

입자하전량에 따른 클린룸 수직벽체로의 입자침착 특성

김종준, 노광철*, 성상철, 백선호**, 오명도†

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, 연세대학교 기계정보공학부*, **서울시립대학교 산업대학원 기계정보공학과, 서울시립대학교 기계정보공학과

Characteristics of Particle Deposition onto Cleanroom Wall Panel for Varying Particle Charging Rates

Jong-Jun Kim, Kwang-Chul Noh, Sang-Chul Sung, Sun-Ho Baek, Myung-Do Oh

Graduated School of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

*Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**Graduated School of Industry of Mechanical Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

† Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

ABSTRACT: In this study, we found out charged particle's deposition characteristic by experiments of 0.5 μ m, 1.0 μ m, 3.0 μ m size particle's concentration decay. We carried out the experiments on charged particle deposition onto the vertical cleanroom wall panel and some other fundamental experiments. The particle deposition mechanism is consist of sedimentation, convection, diffusion, thermophoresis, electrostatic and so on. Particle size determines mainly working deposition mechanism. The charged particle is made with corona discharge that are constituted field charging and diffusion charging. In addition, this combinational mechanism is called combined charging. The type of corona discharge determines quantity of particle electrical charge. In conclusion, we assumed that quantity of particle electrical charge accelerations deposition velocity onto the vertical cleanroom wall panel and proved it. And we figured out particle's deposition characteristic through compared between our experiment's results.

Key Words: charged particle(하전입자), particle deposition(입자침착), deposition velocity(침착속도), vertical cleanroom wall panel(클린룸 수직벽체), corona discharge(코로나 방전).

1. 서 론

전자기기의 성능이 향상되고 정밀해짐에 따라 제품을 생산하는 환경에 있어서 공기청정기술의 고도화에 대한 요구가 갈수록 커지고 있다. 이에 따라 반도체, LCD 등과 같은 전자제품들은 높은 청정도의 클린룸에서 생산되고 있으며, 제품의

수율 향상을 위해 클린룸 내부에서 발생하는 입자들의 제어를 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

이에 대한 연구로 Kang et al.⁽¹⁾과 Bae et al.⁽²⁾, Noh et al.⁽³⁾에 의한 기류 특성에 관한 연구와 Yoo et al.⁽⁴⁾ Bae et al.⁽⁵⁾ Ahn et al.⁽⁶⁾에 의한 수평 웨이퍼(wafer)에서의 입자침착에 관한 연구 등이 있다. 또한, Noh et al.⁽⁷⁾ 등에 의해 수행된 수직으로 세워진 클린룸 벽체에서의 정전압에 따른 입자침착에 대한 실험적인 연구를 통해 1.0 μ m 이하 일 때는 정전기력이, 3.0 μ m 이상일 때는 중력침강이 지배적인 입자 메카니즘이라는 것을 알

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2756; Fax: +82-2-2248-5110

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

수 있었다.

하지만, 클린룸 벽체에서의 입자 침착에 영향을 미치는 요인으로 클린룸 벽체의 정전기량뿐만 아니라 입자의 하전량에 따라서도 많은 영향을 받을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 코로나 방전을 이용하여 입경에 따른 입자하전량 및 그에 따른 클린룸 수직벽체로의 입자침착 실험을 수행하였고, 이를 통하여 입자의 하전량과 입경에 따른 입자침착 특성에 대하여 분석하였다.

2. 이론적 배경

실험챔버(chamber) 내부에서 입자가 감소되는 추이를 이용하여 입자하전량에 따른 클린룸 벽체로의 평균입자침착속도(average particle deposition velocity)를 간접적으로 도출해 볼 수 있다.

식(1)은 실험챔버 내부에서 입자가 균일하게 분포한다는 가정 하에 입자농도 감소에 대한 비정상 1차원 미분방정식을 보여주고 있다. 식(1)에서 좌변은 실험 챔버내부에서의 입자의 시간변화율을 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 정전압이 인가된 클린룸 벽체로의 감소율, 두 번째 항은 실험 챔버 내부에서의 자연감소율, 세 번째 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 챔버의 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 실험 챔버 내부에서의 자연감소율($parts/m^3$), \dot{Q} 는 입자계수기로 유입되는 체적유량(m^3/s)을 나타낸다.

식(1)의 세 번째 항이 나타내는 입자계수기로의 유입에 의한 감소율은 다른 항들에 의한 감소량에 비해 매우 작은 양을 나타내므로 세 번째 항을 무시할 수 있으며, 이를 고려하여 식(1)의 해를 구하면 식(2)와 같이 정리 할 수 있다.

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

식(2)에서 C 는 t 시간이 흐른 후 입자의 농도($parts/m^3$), C_0 는 챔버 내에서 실험 시작시의 초기농도($parts/m^3$), u_n 은 자연감소 특성계수, A_n 은 실험챔버의 내부표면적(m^2)을 나타낸다.

본 연구에서 평균 입자침착 특성계수를 구하는 방법은 다음과 같다. 첫 번째로 입자 및 클린룸 벽체에 전압을 인가하지 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)을 얻을 수 있다. 두 번째로 코로나 방전을 이용하여 입자를 하전시키고, 실험챔버 내에서 시간에 따른 입자의 농도감소 추이를 측정한다. 이 실험을 통해 얻어진 특성곡선에 대하여 Curve fitting을 수행하면 지수함수의 시간에 대한 계수를 구할 수 있으며, 이 계수와 자연감소 특성계수, 식(2)를 이용하면 입자하전량에 따른 클린룸 벽체로의 평균입자침착 특성계수(u)를 구할 수 있다.

3. 실험방법

본 연구에서는 50 cm×50 cm×50 cm 체적의 아크릴 재질의 챔버를 Fig. 1과 같이 구성하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 30 cm×30 cm 크기의 무정전 처리된 클린룸 벽체 4장을 실험 챔버 중앙에 설치하였다. 코로나 방전에 의한 입자의 하전량에 따른 챔버 내부에서의 입자농도감소 추이를 관찰하여 클린룸 벽체로의 입자침착 특성을 분석하였다.

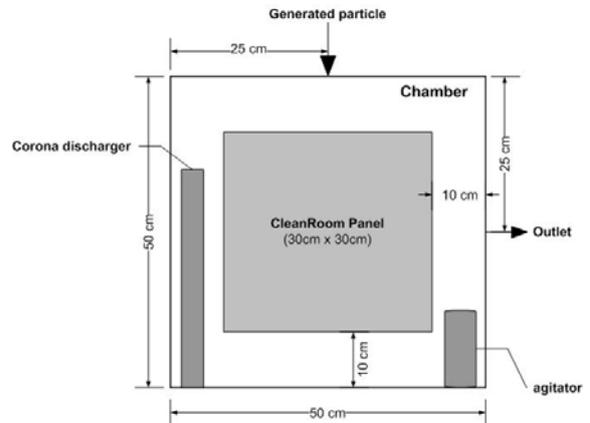


Fig. 1 Schematic of experimental chamber

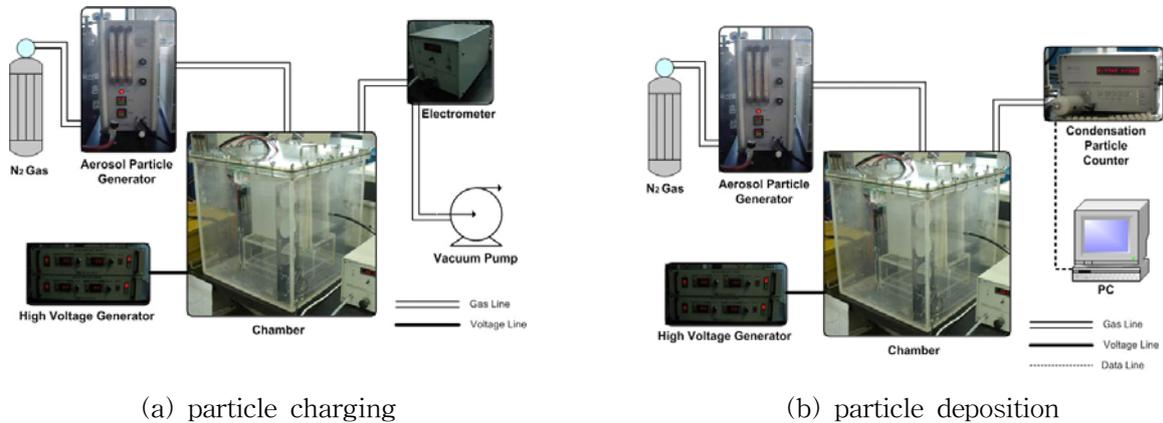


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system

Fig. 2의 (a)는 입자의 크기와 코로나 방전기에 인가되는 전압에 따른 입자의 하전량을 측정하기 위한 실험장치의 구성도를 나타내 것이다. 고순도의 질소와 응축식 단분산입자 발생기 (condensation monodisperse aerosol generator 3475, TSI)에 의해 발생된 $0.5 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$ 크기의 입자를 실험 챔버 내로 주입한다. 이때, 입자가 실험 챔버 내부에서 균일한 농도를 가질 수 있도록 교반기(fan)를 이용하였다. 고전압 발생기(High voltage generator, model SHV 300, SEWHA electronics)를 이용하여 와이어-관형의 코로나 방전기(corona discharger)에 0 V에서 6 kV까지 1 kV 간격으로 전압을 인가하였다. 코로나 방전기 인가전압 및 입자크기에 따른 입자의 하전량은 전하량 측정기(Electrometer, model 3068A, TSI)를 이용해 측정하였다.

Fig. 2의 (b)는 입자의 하전량에 따른 무정전 클린룸 벽체로의 입자침착 특성을 측정하기 위한 실험 장치이다. 단분산 입자발생기에서 발생된 $0.5 \mu\text{m}$, $1.0 \mu\text{m}$, $3.0 \mu\text{m}$ 크기의 입자를 2×10^6 parts/cm³가 될 때까지 실험챔버 내로 주입한 후 코로나 방전기를 이용해 입자에 하전을 가하였고, 챔버 내부에서의 입자농도변화를 측정하기 위하여 응축식 입자계수기(condensation particle counter, model 3022A, TSI)를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 1 Particle deposition coefficients when the naturally deposited experiment

Particle size[μm]	0.5	1.0	3.0
Characteristic coefficients[m/s]	7.5×10^{-5}	10.3×10^{-5}	13.3×10^{-5}

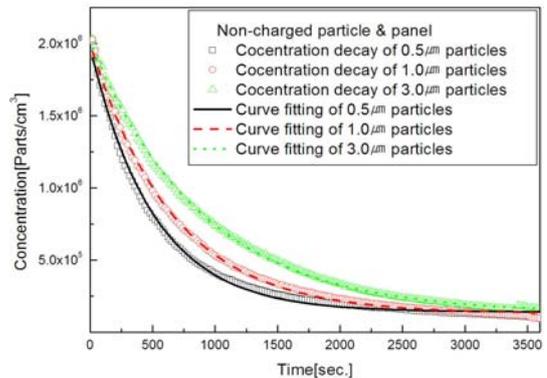
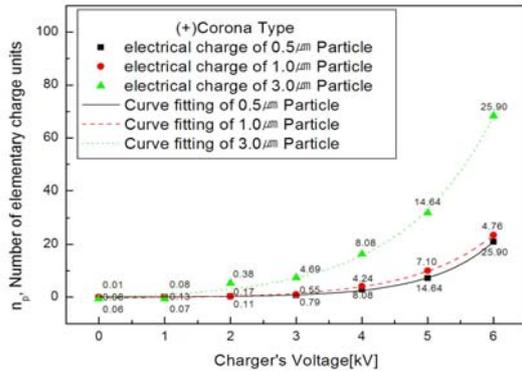


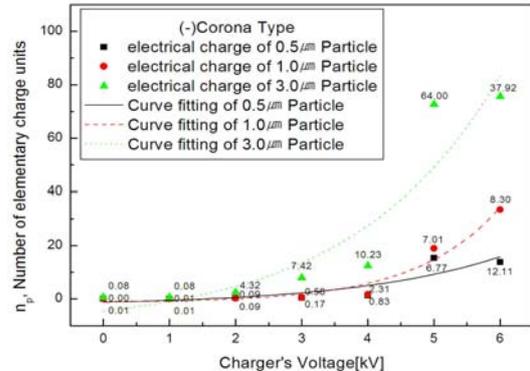
Fig. 3 Particle concentration decay with no corona discharge

4.1 입경에 따른 입자농도 자연감소 특성

Fig. 3은 입자에 0 V의 전압이 인가되었을 때, 입경에 따른 입자의 개수농도 감소곡선과 Curve fitting을 수행한 결과를 보여준다. 자연농도 감소 특성을 분석하기 위해 Fig. 3의 곡선을 이용해 Table 1에서와 같이 각 입경사이즈에 대한 자연감소 특성계수를 구하였다. 자연감소특성계수는 입경이 증가함에 따라 약간씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fuch 등⁽⁸⁾에 의해 수행된 이전 연구의 결과와 정성적으로 잘 일치한다.



(a) positive corona



(b) negative corona

Fig. 4 Particle charging rate with respect to the voltage of the corona charger

4.2 코로나 방전에 따른 입자의 하전량

입자를 하전시키기 위해 코로나 방전기에 인가하는 전압은 0 V에서 6000 V로 설정하였다. 이는 7000 V이상의 전압에서는 -코로나 방전에서 스파크 현상으로 인해 하전량이 급격히 감소하였기 때문이다.

Fig. 4의 (a), (b)는 인가전압에 따른 (+)코로나방전과 (-)코로나방전에서의 입자하전량을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 (+)코로나와 (-)코로나 모두 0 V, 1000 V에서는 입자하전량 (particle charging rate)의 변화가 거의 없고, 3

000 V에서는 하전량이 아주 미약하게 증가하였다. 4000 V 이상의 전압에서 코로나방전에 의해 입자의 하전량이 급격히 증가되는 것을 알 수 있다.

또한, 4000 V 이상의 전압에서 (-)코로나방전에 의한 입자의 하전량이 (+)코로나방전에 의한 입자의 하전량보다 다소 높음을 알 수 있으며, 입자의 입경 크기가 커질수록 큰 하전량을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 Fuchs⁽⁹⁾와 White⁽¹⁰⁾의 이전 연구결과와 잘 일치한다.

4.3 입자하전량에 따른 입자침착특성

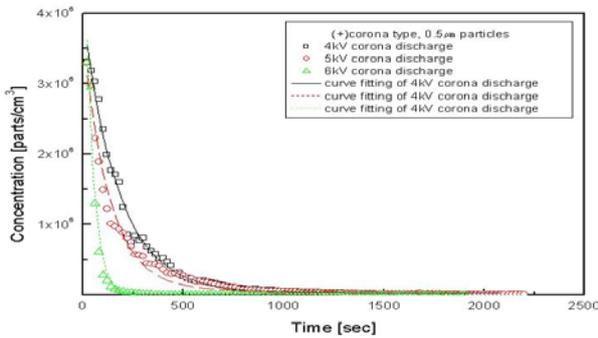
Fig. 5는 (+)와 (-) 코로나방전기에 인가된 전압에 따른 하전입자의 농도감소를 나타낸 것이다. Fig. 5의 (a), (b)에서 보는 것과 같이 인가하는 전압을 크게 할수록 입자농도가 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 입자의 하전량의 증가로 인해 입자에 작용하는 전기력이 증가하기 때문이다. Table 2는 Fig. 5의 입자농도감소곡선과 식(1)과 식(2)를 이용하여 입자침착특성계수를 구한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 동일한 입경에서 하전 전압이 증가함에 따라 침착특성계수가 커지는 것을 알 수 있다.

특히, 0.5 μm와 1.0 μm의 입자에서는 6000 V의 동일한 하전전압에서 침착특성계수가 각각 0.0015 m/s와 0.0017 m/s로 1.0 μm이하의 입자에서는 입자 크기가 침착속도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

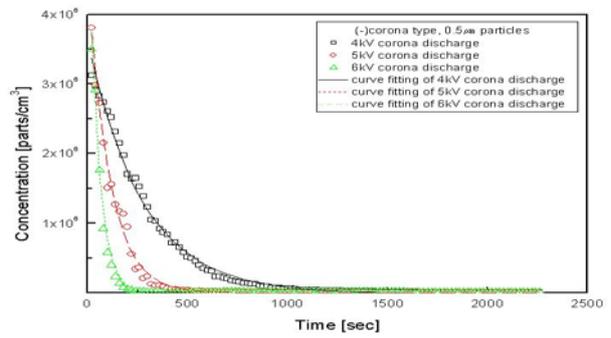
하지만, 3.0 μm의 입자에서는 하전전압이 6000 V일 때 입자의 침착특성계수가 0.0071 m/s로 1.0 μm이하의 입자침착특성계수보다 약 4배이상 큰

Table 2 Deposition velocity of electrical discharged particle when deposited onto non-charged vertical cleanroom panel

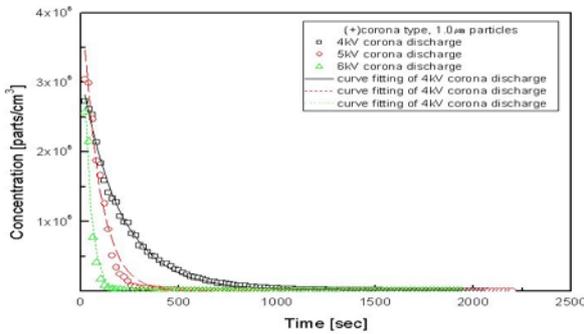
Corona type	Particle size [μm]	Particle charging voltage [kV]	Particle deposition velocity [m/s, ×10 ⁻⁴]
Positive	0.5	4	2.47
		5	3.76
		6	15.0
	1.0	4	2.38
		5	6.57
		6	17.1
	3.0	4	2.65
		5	48.4
		6	71.6
Negative	0.5	4	1.13
		5	4.86
		6	12.7
	1.0	4	1.55
		5	3.85
		6	9.52
	3.0	4	1.55
		5	5.33
		6	-



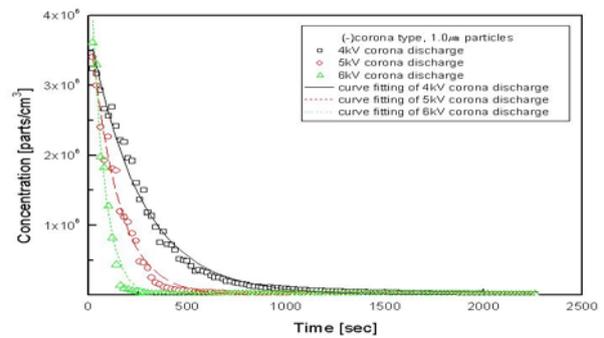
(a) positive corona, 0.5 μm



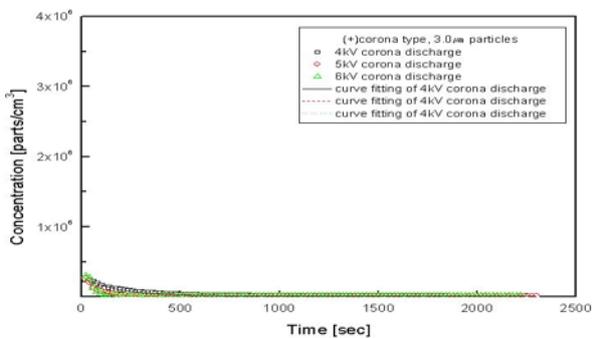
(d) negative corona, 0.5 μm



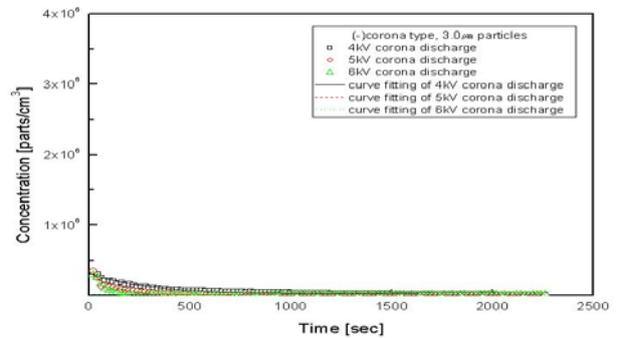
(b) positive corona, 1.0 μm



(e) negative corona, 1.0 μm



(c) positive corona, 3.0 μm



(f) negative corona, 3.0 μm

Fig. 5 Concentration decay of charged particle by positive and negative corona

것을 알 수 있으며, 인가되는 전압이 커짐에 따라 입자의 침착특성계수의 변화가 1 μm 이하의 입자보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이로부터 3 μm 이상의 입자에서는 입자의 크기 및 하전전압이 침착속도의 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 입자의 하전량에 따른 클린룸 벽체에서의 입자침착 특성분석을 통하여 다음과

같은 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 자연침착 시, 1 μm 이하의 입자에서는 확산에 의한 침착이 지배적인 반면, 그 이상의 입자에서는 중력침강에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있다.
- (2) (+)코로나에 의한 하전보다 (-)코로나에 의해 입자의 하전량이 다소 높게 나타났으며 입경의 크기가 증가함에 따라 하전량도 증가함을 알 수 있었다. 이는 입자에 인가되는 하전량이 입자 표면적의 함수이기 때문인 것으로 판단된

다.

- (3) 1 μm 이하의 입자에서는 인가되는 하전량 및 입자의 크기가 입자침착속도에 주는 영향이 크지 않은 반면, 3 μm 의 입자에서는 하전량 및 입자의 크기가 입자침착속도의 주요인자인 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국환경기술진흥원의 환경기술교육 혁신지원사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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 Concentration Control, pp. 465-469.
7. Noh, K. C., Son, Y. T., Kim, J. J. and Oh, M. D., 2006, Characteristics of Particle Deposition onto the Cleanroom Wall Panel with Electrostatic Voltages, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 1033-1038.
8. Fisk, W. J., Faulkner, D., Palonen, J. and Seppanen, O., 2002, Performance and costs of particle air filtration technology, Indoor Air, Vol. 12, pp. 223-234.
9. Fuchs, N. A., 1947, The Charges on the Particles of Aerocolloids, Izv. Akas. Nauk. SSSR, Ser. Geogr, Geofiz., Vol. 11., pp. 341-348.
10. White, H. J., 1951, Particle Charging in Electrostatic Precipitation, AIEE Trans, Vol. 70, pp. 1186-1191.