems 사에서는 전원장치에서 교류 48V를 천정으로 배선하고 천정의 전극부 내에 설치된 소형 변압기를 통하여 직류 고전압으로 승압시켜서 전극에 인가함으로써 EMI문제를 줄이고, 양극과 음극의 인가전압 및 양극과 음극의 동작시간을 독자적으로 조절할 수 있도록 하여 이온발생율을 조절하며, 쉬는 시간을 두어 이온 재결합율을 줄이도록 설계된 제품을 개발하여 생산하고 있다.

국내의 반도체 업계에서는 공기 이온화 장치를 외국으로부터 비싼 가격으로 수입하여 시험적으로 설치하고 있으나 정전기 제어 분야에 대한 체계적이고 기술적인 연구가 결여되어 있고 정전기 중화에 필요한 이온발생량 등에 대한 기초적인 자료도 미비한 상황이다.<sup>1,2)</sup> 국내에서는 아직 클린룸 용으로 정밀하게 제어되는 공기 이온화 장치를 생산해내는 업체는 없고 에어컨이나 공기청정기 등에 음이온 발생용 전극을 부착하여 단순히 음이온만을 발생시키도록 하고 있는 실정이다.

이러한 상황 속에서 본 연구팀은 날로 수요가 증가되고 있는 공기 이온화 장치의 국산화를 목표로 연구개발에 착수하여 시제품을 제작하였으며 이의 성능평가를 위해 특별히 제작된 초청정 클린룸에서 이에 대한 성능실험을 수행하고 있다. 그리고 이와 더불어 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 클린룸 유동장내에서 발생된 공기이온의 거동에 관해서도 연구하고 있다.<sup>4)</sup>

본 논문에서는 공기 이온화 장치가 설치된 초청정 클린룸 내에서 풍속과 습도를 변화시킬 때 공기 이온화 장치의 전극에서 발생된 양이온과 음이온이 클린룸 유동 공간내에 어떻게 확산되어 분포되는 지, 그리고 이온농도와 대전체의 중화시간과는 어떤 관계가 있는 지를 실험을 통해서 연구 분석한 결과를 보이고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 공기 이온화 장치는 클린룸 천정에 설치되는 방전전극 및 고압변압기와 작업대 높이에 설치되는 Controller로 구성된다. 방전전극은 텅스텐 합금으로 제작하여 고전압이 인가되어도 쉽게 마모되지 않도록 하였다. 끝부분의 형상은 합각이 30°가 되도록 뾰족하게 연마하여 이온 발생 효율을 높였다.<sup>5)</sup> 고압변압기는 직류 0~10V가 입력되어 변압 코일 및 Cock Croft 배압회로<sup>6)</sup>를 통과하여 1:2000으로 승압되어 5kV에서 최고 20kV까지 가변되어 출력될 수 있게 만들었다. 그리고 Controller는 발생된 양이온과 음이온이 서로 결합되어 소멸되는 것을 방지하기 위하여 한 극성의 이온이 발생되고 난 후 반대 극성의 이온이 발생하기 전에 쉬는 시간을 두는 Sequenced Bipolar DC System 방식으로 제작하였다.<sup>2,7)</sup> Controller의 제어변수를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 양극과 음극에 인가되는 전압의 크기 및 각 전극의 동작시간과 쉬는 시간을 독립적으로 제어할 수 있도록 제작하였다. 양이온 발생용 전극과 음이온 발생용 전극 사이의 간격은 조정이 가능한데 본 실험에서는 0.1m로 하였다.

성능실험을 위해서 특별히 시공된 클린룸은 등급이 0.5 $\mu$ m 입자를 기준으로 Class 1인 초청정 클린룸으로서 온도와 습도 및 풍속이 자동제어 시스템에 의해 가변될 수 있도록 제작되어서 원하는 환경조건을 설정하여 유지할 수 있다. 클린룸 바닥면의 개공율(바닥 전체의 면적에 대한 구멍난 부분의 면적 비)은 18.7%이다.

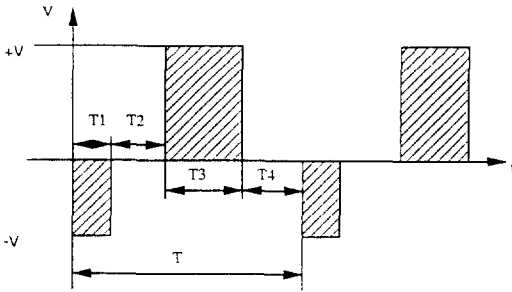


Fig. 1 Parameters controlled by the controller of prototype of air ionization system.

실험에서 사용한 공기 이온화 장치의 동작조건은 양이온과 음이온을 교대로 발생시키는 경우에는 Table 1과 같이 하였고 한 극성의 이온만을 발생시키는 경우에는 반대 극성의 전압을 0으로 하여서 전체 발생주기는 동일하게 0.83초가 되게 하였다.

그리고 각 전극에 인가되는 전압은 10kV로 동일하게 하여 전기장에 의한 이온 운동의 방향은 동일하게 하였다.<sup>9,10)</sup> 실험장치의 배치는 Fig. 2와 같다.

Table 1. Values of parameters set by controller of ionizer for experiments

Applied Voltage(kV)		Operating Period(s)				
		(-)ON Time	OFF Time	(+)ON Time	OFF Time	Total Time
(+)	(-)	T1	T2	T3	T4	T
10	-10	0.4	0.1	0.23	0.1	0.83

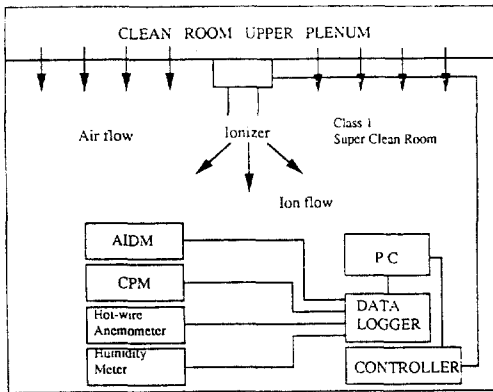


Fig. 2 Schematic diagram of class 1 super clean room and experimental apparatus.

2.2 실험 계측장비

클린룸의 풍속을 측정하기 위해서 미국 TSI

사에서 제작한 열선 풍속계를 사용하였는데 측정범위는 0~50m/s이다.

이온농도를 측정하는 데는 AIDM(Air Ion Density Meter)이 사용되었다. AIDM은 이온 포집 셀과 두 개의 미소 전류계를 이용하여 양 극성의 공기이온의 농도를 동시에 측정할 수 있는 장비이다. 이온 포집 셀의 두 평행판은 전원장치에 의해 정전압을 유지하게 되어 있고 속도가 제어되는 팬에 의하여 공기가 일정한 체적속도로 흡입되어 통과하게 되면 이온을 포집하게 된다. 포집된 이온의 전하량은 내장된 미소전류계로 측정되어 이온농도로 환산된다. AIDM은 Ion Systems사의 제품(모델 115)을 사용하였다. 사용된 AIDM에서 측정할 수 있는 이온농도의 범위는 0~10<sup>12</sup> ions/m<sup>3</sup> 까지이다.

대전체의 중화시간을 측정하기 위해서 CPM(Charged Plate Monitor)을 사용하였다. 중화시간을 측정하는 데 사용된 CPM은 반도체 웨이퍼의 정전용량과 비슷한 20pF의 정전용량을 가

지며 크기가 0.15m×0.15m인 스테인레스 대전판과 이 대전판에 존재하는 전위를 감시하는 정전위계와 대전판을 일정한 전압으로 대전시켜주는 직류전원장치 및 중화시간을 계측하는 타이머로 구성되어 있다. 본 실험에서는 대전판을 ±5000V로 대전시켰다가 공기 이온화 장치에서 발생한 이온에 의해 ±500V로 중화되는데 걸리는 시간을 측정하였다.

계측장비에서 출력되는 측정신호는 아날로그-디지털 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력되어 기록된다. 풍속은 각 측정점마다 샘플링 주기를 2초로 하고 20초 동안 측정하였고 이온농도는 샘플링 주기를 1초로 하고 200초 동안 측정하여 그 산술 평균값을 취하였다.

2.3 실험방법

공기 이온화 장치에 대한 성능평가의 방법은 참고문헌 (5, 8)을 참고하였다. 클린룸의 풍속은 0.28, 0.20, 0.10, 0.00 m/s로 바꾸어가면서 실험을 하였으며 습도는 40, 50, 60, 65%로 변화시키면서 이온농도 분포 및 중화시간을 측정하였다. 클린룸내의 온도는 29±1℃를 유지하였다.

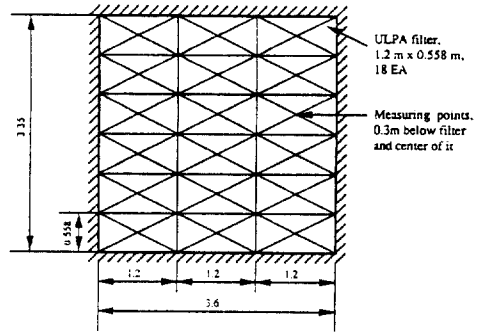
측정위치는 Fig. 3에 나타내었다. 클린룸의 풍속분포는 천정의 각각의 ULPA 필터 중앙의 0.30m 직하방에서 측정하였다. 실험은 1991년 7월24일에 시작되어 1991년 8월 25일 완료되었다.

3. 실험결과

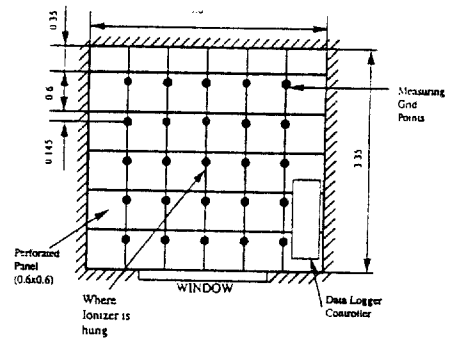
3.1 클린룸의 풍속분포 및 배경 이온농도

평균 풍속이 0.20m/s인 경우에 대해서 Table 2에 각각의 필터에서 측정된 풍속을 표시하였고 Fig. 4에는 측정값을 기초로 하여 보간(interpolation)되어진 풍속분포를 3차원 입체 모형으로 나타내었다. Fig. 4는 중심부에서 속도가 크고 주변으로 갈수록 속도는 완만하게 감소하는 모습을 보이고 있다.

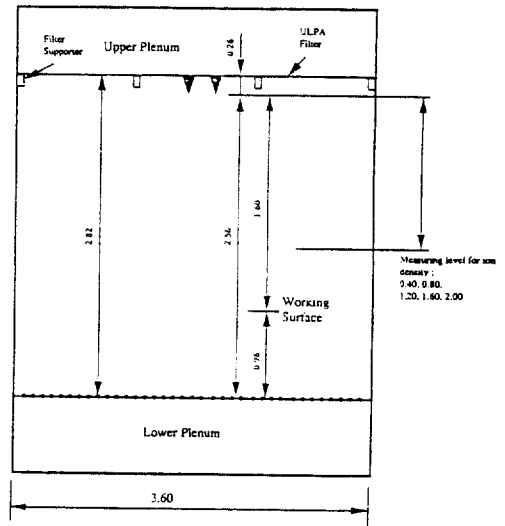
정면의 유리창이 있는 벽 쪽에서는 속도가 더 떨어지고 있는데 이는 클린룸 외부로의 공기 배출구(relief damper)가 있기 때문이다. 클린



(a) Layout of ULPA filter and measuring points for velocity.



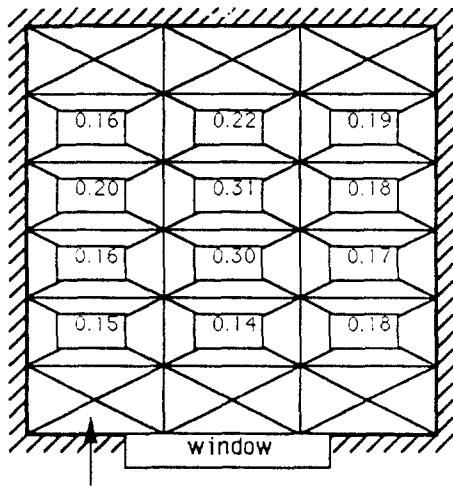
(b) Grid points of measurement of ion density over the working surface.



(c) Front view of clean room.

Fig. 3 Layout of clean room and measuring points, (a), (b), (c), (length unit=m).

Table 2. Measured data of velocity at ULPA filter of clean room (unit : [m/s])



ULPA filter  
1.2 m (W) x 0.558 m (H)  
18 EA

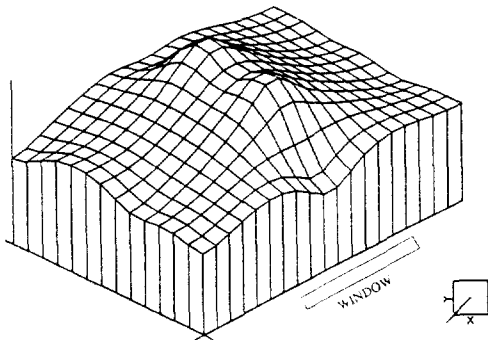


Fig. 4 Velocity distribution of clean room air flow (measured at the center of each filter and 0.3m below it when mean velocity is 0.20m/s)

\*\*Interpolated from measured data of Table 2.

룸의 성능시험에 관한 미국의 규정인 IES-RP-CC-006-84-T에 따라서, 풍속의 균일도는 전체 측정면적 중에서 평균 풍속의  $100 \pm 20\%$  범위 이내에 드는 풍속을 가지는 면적의 백분율로 정의 하였다.<sup>11)</sup> 본 실험에서는 각 필터의 중심부의 속도를 측정하였는데 이 속도가 그 필터 전체를 대표한다고 가정하여 풍속의 균일도는 위의 정의 가운데서 면적의 비를 측정점 수의 비로 환산하여 계산하였다. Table 3에 풍속의 균일도를 보였다. 풍속이 클수록 균일도는 크고 속도가 작아질수록 균일도는 떨어져서 속도가 0.10m/s인 경우 균일도가 50%로 됨을 보여주고 있다. 이 때의 클린룸의 기류는 상당히 흔들려서 기류의 평행성이 유지되기 어렵다.

Ionizer를 동작시키지 않은 상태에서 클린룸 내에 자연적으로 존재하는 이온의 농도(배경농도)를 알기 위해서 실험이 진행된 클린룸 및 주변공기에 자연적으로 존재하는 공기이온의 농도를 측정하였다. Table 4에 실측한 배경 이온농도를 보였다(외부공기의 측정 장소는 서울시 신림동에 위치한 서울대학교내이다). Table 4를 보면 실험실이나 클린룸 내부는 양이온 농도가 더 높는데 비하여 자연 상태의 외부 공기는 음이온 농도가 더 높은 것을 알 수 있다. 클린룸 내부의 배경 이온 농도가 크면 초기의 공기이온화 과정이 쉽게 일어나게 된다.<sup>12)</sup>

Table 3. Homogeneity of velocity in clean room

Mean Velocity [m/s]	0.28	0.20	0.10
Homogeneity [%]	92	67	50

Table 4. Ion density in outdoor air and in clean room when ionizer is off

	Ion density [ $10^9$ ions/m <sup>3</sup> ]		Condition
	Positive	Negative	
Clean room/off	3.2	1.6	when clean room is off and ionizer is off
Clean room/on	0.23	0.17	when clean room is on and ionizer is off
Laboratory	2.3	1.7	in laboratory where clean room is constructed
Outdoor air	1.6	2.9	where laboratory is located

### 3.2 풍속변화에 따른 이온농도의 변화

Ionizer에서 단극성의 이온만을 발생시켰을 경우 풍속이 달라질 때 전극으로부터의 수직 거리에 따른 이온농도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 이 때 동일한 농도로 이온을 발생시키려고 하였으나 양이온이 음이온 보다 약간 높은 농도로 발생되었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 일정한 농도의 이온을 발생시킬 때 풍속이 줄어들수록 동일한 거리에서의 이온농도는 줄어들고 있는데 이는 풍속이 작을수록 수직적인 공기의 흐름에 의한 영향보다 상대적으로 각 지점간의 이온농도의 차이에 의한 확산력이 더 커져서 이온이 보다 넓은 범위로 퍼져 나가기 때문이다. 그리고 전극으로부터의 거리가 1.6m 이상이 되면 전극으로부터의 거리가 멀어짐에 따른 이온농도의 감소속도는 줄어들어서  $1 \sim 2 \times 10^{11}$  ions/m<sup>3</sup> 정도를 안정되게 유지한다.

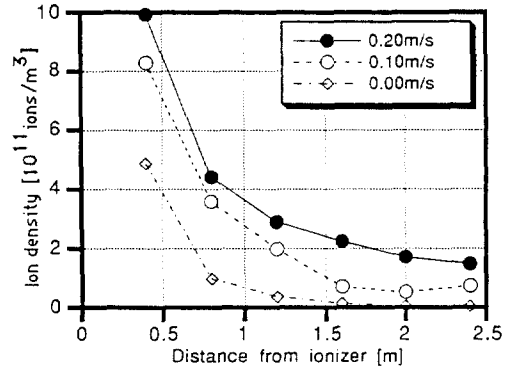
Fig. 6에는 단극성의 이온만을 일정한 농도로 발생시켰을 때 풍속 변화에 따른 작업대면의 평균 이온농도의 변화를 보여주고 있다. 풍속이 줄어들면 작업대 면에 도달하는 평균 이온농도도 줄어드는 경향을 보이고 있는데, 이는 발생된 이온이 보다 널리 공간으로 확산되어 작업대 면에 도달하기 전에 벽면에 충돌하여 소멸되는 이온이 많기 때문인 것으로 보인다.

### 3.3 작업대면의 이온농도 분포

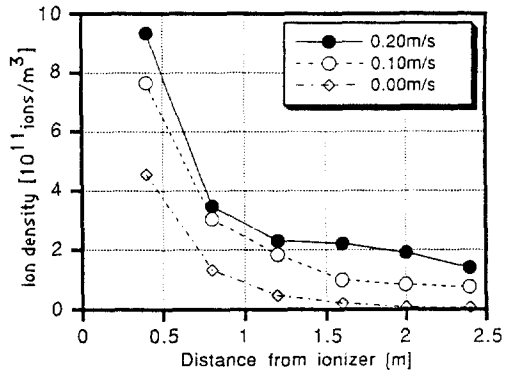
Table 5에 일정한 발생농도로 단극성의 이온만을 발생시켰을 때 작업대 높이의 평면의 격자상의 측정점에서 실험을 통하여 측정된 이온농도를 표시하였고 이 측정값을 보간(interpolation)하여 Fig. 7에 동일한 농도를 가지는 지점들을 선으로 연결하여 등고선 모양으로 표시하였다. 양이온이나 음이온 모두 중심부에서는 상대적으로 높은 농도를 유지하며 중심부에서 멀어져서 벽면에 가까와질수록 농도는 떨어지는 양상을 보이고 있다.

### 3.4 중화시간

Fig. 8에는 작업대 면에 각각 단극성의 이온을



(a) Positive ion density



(b) Negative ion density

Fig. 5 Ion density distribution with variation of air velocity (measured at various distance from ionizer)

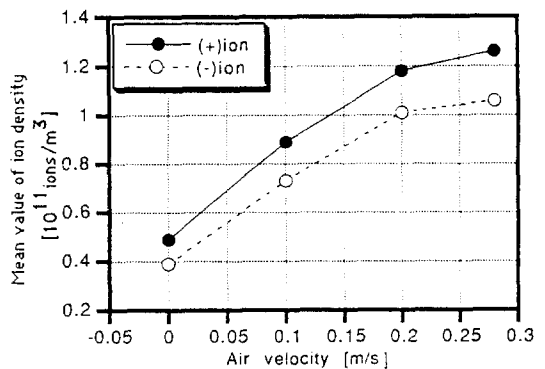


Fig. 6 Mean value of ion density over the entire working surface.

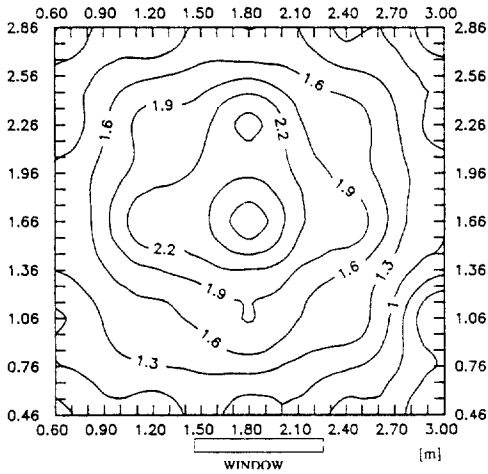
Table 5. Measured ion density of working surface(V=0.28 m/s) [ $10^{11}$ ions/m<sup>3</sup>]

(a) Positive ion density

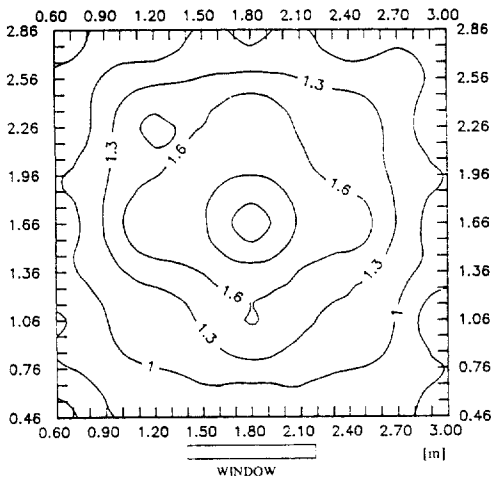
0.68	1.05	1.29	0.94	0.45
1.08	2.01	2.60	1.72	0.89
1.31	2.47	2.99	2.09	1.00
0.96	1.56	1.92	1.46	0.01
0.63	0.86	0.88	0.63	0.00
Window				

(b) Negative ion density

0.45	0.80	0.94	0.79	0.93
0.72	1.66	1.89	1.46	0.80
0.86	1.88	2.35	1.77	0.85
0.67	1.20	1.62	1.29	0.45
0.30	0.70	0.76	0.70	0.58
Window				



(a) Positive ion density



(b) Negative ion density

Fig. 7 Contour map of ion density over the working surface when air velocity is 0.28 m/sec, interpolated from measured data of Table 5 [ $10^{11}$ ions/m<sup>3</sup>]

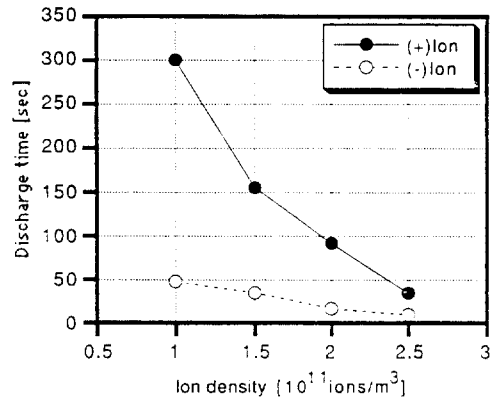


Fig. 8 Discharge time by ions of each polarity.

동일한 농도로 분포시켰을 때 발생된 이온과는 반대의 극성으로 5000V의 크기로 대전된 CPM의 대전판을 500V의 크기까지 중화시키는데 걸리는 시간을 보여준다. 이온농도가 증가할수록 제전 속도가 증가되어 중화시간이 짧아지고 있다. 실험에서 측정된 농도의 경우만을 놓고 본다면 같은 농도일 경우 음이온에 의한 제전시간이 양이온의 것에 비해서 짧다는 것을 알 수 있는데 그 상대적인 시간 차이가 저농도일 때는 아주 크고 고농도로 갈수록 작아지고 있다.

### 3.5 습도가 이온 발생 효율에 끼치는 영향

Fig. 9는 단극성의 이온을 발생시키는 경우, Ionizer의 이온 발생조건은 일정하게 하고 습도를 변화시켰을 때 작업대면 중앙에서의 이온농도의 변화양상을 보여주고 있다. 습도가 증가될수록 작업대면에서의 이온농도는 양 극성의 이온 모두가 거의 직선적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 주로 전극 주변의 코로나



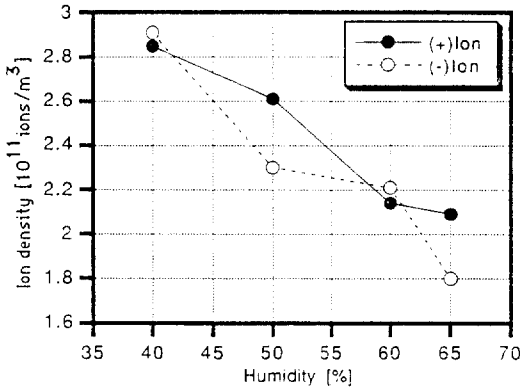


Fig. 9 Ion density on the center of working surface with humidity variation (air velocity=0.28m/s)

영역에서의 이온 발생 효율이 습도 증가의 영향으로 감소되는 결과로 추측된다. 습도가 증가되면 공기의 이온화에 중요한 역할을 하는 광자(photon)를 수증기 입자가 흡수하여 이온화 효율이 떨어진다고 보고되어 있다.<sup>12)</sup>

#### 4. 고 찰

##### 4.1 양이온이 발생되기 쉬운 이유

Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 자연 상태의 공기가 태양으로부터 오는 광선등으로 이온화되는 경우 음이온 농도가 더 높게 유지된다. 그런데 본 실험을 통하여 Ionizer를 동작시켜서 전기적인 방법으로 공기를 이온화시키는 경우 양이온이 더 높은 효율로 발생되는 것을 확인하였다. 그 이유 중의 하나는 이온화 메카니즘이 서로 다르기 때문이다. 그리고 나머지 하나는 실내 공기와 자연 상태의 외부 공기의 화학적인 분자 구성의 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 통상적으로 공기는 약 78%의 질소(N<sub>2</sub>)와 20%의 산소(O<sub>2</sub>)로 이루어져 있다고 알려져 있다. 그런데 인간의 여러 가지 일상 활동이 이루어지는 실내 공간에서는 대기보다 산소가 적으며 클린룸의 경우 전체 순환 공기의 10% 정도만을 외부 공기로 사용하고 나머지는 계속 순환시키므로 그 정도는 더 심하다. 그런데 이온화 과정

에서 질소는 음이온으로 되는 경우는 거의 없고 대부분이 양이온으로 되는 데<sup>14)</sup> 비하여 산소는 음이온으로 되기 쉬운 경향을 가지고 있다고 보고되어 있다.<sup>12)</sup> 따라서 산소가 상대적으로 풍부한 자연 상태에서는 음이온의 농도가 더 높게 유지되며 클린룸 내에서 Ionizer에 의해서 이온을 발생시키는 경우에는 이온 발생 조건을 동일하게 한다면 양이온이 더 많이 발생하게 되는 것이다.

##### 4.2 풍속이 확산범위에 미치는 영향

전극 주변의 코로나 영역을 벗어나면 전기장의 강도는 급격히 약해진다. 전극에서 떨어진 영역에서는 이온의 농도가 대략 10<sup>12</sup>~10<sup>15</sup> ions/m<sup>3</sup> 이하이고 공기분자의 농도는 10<sup>25</sup>개/m<sup>3</sup> 이므로 공기이온의 농도와 공기분자의 농도비는 n<sub>ion</sub>/n<sub>air</sub>=10<sup>-10</sup>~10<sup>-13</sup>이다.<sup>10)</sup> 따라서 클린룸 내부의 대부분의 청정 공간은 공기분자의 농도에 비해 공기이온의 농도는 극히 낮아서 전기적으로 약하게 이온화된 공기(weakly ionized gas)의 유동으로 볼 수 있다. 이 때 공기이온의 농도는 상대적으로 매우 낮으므로 이온의 확산이 공기의 흐름에 끼치는 영향은 매우 미미하다. 이것은 흐르는 강물에 잉크를 뿌렸을 경우 잉크는 농도 차이로 확산되어 가지만 이 잉크의 확산이 강물의 흐름에는 전혀 영향을 주지 못하는 것과 같은 것으로 생각할 수 있다. 이와 같은 가정하에서 공기의 유동과 이온의 확산을 독립적으로 해석할 수 있게 된다. 따라서 이온의 속도는 전기장에 의한 이온의 운동 속도 및 각 지점 간의 이온 농도의 차이에 의한 확산 속도에 배경공기의 속도를 합하여 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>4)</sup>

$$U_i = \mu_i E - D_i \frac{\nabla P_i}{P_i} + \bar{u}_{air} \dots \dots \dots (1)$$

- 여기서 U<sub>i</sub> : 이온의 운동속도(m/s)
- $\bar{u}_{air}$  : 배경공기의 평균유동 속도(m/s)
- $\mu_i$  : 이온 i의 이동도(electrical mobility, m<sup>2</sup>/(V·s))
- E : 전기장의 강도(V/m)



$P_i = n_i k T_i$  : 이온압력 ( $n_i$  : 이온의 농도)

$k$  : Boltzmann 상수

$D_i$  : 확산계수

$T_i$  : 온도

식(1)을 보면 전극 주변에서는 전기장 강도  $E$ 와 이온농도  $n_i$ 의 영향이 지배적으로 되지만, 전극에서 멀어져서 하류로 갈수록 상대적으로 전기장 강도  $E$ 와 이온 농도  $n_i$ 의 크기가 줄어들어서 그 영향이 줄어들게 되므로 이온의 운동속도  $U_i$ 는 공기 유동속도  $\bar{u}_{air}$ 가 큰 영향을 끼치게 된다. 즉 전극에서 멀어진 영역에서는 공기유동의 속도가 커질수록 이온의 확산폭은 좁아지게 되는 것이다.

### 4.3 음이온에 의한 중화시간이 더 짧은 이유

이온이 전기장이 있는 공기층을 움직이게 될 때 전기장에 의한 힘과 공기의 저항력으로 인해 일정한 종단 속도를 가지게 되는데 이 때의 비례계수를 이온 이동도(electrical mobility,  $\mu_i$ )라고 한다.

$$\mu_i = V_{TE} / E \dots \dots \dots (2)$$

여기서  $V_{TE}$  : 종단속도

대전체가 놓여진 작업대 면에서의 이온의 운동에 대해서는 대전체의 전기장의 영향이 지배적인 것으로 된다. 따라서 이 때의 이온 전류 밀도는 다음과 같이 표시된다.

$$J = n_i q_i U_i = n_i q_i \mu_i E = \sigma E \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $\sigma = n_i q_i \mu_i$  : 전기전도도 (conductivity)

$q_i$  : 이온의 전하량

공기의 전기전도도(conductivity,  $\sigma$ )에 따라서 대전된 전하의 중화율은 일정하며 전하는 지수함수적으로 감소하게 된다. 이 때의 시간상수( $\tau$ )는 공기의 유전율(permittivity,  $\epsilon_0$ )을 전기전도도로 나눈값과 같다.<sup>15)</sup> 이 시간상수가 작을수록 대전체는 빨리 중화되게 된다.

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{\epsilon_0}{\sigma} \dots \dots \dots (4)$$

그런데  $\sigma = n_i q_i \mu_i$ 로 주어지므로 양이온과 음이온의 농도 및 각각의 단위 전하량이 같다면 이온 이동도가 커질수록 공기의 전기전도도는 커지고 따라서 시간 상수는 작아지게 되어 빠른 속도로 대전체의 중화가 이루어지게 된다. 이온의 이동도(mobility)를 직접 측정하지는 못하였으나 여러 문헌에 음이온의 이동도가 더 큰 것으로 나타나 있다.(공기에 대해서 음이온의 경우  $1.57 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ , 양이온의 경우는  $1.40 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ )<sup>9)</sup> 이러한 점에 근거를 두고 판단해 볼 때 음이온에 의한 중화시간이 더 짧은 것은 음이온의 이온 이동도가 더 크기 때문인 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 초청정 클린룸 내에서 습도와 풍속을 변화시킬 때 공기 이온화 장치에서 발생하는 공기 이온의 농도분포 및 중화시간을 실험을 통하여 고찰해 보았다. 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 동일한 이온 발생농도 조건에서는 풍속이 줄어들수록 이온은 공간적으로 보다 더 넓게 확산된다. 이 결과 작업대 면에 도달하는 평균 이온농도는 발생농도의 30% 이하로 줄어든다.

(2) 습도를 증가시키면 공기 이온화 장치에서의 발생농도 및 그 하방에 도달하는 이온농도는 줄어든다.

(3) 대전체에 대한 이온의 중화성능은 이온의 농도가 높을수록 더 좋으며 같은 농도에서는 음이온의 경우가 양이온의 경우보다 중화시간이 더 짧았다.

이러한 연구 결과를 클린룸 정전기 제거용 Ionizer의 설계 및 운용에 적용한다면 다음과 같이 점이 고려되어야 한다.

(1) Ionizer를 사용하지 않았을 경우 공정에서 발생하는 정전기의 전압을 조사하고 허용되는 정전압의 크기 및 제전시간이 결정되면 Fig. 8의 결과를 토대로 작업대 평면에 도달해야 될 이

온농도의 크기가 결정될 수 있다. 이 크기만큼의 농도를 유지시키기 위하여 Ionizer의 동작조건을 적절히 설정해야 한다.

(2) 클린룸의 풍속이 증가하면 Ionizer 직하 방에 도달하는 이온의 농도는 커지나 이온의 확산범위는 줄어든다. 따라서 풍속이 큰 경우에는 전 영역에 걸쳐서 골고루 이온을 분배하여 전 영역에서 짧은 제전시간을 유지하려면 Ionizer의 설치간격이 좁아져야만 한다.

(3) 동일한 조건에서는 양이온이 더 높은 효율로 발생되므로 이온균형을 유지하기 위해서는 음극의 인가전압을 높게 하거나 동작시간( $T_1$ )을 길게 해야 한다.

(4) 습도가 40% 이하로 줄어들면 공정 중에서 발생하는 정전기가 더 발생하기 쉬운 것으로 알려져 있다. 그런데 Fig. 9의 경향으로 보아 습도가 줄어들면 Ionizer에서의 이온 발생 성능도 좋아지므로 적절하게 제어되는 Ionizer를 이용하면 낮은 습도 조건에서도 효과적으로 정전기 제어를 수행할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 1991년 상공부 공업기반 과제 연구의 일부로 수행되었습니다. 도와주신 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다. 본 논문에서 부족한 점들은 계속되는 연구를 통하여 보완해 나갈 예정입니다.

## 참 고 문 헌

1. 공기청정연구조합 1988, "정전기 대책", 공기청정기술, 1988년 제3집, pp.29-39.
2. 오명도, 1989, "정전기 제어용 Ion발생 시스템 분석", 1989년도 제1회 Clean Room기술 세미나, pp.135-162.
3. Dakao, O., 1990, "Clean Room의 정전기 대책", 일본 전문가 초청 크린룸 세미나, 한국 공기 청정 연구조합.
4. 손종관, 오명도, 1991, "클린룸 유동장내 Air Ion 확산거동 시뮬레이션", 창립 20주년 기념 논문집, 공기조화 냉동 공학회.
5. Suzuki, M., Matsushashi, H. and Izumoto, T., 1988, "Effectiveness of Air Ionization Systems in Clean Rooms", The 34nd proceedings of IES, pp.405-412.
6. 전춘생, 1988, "방전 고전압 공학", 동명사.
7. Dillenbeck, K., 1986, "Selection of Air Ionization System within the Clean Room", The 32nd Proceeding of IES, pp.387-392.
8. Steinman, A., 1991, "Evaluating Air Ionization Systems", Proceedings of Clean Rooms '91 Show, Witter Publishing Co., Inc..
9. Hinds, W. C., 1982, "Aerosol Technology", Chapter 15 & p.291.
10. Mitchner M., and Kruger, G. H., Jr., 1974, "Partially Ionized Gases", John Wiley & Sons.
11. IES, 1984, "Testing Clean Rooms. (IES-RP-CC-006-84-T)".
12. Leob, L. B., 1965, "Electrical Coronas", University of California Press.
13. Davies, C. N., 1966, "Aerosol Science", p.89, Academic Press.
14. Oglesby, S., Jr. and Nichols, G. B., 1978, "Electrostatic Precipitation", p.23, Marcel Dekker Inc., USA.
15. EOS/ESD association Inc., Draft September 1987, "EOS/ESD Standard No.3", pp.13-14, USA.