

## 정전압에 따른 클린룸 벽체에서의 입자침착 특성

노 광 칠, 손 영 태\*, 김 종 준, 오 명 도†  
서울시립대학교 기계정보공학과, \*삼성전기 생산기술연구소 MCC TG

### Characteristics of Particle Deposition onto the Cleanroom Wall Panel with Electrostatic Voltages

Kwang-Chul Noh, Young-Tae Son\*, Jong-Jun Kim, Myung-Do Oh†  
Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea  
\*MCC TG of Manufacturing Engineering R&D Institute, Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd., Suwon 443-743, Korea

(Received August 23, 2006; revision received November 13, 2006)

**ABSTRACT:** We carried out the experiments on particle deposition onto the cleanroom wall panels. And then we investigated the particle deposition characteristic coefficients for electrostatic voltages and particle size. It was found that there is little difference in characteristics of the particle deposition between the steel panel and the anti-static coating panel. In case of that the particle size is under  $1.0 \mu\text{m}$ , the particle deposition characteristic coefficient becomes larger as the electrostatic voltage induced to the cleanroom wall panel is increasing. Where in case of that the particle size is over  $3.0 \mu\text{m}$ , the particle deposition characteristic coefficients do not show any differences with the electrostatic voltages. It is due to that the electrostatic force is the major particle transport mechanism for submicron particles, while the gravitational settling is the major particle transport mechanism for overmicron particles when the electrostatic voltages are induced to the cleanroom wall panel.

**Key words:** Cleanroom(클린룸), Cleanroom wall panel(클린룸 벽체), Electrostatic voltage(정전압), Particle deposition(입자침착)

#### 1. 서 론

전자기기의 기능이 고도화될수록 제품이 경박 단소화, 고집적화, 미세화가 이루어지면서 또한 생산환경에 있어서 공기청정기술의 고도화가 요구되고 있다. 이에 따라 국내의 반도체 및 LCD, 전자부품 등을 생산하는 기업에서는 대부분 클린룸을 시공하여 청정한 공간에서 제품을 생산함으

로써 생산수율을 극대화하고 제품의 고집적화 및 미세화에 대응하고 있다. 이러한 클린룸에서 생산되는 제품의 수율에 직접적인 영향을 미치는 인자는 클린룸 내부에서 존재하는 입자 또는 이물(foreign material)로서 이들의 주요 원인은 외부 공기, 사람, 가공장비, 원부자재 등에 의한 것이다.<sup>(1)</sup> 이러한 입자들은 주로 클린룸 내부에서 부유하면서 제품에 영향을 미치는 경우와 발진한 후 바로 제품에 침착되어 영향을 미치는 경우로 구분할 수 있다. 대부분의 침착상 입자들은 발진한 후 바로 침착되기 때문에 제품에 결점(defect)을 일으키는 원인을 비교적 쉽게 찾을 수 있다. 그

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2948; fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: mdoh@uos.ac.kr

러나 대부분의 부유상 입자들은 공기의 유동 및 주변의 여건에 의하여 클린룸 벽체 및 가공장비의 벽체에 침착되어 있다가 탈착되어 제품에 영향을 미칠 수도 있기 때문에 그 원인을 찾아서 제어하는 것은 쉽지가 않다.<sup>(1)</sup> 따라서 클린룸 내부에서의 관리는 입자의 크기가 작아짐에 따라 공기를 청정화하는 방안뿐만 아니라 기류에 영향을 미치는 클린룸 바닥의 다공패널의 배치, 가공장비의 구조, 클린룸 벽체의 종류 및 정전기, 작업방법 등에 대하여 광범위하게 이루어지고 있다.

클린룸에 대한 연구는 Kang et al.<sup>(2)</sup>과 Bae et al.,<sup>(3)</sup> Noh et al.<sup>(4)</sup>에 의한 기류 특성에 대한 연구와 Yoo et al.,<sup>(5)</sup> Bae,<sup>(6)</sup> Ahn et al.<sup>(7)</sup>에 의한 수평 웨이퍼(wafer)에서의 입자의 침착에 관한 연구 등이 있다. 그러나 아직까지 수직으로 세워져 있는 클린룸 내부 벽체에서의 입자침착에 대한 실험적인 연구는 없다. 그리고 클린룸 내부 벽체에서 접촉 등으로 인하여 수백에서 수천 볼트(volt)의 전압이 야기되면 입자침착의 원인되고 이는 결과적으로 제품의 불량률에 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 클린룸의 내부 벽체에 대하여 정전압의 크기, 클린룸 벽체의 종류에 따른 입자침착 실험을 수행하였고, 이를 통하여 정전압과 입경에 따른 입자침착 특성에 대하여 분석하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 50 cm×50 cm×50 cm 체적의 아크릴 재질의 실험챔버를 제작하였고, 내부에 30 cm×30 cm 크기의 클린룸 벽체 4장을 실험챔버의 중앙에 세로로 설치하였다. 그런 후 클린룸 벽체 인가된 정전압의 크기에 따른 챔버 내부에서의 입자농도감소 추이를 관찰하여 클린룸 벽체로의 입자침착 특성을 분석하였다.

본 실험의 방법에 대한 착안은 한국공기청정협회의 실내공기청정기 규격<sup>(8)</sup>에서 공기청정기의 청정화 능력을 평가하는 실험방법에 근거한다. 규정된 크기의 시험챔버 내부에서 공기청정기의 청정화 능력이 측정되면 시험챔버에서의 입자농도감소 추이를 이용하여 공기청정기의 입자 제거성능을 계산할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험챔버 내부에 설치된 클린룸 벽체에 정전압이 인가되면 클린룸 벽체가 공기청정기와 동일한 역할을 하는 것으로 보고 입자의 농도변화 추이를 관찰하여 클린룸 벽체의 입자침착 특성에 대한 분석을 수행하였다.

Fig. 1은 입자의 크기, 정전압 크기에 따른 클린룸 내부 벽체로의 입자침착 특성을 분석하기 위한 실험장치의 구성도이다. 고순도질소와 응축식 단분산입자 발생기(condensasion monodisperse

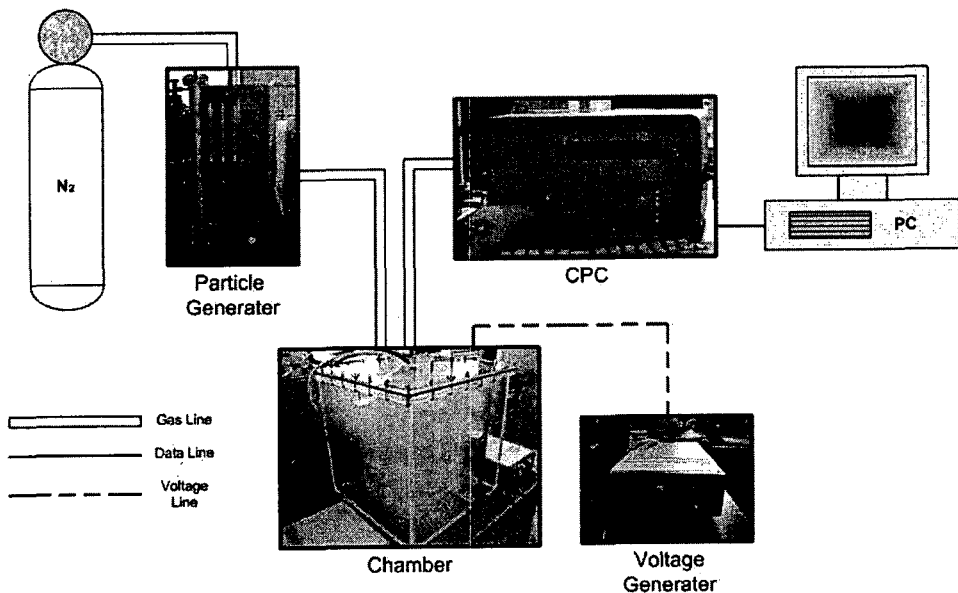


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system.

aerosol generator, model 3475, TSI)에 의해 발생된 0.5 μm, 1.0 μm, 3.0 μm, 5.0 μm 입자를 실험 챔버 내부로 주입하고 초기 농도가 안정된 시점에서부터 20초 간격으로 농도를 측정하여 약 1시간 동안 실험을 수행하였다. 실험챔버로 입자가 분사될 때부터 교반팬을 이용하여 실험챔버 내부에서 입자농도가 균일하게 유지되도록 하였다. 정전압 발생기(electrostatic supplier, model 677B, Trek)를 통하여 클린룸 벽체에 정전압을 0 V, 500 V, 1,000 V, 2,000 V로 인가하였고 실험챔버 내부에서의 입자농도변화를 측정하기 위하여 응축식 입자계수기(condensation particle counter, model 3022A, TSI)를 이용하였다.

아크릴 재질의 실험챔버에서 정전기 발생에 의한 입자침착 효과를 최소화하기 위하여 대전 방지액을 실험챔버에 분사하여 제전처리를 하였고, 이를 충분히 건조시킨 후 표면전위계(FMX-002, SIMCO)로 실험챔버의 벽에서 대전압을 측정하여 0V가 됨을 확인하였다. 또한 실험챔버 내부공기와 외기와의 혼합과 입자의 누설을 막기 위하여 고무재질의 패키지를 이용하여 밀폐시켰다.

### 3. 이론적 배경

실험챔버 내부에서 입자가 감소되는 추이를 이용하여 정전압에 따른 클린룸 벽체로의 평균 입자침착 특성을 간접적으로 도출해 볼 수 있다. 식(1)은 실험챔버 내부에서 입자가 균일하게 분포한다는 가정하에 입자농도 감소에 대한 비정상 1차원 미분방정식을 보여주고 있다. 식(1)에서 좌변은 실험챔버 내부에서의 입자의 시간변화율이다. 우변의 첫번째 항은 정전압이 인가된 클린룸 벽체로의 감소율, 두번째 항은 실험챔버 내부에서의 자연감소율, 세번째 항은 입자계수기로의 유입에 의한 감소율을 나타낸다.

$$V \frac{dC}{dt} = -u \cdot A \cdot C - V \cdot N(t) - \dot{Q} \cdot C \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 실험챔버의 체적( $m^3$ ),  $C$ 는 입자의 농도( $parts/m^3$ ),  $t$ 는 시간( $s$ ),  $u$ 는 전압이 인가된 벽체로의 평균 입자침착 특성계수( $m/s$ ),  $A$ 는 클린룸 벽체의 표면적( $m^2$ ),  $N(t)$ 는 실험챔버 내부에서의 자연감소율( $parts/m^3 \cdot s$ ),  $\dot{Q}$ 는 입자계수기로 유입되는 체적유량( $m^3/s$ )이다.

식(1)의 우변 두번째 항인 자연감소율은 실험챔버 내부에 입자를 주입한 후, 입자가 아크릴 챔버 내부벽면 및 바닥면으로 자연적인 감소를 나타내는 것이다. 추후 설명하겠지만 Fig. 2에서 보는 바와 같이 챔버 내부로 주입된 입자의 크기와 상관없이 지수함수적인 감소를 보인다. 그리고 우변 세번째 항은 입자계수기의 유량에 의해 감소하는 양으로서 정전압이 인가된 클린룸 벽체로의 감소 및 자연감소에 의한 양에 비해 매우 작다. 이러한 영향들을 고려하여 식(1)의 해를 구하면 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$C = C_0 e^{-\frac{uA + u_n A_n}{V} t} \quad (2)$$

여기서,  $C_0$ 는 실험챔버 내부에서의 실험 시작시의 초기농도( $parts/m^3$ )이고,  $u_n$ 은 자연감소 특성계수( $m/s$ ),  $A_n$ 은 실험챔버의 내부표면적( $m^2$ )이다.

본 연구에서 평균 입자침착 특성계수를 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 클린룸 벽체에 전압이 인가되지 않았을 때, 시험입자를 챔버에 주입한 후 시간에 따른 입자의 자연감소 추이를 측정한다. 실험을 통해 얻어진 특성곡선에 대하여 Curve fitting을 수행하고 식(2)를 이용하면 자연감소 특성계수( $u_n$ )를 구할 수 있다. 그리고 클린룸 벽체에 전압을 인가하고 시험입자를 챔버에 주입한 후 시간에 따른 입자의 농도감소 추이를 측정한다. 이 실험을 통해 얻어진 특성곡선에 대하여 Curve fitting을 수행하면 지수함수의 시간에 대한 계수를 구할 수 있다. 이 계수와 자연감소 특성계수,

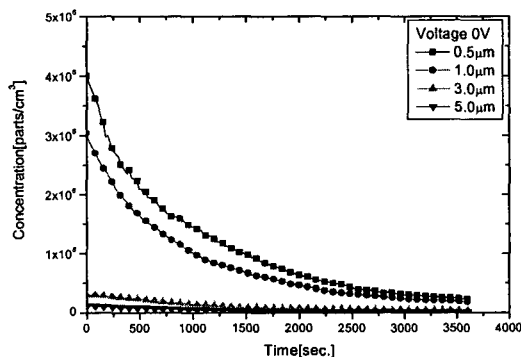


Fig. 2 Particle concentration decrement for the particle size when the applied voltage is 0 V.

그리고 식(2)를 이용하면 클린룸 벽체로의 평균 입자침착 특성계수( $u$ )를 구할 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 입경에 따른 입자농도 자연감소 특성

Fig. 2는 클린룸 벽체에 0V의 전압이 인가되었을 때, 입경에 따른 입자의 개수농도 감소곡선을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 실험챔버 내에서 부유하는 입자의 최대농도 개수는 입경에 따라 달라지는 것이 관찰되었고 입경이 커질수록 입자의 개수농도는 감소하였다. 입경이 0.5  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 최대 약  $4 \times 10^6$ 개/ $\text{cm}^3$ 의 입자가 부유하였고, 입경이 1.0  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 약  $3 \times 10^6$ 개/ $\text{cm}^3$ , 3.0  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 약  $3 \times 10^5$ 개/ $\text{cm}^3$ , 5.0  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 약  $1.2 \times 10^5$ 개/ $\text{cm}^3$ 의 입자가 부유하는 것으로 나타났다. 이와 같이 입경이 증가할수록 실험챔버 내에 부유하는 입자의 개수농도가 감소하는 이유는 입경이 클수록 중력에 의한 영향이 크게 작용하여 빠르게 침착하기 때문이다.

그리고 Table 1은 Fig. 2의 그래프에서 입경에 따른 각각의 자연감소 특성계수와 종말침강속도(terminal settling velocity)를 보여주고 있다. Table 1에서 보는 바와 같이 종말침강속도는 입경이 증가함에 따라 크게 증가하지만 자연감소 특성계수는 입경에 따라 큰 차이를 볼 수 없었다. 또한 입경이 0.5  $\mu\text{m}$ 와 1.0  $\mu\text{m}$ 인 경우 자연감소 특성계수가 종말침강속도보다 큰 것을 볼 수 있는데 이는 입경이 1.0  $\mu\text{m}$  이하인 경우 중력침강에 의한 영향보다 확산에 의한 영향이 지배적인 침착 메커니즘이라는 것을 의미한다. 이러한 결과는 이전의 연구결과<sup>(5-7)</sup>와 잘 일치하는 것이다.

##### 4.2 클린룸 벽체에 따른 입자농도감소 특성

Fig. 3은 클린룸 벽체에 따른 입자농도감소 특성을 보여주고 있다. 실험에 사용된 입자의 크기

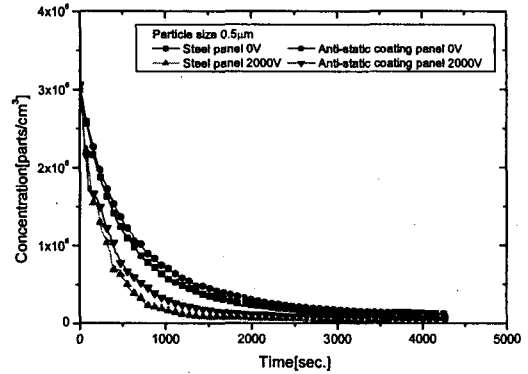


Fig. 3 Comparison of particle concentration decrement between two types of clean-room wall panels.

는 0.5  $\mu\text{m}$ 로서 확산과 정전기력에 의한 침착이 클 것으로 예상되는 입경이다. 실험에 사용된 일반벽체(steel panel)와 무정전벽체(anti-static coating panel)에서의 입자농도 감소율은 큰 차이가 나지 않았다. 전압을 인가하지 않은 경우, 입자의 자연농도감소 특성계수는 일반벽체와 무정전벽체에 대해 각각  $1.24 \times 10^{-4}$  m/s,  $1.08 \times 10^{-4}$  m/s로 측정되었고, 전압을 2,000 V로 인가한 경우, 평균 입자침착 특성계수는 일반벽체와 무정전벽체에 대해 각각  $5.65 \times 10^{-4}$  m/s,  $5.15 \times 10^{-4}$  m/s로 측정되었다. 동일한 조건에 대한 반복실험에서 15% 이내의 상대오차를 나타내었고 이로부터 일반벽체와 무정전벽체에서 입자의 침착특성은 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이후의 실험결과들은 일반벽체만을 이용하여 얻어진 값들이다.

##### 4.3 정전압에 따른 입자침착 특성

Fig. 4는 실험챔버 내부에 다른 크기의 입자를 투입하여 분산시켰을 때, 클린룸 벽체에 인가된 정전압의 크기에 따른 입자농도의 변화경향을 보여주고 있다. 입경이 0.5  $\mu\text{m}$ 와 1.0  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 Fig. 4의 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 정전압의

Table 1 Particle deposition characteristic coefficients and terminal setting velocity when the applied voltage is 0V

Particle size	0.5 $\mu\text{m}$	1.0 $\mu\text{m}$	3.0 $\mu\text{m}$	5.0 $\mu\text{m}$
Terminal settling velocity (m/s, $\times 10^{-5}$ )	0.99	3.98	29.6	99.4
Characteristic coefficient (m/s, $\times 10^{-5}$ )	12.4	7.84	6.34	6.08

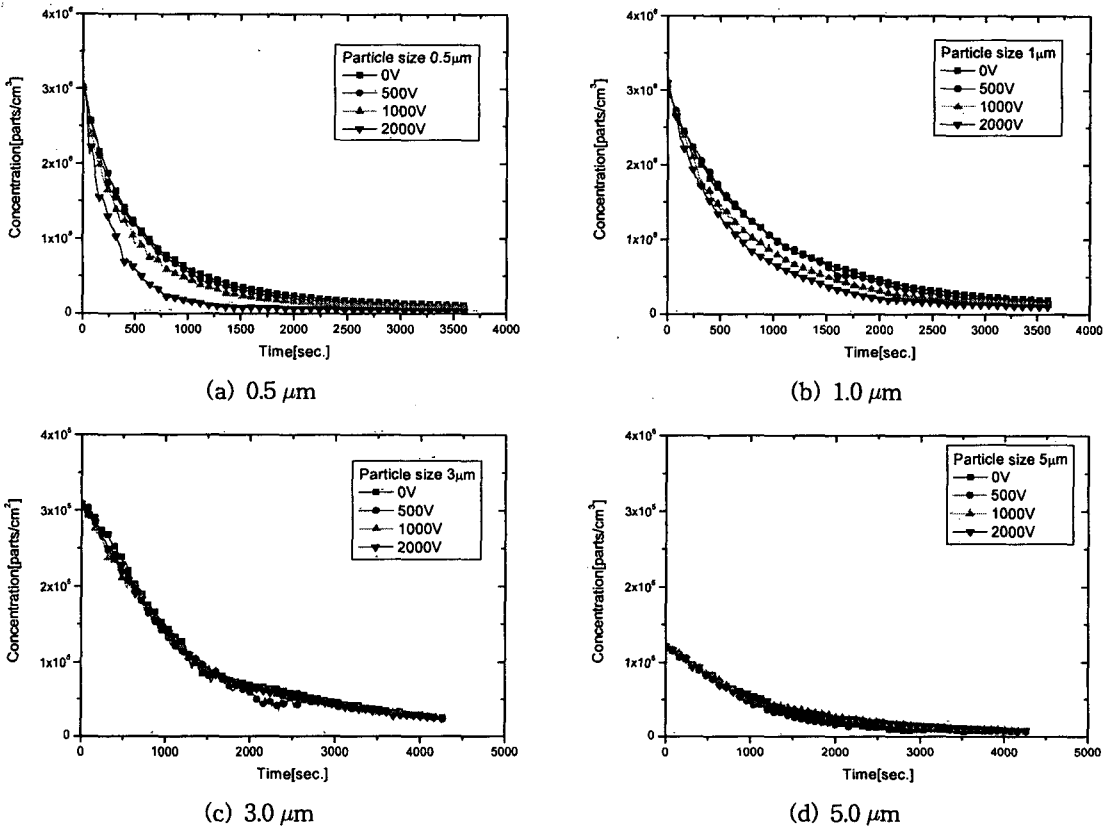


Fig. 4 Variation of the particle concentration in the experimental chamber with respect to particle sizes and electrostatic voltages induced to the cleanroom wall panel.

크기가 증가함에 따라 입자농도가 더 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 중력침강 및 확산보다 클린룸 벽체에 인가된 정전압이 입자의 침착에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 그리고 입경이 0.5 μm인 경우가 1.0 μm인 경우에 비해 입자농도가 더욱 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 입경이 작을수록 중력침강에 의한 영향이 감소하고 정전압에 의한 영향이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과들은 식(1)과 식(2)을 통하여 구해진 입자침착 특성계수를 통해서도 확인할 수 있다. Table 2는 0.5 μm와 1.0 μm에 대하여 구해진 입자침착 특성계수들이다. 표에서 보는 바와 같이 동일한 입경에서는 정전압이 증가함에 따라 입자침착 특성계수도 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있고 동일한 정전압에서는 입경이 작을수록 입자침착 특성계수는 커지는 것으로 나타났다. 입경이 1.0 μm인 경우 정전압이 0V일 때와 500V일 때

는 그래프의 기울기가 거의 같아서 입자침착 특성계수를 구할 수 없었다. 그리고 실험에 있어서 상대오차는 입경과 정전압의 크기가 작을수록 커지는 경향을 보였다. 이는 입경과 정전압의 크기가 작아질수록 입자의 침착에 영향을 미치는 중력과 정전기력이 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4의 (c)와 (d)에서 보는 바와 같이 입경이 3.0 μm와 5.0 μm로 큰 경우에는 클린룸 벽체에

Table 2 Particle deposition characteristic coefficients for electrostatic voltages (Unit:  $\times 10^{-4}$  m/s)

Voltage	Particle size	
	0.5 μm	1 μm
500 V	0.28±0.15	-
1,000 V	1.15±0.20	0.93±0.15
2,000 V	5.65±0.50	1.77±0.30

인가된 정전압의 크기가 증가하여도 0 V일 때와 동일한 입자농도감소 특성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 입경이 증가할수록 중력침강이 정전기력보다 지배적인 입자침착 메커니즘이 되기 때문이다. 이러한 결과는 이전에 수행된 Yoo et al.<sup>(5)</sup>의 연구결과와 잘 일치하는 것이다.

정전압의 크기에 따라 변화하는 입자침착 특성의 결과들은 클린룸 벽체의 선정에 있어서 입경에 대한 기준을 제시해 준다. 클린룸에 사용되는 벽체들은 발생된 표면저항과 정전기의 감소특성에 따라 구분된다. 일반벽체보다 무정전벽체가 발생된 정전기를 빠르게 감소시키는 특성을 가지고 있다. 따라서 만약 클린룸에서 생산되는 제품의 관리 입경수준이 1.0  $\mu\text{m}$  이하이면 정전기의 감소특성이 빠른 무정전벽체를 사용해서 벽체로의 입자침착을 최소화시킬 수 있을 것으로 판단되고 관리 입경수준이 3.0  $\mu\text{m}$  이상이면 입자의 침착이 정전압의 크기에 영향을 받지 않기 때문에 일반벽체 또는 무정전벽체를 사용하여도 벽체에 침착되는 입자의 개수는 크게 달라지지 않을 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 정전압에 따른 클린룸 벽체에서의 입자침착 특성분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실험챔버 내에서 부유하는 입자의 최대 개수농도는 입경에 따라 달라지는 것이 관찰되었고 입경이 커질수록 입자의 개수농도는 감소하였다. 이는 입경이 클수록 중력에 의한 영향이 크게 작용하여 입자들이 빠르게 침강하기 때문이다.

(2) 동일한 정전압이 인가된 일반벽체와 무정전벽체에서 동일한 크기의 입자에 대한 입자농도 감소특성은 큰 차이가 없었고 이로부터 클린룸 벽체의 종류는 입자농도 감소특성에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

(3) 입경이 1.0  $\mu\text{m}$  이하인 경우에는 클린룸 벽체의 정전압이 증가함에 따라 입자침착 특성계수도 증가하는 것을 볼 수 있었으나 입경이 3.0  $\mu\text{m}$  보다 큰 경우에는 정전압의 크기가 증가하여도 0 V일 때와 동일한 입자농도 감소특성을 보였다. 이는 입경이 1.0  $\mu\text{m}$  이하일 때는 정전기력이, 입경이 3.0  $\mu\text{m}$  이상일 때는 중력침강이 지배적인 입자침착 메커니즘이 되기 때문이다.

(4) 클린룸에서 생산되는 제품의 관리 입경수준이 1.0  $\mu\text{m}$  이하이면 무정전벽체를 사용하여 입자침착을 최소화시킬 수 있는 반면, 관리 입경수준이 3.0  $\mu\text{m}$  이상이면 일반벽체 또는 무정전벽체를 사용하여도 벽체에 침착되는 입자 개수는 크게 달라지지 않을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Whyte, W., 2001, Cleanroom Technology-Fundamentals of Design, Testing and Operation, John Willy & Sons, Chichester, England.
2. Kang, S. H., Jeon, W. P. and Oh, M. D., 1990, Effects of the floor panel on flows in a vertical laminar flow type clean room, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 2, No. 4, pp. 303-315.
3. Bae, G. N., Lim, H. K. and Oh, M. D., 1989, A experimental study on the airflow characteristics for clean tunnel type cleanroom design, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 1, No. 1, pp. 32-45.
4. Noh, K. C., Oh, M. D. and Lee, S. C., 2005, A numerical study on airflow and dynamic cross-contamination in the super cleanroom for photolithography process, Building and Environment, Vol. 40, pp. 1431-1440.
5. Yoo, K. H., Oh, M. D. and Myung, H. K., 1997, Analysis on particle deposition onto a heated, horizontal freestanding wafer with electrostatic effect, Journal of KSME, Vol. 21, No. 10, pp. 1284-1293.
6. Bae, G. N., 1994, Measurement and control of particle deposition velocity on a semiconductor wafer surface, Ph. D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea.
7. Ahn, K. H., Bae, G. N. and Lee, C. S., 1996, Particle deposition velocity on a rotating wafer, Proceedings of the 13th International Symposium on Contamination Control, pp. 465-469.
8. KACA-1998-01, 2003, A Standard of Indoor Air Cleaner, Korea Air Cleaning Association.