

청정공간에서 제품과 팬필터유닛의 위치에 따른 오염물질의 전파 특성

김혁순, 노광철*, 이영구**, 오명도†

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, 연세대학교 기계공학부*, **(주)LG Display CR기류팀,

† 서울시립대학교 기계정보공학과

Characteristics of Contaminant Transfer in a Clean Space for the Location of Product and Fan Filter Unit

Hyouk-Soon Kim, Kwang-Chul Noh*, Young-koo Lee**, Myung-Do Oh†

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

*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**Clean Room Airflow Control Team, LG Display Co. Ltd., Gyeonggi-do, 413-811, Korea

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

ABSTRACT: We performed a study on the contaminant transfer in a clean space for the location of product and fan filter unit using computational fluid dynamics analysis. To simplify the real product moving process, three different non-moving cases regarding the locations of product were selected: no product, at the lower side, and at the upper and lower sides. And to investigate the characteristics of the contaminant transfer, the arrangement of fan filter units was varied. Local mean air-age and contaminant distribution were used as evaluation indices. From the results, the contaminant transfer to the product was the most when the products were simultaneously located at the upper and lower sides. And the contaminant was easily exhausted regardless of the location of product when the fan filter units were properly arranged at the top side of the clean space.

Key words: Cleanroom(클린룸), Contamination Control(오염제어), Fan Filter Unit(팬필터유닛), Mini-environment(국소환경)

1. 서론

최근 IT 산업의 발달과 더불어 반도체, LCD 등의 전자장치 기술들이 많은 발전을 거듭하였다. 이와 같은 전자 장치 제품을 생산하는 클린룸

(cleanroom)에서는 실내에 부유하는 오염물질이 제품에 부착되어 불량률 야기하지 않도록 고청정 환경을 유지해야 한다.

LCD 패널의 대형화, 반도체 웨이퍼의 대구경화, 초고집적화, 패턴의 미세화가 추진됨에 따라 청정 환경을 유지하기 위해 클린터널형(clean tunnel module)시스템, 축류팬형(axial fan type, 이하 AFT로 칭함) 시스템, 팬필터유닛형(fan filter unit, 이하 FFU로 칭함) 시스템, 국소환경

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2756; fax: +82-2-2210-5575

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

(mini-environment) 시스템 등 과 같은 다양한 형태의 클린룸이 개발되어 적용 되고 있다. 이러한 초청정 클린룸 공조방식은 그 방식에 따라 제품의 생산 수율과 상당히 밀접한 관계가 있기 때문에 그 중요성이 GIGA급 클린룸 시대를 맞아 더욱 증대되고 있다.(1)

초청정 클린룸 공정에 있어서 많은 방식들이 제안되고 있으나 이에 대한 평가는 주로 시공 후, 많은 시간과 노력을 통한 실험적 방법으로 이루어지고 있다. 그러나 클린룸의 중요 평가인자인 기류와 청정도에 대해서는 방법상의 문제 등으로 실질적인 평가가 쉽지가 않을 뿐만 아니라 각각의 방식이 적용되어도 사용목적과 운전 특성, 오염발생 정도가 각각의 시스템에 따라 다르기 때문에 상호간의 비교분석은 더욱 어렵게 된다.(1,2,3) 초청정 클린룸을 평가하는 방법으로 Noh et al.(3)에 의해 제안된 국소환경시스템 평가방법인 국소평균공기연령(local mean air-age)이 있다. 청정 공간에서 국소평균공기연령은 신선한 공기가 임의의 점까지 도달되는 능력을 나타낼 뿐만 아니라, 와류에 따른 오염물의 혼합 및 전파 효과를 내포하고 있어 청정 공간 내부에서 기류 및 오염물질 확산을 평가하는데 적합한 지표라 할 수 있다.

본 연구에서는 LCD 생산 공정의 하나인 제품 세정기를 해석공간으로 선정하였다. 세정 후 제품 표면의 입자 침착을 최소화하기 위하여 FFU의 배치에 따른 오염물질 전파특성을 관찰하였고, 이동하는 제품의 비정상상태의 영향을 정상상태에 대한 해석으로 간편하게 수행하기 위하여

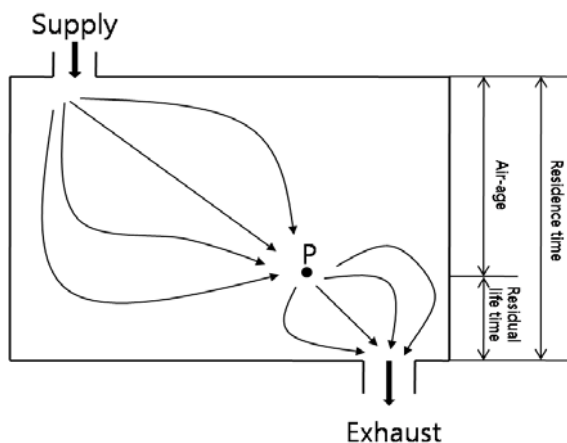


Fig. 1 Definition of different ages

제품의 위치에 따른 오염물질의 전파특성도 살펴 보았다. 평가 방법으로는 CFD 계산을 통해 구해진 국소평균공기연령, 오염물 농도 등을 이용하였다.

2. 평가방법

2.1 국소평균공기연령

본 연구에서는 환기에서 사용되는 국소평균공기연령 개념을 이용하여 평가해 보았다. 국소평균공기연령이란 급기구를 통하여 유입되는 신선한 공기가 실내의 임의의 점에 도달할 때까지 소요된 시간이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 공기가 실내로 유입되는 시점의 국소평균공기연령을 0으로 하면 실내 임의의 점 P에서의 국소평균공기연령은 통계적으로 산출할 수 있다. 일반적으로 공기는 여러 가지 경로를 통하여 임의의 지점 P까지 도달할 수 있기 때문에 그 지점에서 도달하는 국소평균공기연령의 평균값을 국소평균공기연령이라 한다. 수학적표현으로의 표현은 아래 식 (1)과 같다.

$$LMA = \int_0^{\infty} \frac{C_p(t)}{C(0)} dt \quad (1)$$

국소평균공기연령을 구하는 방법에는 체강법, 체승법, 펄스법이 있는데 위 식 (1)은 체강법을 나타내는 식이다. 체강법, 체승법, 펄스법은 계산상 수식의 차이는 있지만 결과 값은 동일하다.(4)

국소평균공기연령을 평가지표로 활용함으로써 기존 와류체적비나 난류강도와 같이 기류를 통한 평가 시에 한계가 되었던 청정도에 대한 평가를 할 수 있게 된다.(3)

2.2 입자 농도

국소청정공간에서 제품의 생산량을 저하시키고, 결함을 증가시키는 요인이 오염입자에 의한 것이라는 것은 재론할 필요가 없다. 제품의 결함 원인은 여러 복합적인 주변 환경에서 기인하지만, 결함의 원인을 파악하여 발진원을 찾아 관리하는게 효과적이다. 본 연구에서는 주요 발진원을 찾아 오염농도 해석을 수행하였고 이를 발생

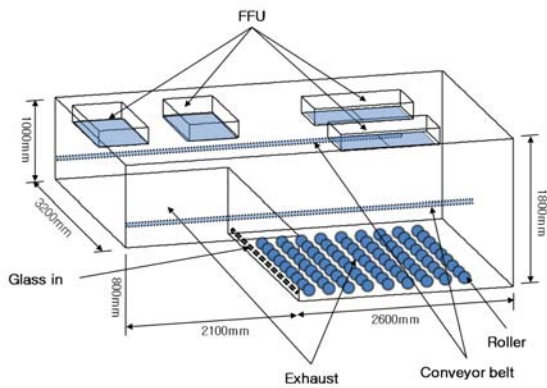


Fig. 2 Original layout of the model space

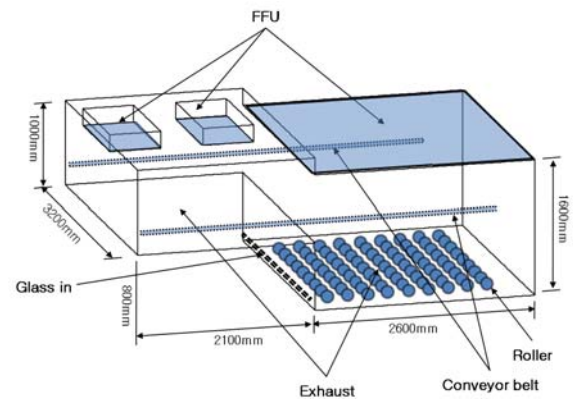


Fig. 3 Improved layout of the model space

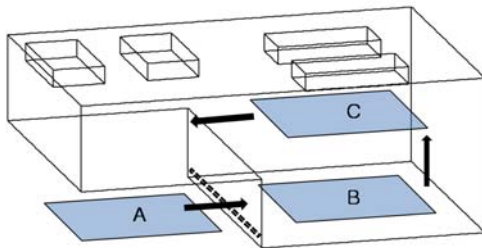


Fig. 4 Product moving process

량으로 무차원화 하여 3차원 농도장을 관찰하고 오염물질 전파에 대한 평가를 수행하였다.

3. 연구 방법

3.1 해석모델

Fig. 2는 제품 세정기의 일부를 모델링한 것이다. 세정된 제품이 나오는 부분에서 세정기 밖으로 빠져나가기 전까지의 공간을 나타내고 있다. 해석모델의 크기는 3200 mm(D) × 4700 mm(L)

× 1800 mm(H)이다. 세정기 상부에는 내부 청정도를 유지하기 위하여 FFU가 4개 설치되어 있고 중간 측면부에는 제품을 이동시키는 이송장치(conveyor belt)가 있고 바닥부분은 제품을 이동시키는 롤러가 설치하고 있다. Fig. 3은 구조가 개선된 후 오염전파의 특성을 살펴보기 위하여 우측 상부전면에 FFU가 배치된 형상을 보여준다. 제품의 위치나 이송장치 등은 모두 Fig. 2와 동일하다.

세정기 내부에서 제품의 실제 이동경로는 Fig. 4와 같이 좌측 하부로 투입되어 상부로 이송되고 다시 우측 상부로 빠져 나가는 것으로 되어 있다. 그리고 제품이 세정기에서 토출되어 B로 이동하는 동안 또 다른 제품은 C에 위치하게 된다. 이와 같이 이동하는 제품의 비정상상태의 영향을 정상상태에 대한 해석으로 간편하게 수행하고 제품의 위치에 따른 오염물질의 전파특성을 관찰하기 위하여 Fig. 5와 같이 제품이 없는 경우(case 1), 제품이 세정기 하단으로 투입된 경우(case 2), 제품이 세정기 상단과 하단에 모두 위치한 경우(case 3)에 대해 정상상태 해석을 수행하였다.

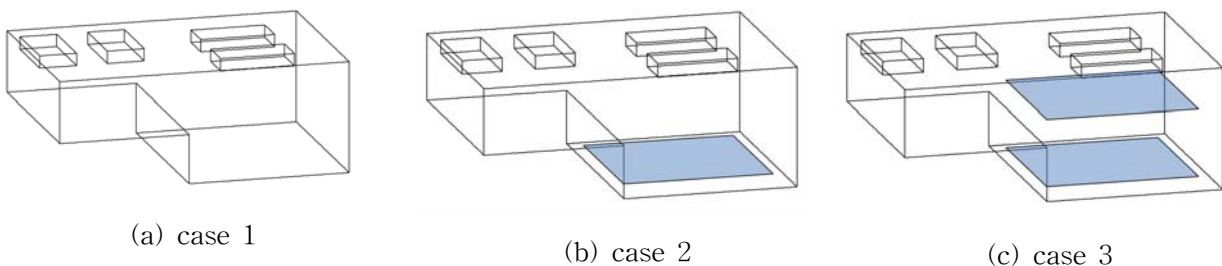


Fig. 5 Location of the product in the original and improved model

3.2 해석방법

공기유동과 가스 농도 수송방정식은 다음과 같은 정상 상태 Navier-Stokes 방정식으로 표현된다.⁽⁵⁾

$$\text{div}(\rho U\Phi - \Gamma_{\Phi,eff} \text{grad}\Phi) = S_{\Phi} \quad (2)$$

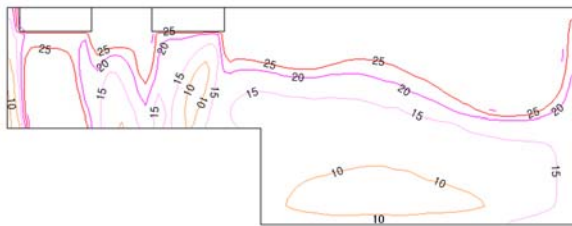
여기서 ρ 는 공기밀도(kg/m³), $\Gamma_{\Phi,eff}$ 는 유효확산계수(kg/m · s), U 는 유속벡터(m/s), S 는 방정식 특성에 기인한 생성항, Φ 는 각 방향의 속도, 난류 에너지, 난류 소산에너지, 가스농도를 나타낸다. 세정기 내부의 유동은 난류이기 때문에 standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다.^(6,7)

국소평균공기연령의 계산은 다음과 같은 정상 상태 농도장 계산법을 따랐다.⁽³⁾

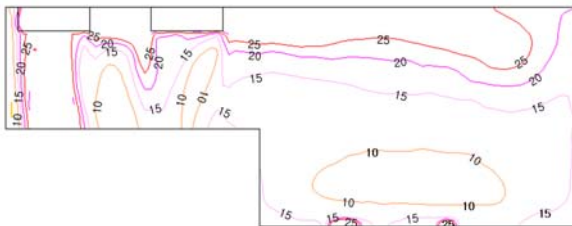
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[U_i \tau - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\mu}{\sigma_c} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \right] = 1 \quad (3)$$

여기서 τ 는 국소평균공기연령(s)이다. 식 (2)와 (3)의 지배방정식은 SIMPLE 알고리즘을 적용하고 상용 CFD코드인 STAR-CD를 사용하여 계산이 수행되었다.⁽⁵⁾ 그리고 대류항에 대한 계산을 위하여 2차의 상류차분도식(second order upwind scheme)을 사용하였다. 해석 모델링 격자는 약 260,000개의 사면체 격자계를 사용하였다. 계산시 수렴 판정 조건으로는 입구에서의 유입질량률과 운동량으로 정규화한 각 셀(cell)에서의 운동량 유수의 합과 연속방정식에서 유수의 합이 모두 10⁻³이하로 하였고, 농도장은 유수의 합이 10⁻⁷이하일 때로 정하였다.

4. 결과 및 고찰



(a) case 1

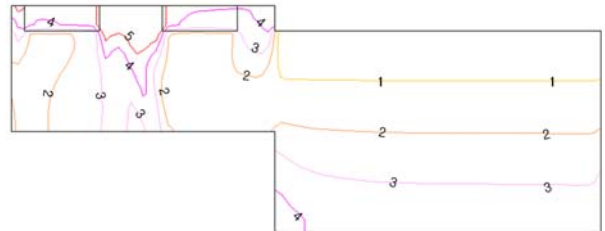


(b) case 2

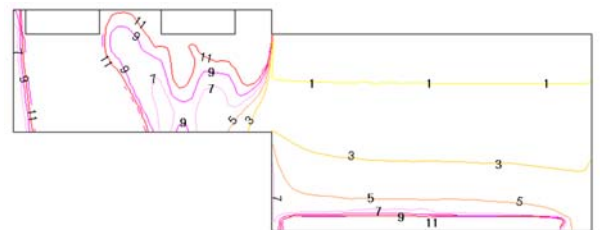


(c) case 3

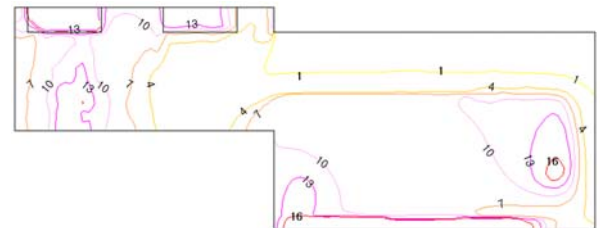
Fig. 6 Local mean air-age contours of the original layout in the z-x plane of y=1.6m



(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3

Fig. 7 Local mean air-age contours of the improved layout in the z-x plane of y=1.6m

4.1 국소평균공기연령 분포

Fig. 6은 기존 세정기 내부에서의 국소평균공기연령 분포를 보여준다. case 1과 case 2에서의 공기연령분포는 제품이 위치한 세정기의 우측하부를 제외하고는 거의 비슷하게 나타났다. 제품이 위치한 곳에서 국소평균공기연령이 증가된 이유는 제품에 의해 정체점이 생겨 청정한 공기가 제품에 도달되는 시간이 지연되기 때문이다. 그리고 공기연령이 세정기 우측 상단에서 높게 형성되고 있는데 이는 Fig. 2에서 보는 바와 같은 FFU의 배치 형태로 인하여 상부에서 와류가 형성되고 청정한 공기가 도달하는 시간이 길어지기 때문이다. 제품이 세정기 우측 상단과 하단에 동시에 위치한 경우(case 3)에는 두 제품사이에서 와류가 형성되고 이로 인해 국소평균공기연령이 증가한 것을 볼 수 있다. 이로부터 제품이 이물(foreign material)에 취약한 시점은 세정기 우측 상단과 하단에 동시에 위치한 경우라는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 $y=1.6m$ 의 단면에서 FFU의 배치가 개선된 경우의 국소평균공기연령 분포를 보여주고 있다. FFU의 개선 전과 후 제품의 위치에 따라서 공기연령을 비교해보면, case 1의 경우 개선 전의 세정기 내부의 국소평균공기연령은 최소 10 이상부터 최대 25이하로 분포되었고 반면 개선 후

의 세정기 내부 국소평균공기연령은 최대 5이하의 값으로 분포되었다. case 2의 경우는 개선 후에 제품의 윗면에서 국소평균공기연령이 최대 7이하의 값으로 나타났다. case 3은 국소평균공기연령의 값이 가장 높게 분포되었다. 개선 전의 국소평균공기연령을 살펴보면, 상단 제품윗면에서 5이하의 값으로 분포되어졌고, 상단과 하단 제품사이의 국소평균연령은 최소 35이상 최대 55이하의 값으로 분포되었다. 개선 후 상단에 위치한 제품 윗면은 대부분 국소평균공기연령이 1이었고 상단과 하단 사이의 값은 최소 7이상 최대 16이하로 분포했다. 이상의 결과로부터 세정기 상부에 설치된 FFU의 배치가 개선된 후 case 1의 경우 국소평균공기연령이 약 1/5로 감소하였고, case 2의 경우에는 약 1/3로 감소했고, case 3의 경우에도 최대 1/5로 국소평균공기연령이 감소하여 이로부터 제품으로의 이물침착량도 개선될 것으로 예상되었다.

4.2 오염농도 분포

제품을 이동시키는 구동부에서 오염물이 발생한다고 가정했을 때 FFU의 개선 전과 후의 오염물 농도분포에 대한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에서 보여주고 있다. 그림은 소스에서 발생된 오염물질이 전파되는 특성을 잘 보여주고 있다. 기존

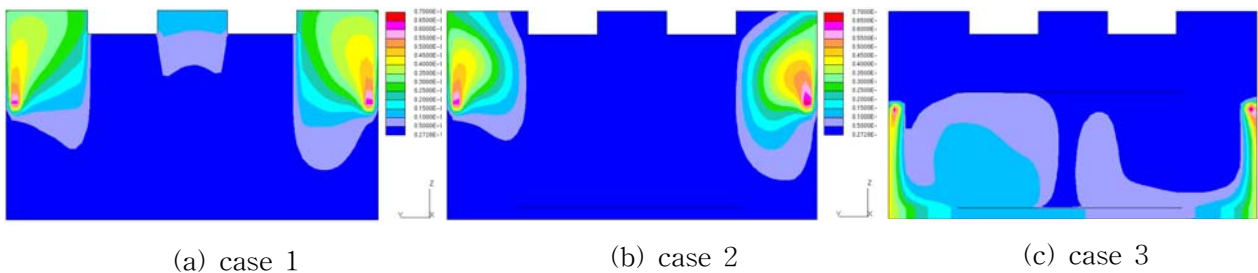


Fig. 8 Contamination distributions of the original layout in the $y-z$ plane of $x=3.4m$

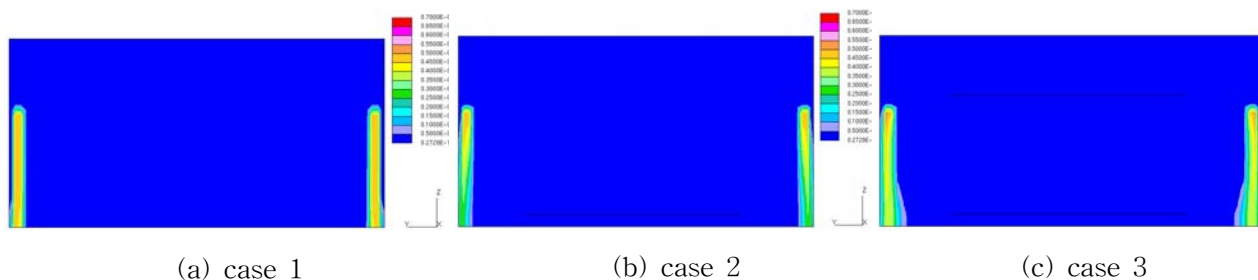


Fig. 9 Contamination distributions of the improved layout in the $y-z$ plane of $x=3.4m$

의 세정기 구조에서 제품이 없는 경우와 제품이 하단에만 위치한 경우에는 발생된 오염물이 주로 세정기 상부로 이동하여 확산되지만 제품이 상단과 하단에 동시에 위치한 경우에는 하부에 위치한 제품으로 많은 오염물질이 전파되는 것을 볼 수 있다. 이로부터 제품에 오염물이 침착되는 주된 시점은 제품이 상단과 하단에 동시에 위치되는 경우라고 판단된다. 또한 이 결과는 앞서 설명된 국소평균공기연령분포와 동일한 결과로서 이전에 발표된 Noh et al.⁽³⁾에 의한 연구결과와 잘 일치한다고 판단된다. FFU의 배치가 개선된 경우에는 제품의 유무, 위치에 상관없이 발생된 오염물이 배기구로 잘 빠져 나가는 것을 확인할 수 있었고 제품의 결함을 감소될 것으로 예측되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 LCD 생산 공정의 하나인 제품 세정기를 해석공간으로 선정하고 제품과 FFU의 배치에 따른 오염물질의 전파특성을 관찰하였고 이를 기초로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 세 가지 경우에 대한 국소평균공기연령 분포로부터 제품이 상단과 하단에 동시에 위치한 경우 제품이 이물(foreign material)에 가장 취약한 시점이라는 것을 알 수 있었다.

(2) FFU의 추가배치를 통해서 제품 위치에 상관없이 기존 구조에 비해 국소평균공기연령이 1/3~1/5 정도 감소하였다.

(3) 오염물질전파 특성으로부터 제품의 위치가 세정기내 상·하단에 동시에 위치할 때 하단 제품위로 오염물질 전파가 활발히 일어남을 확인할 수 있었다. 이는 제품이 하단에만 위치 할 때보다 상·하단 동시에 위치할 때에 오염물 전파에 대한 중점적인 청정도 관리가 필요하다는 것을 보여준다.

(4) FFU를 세정기 우측 상부전면에 추가배치함으로써 제품의 위치에 상관없이 오염물질 잘 배기되는 것을 확인하였고 이로 인해 제품 위로

의 오염물질 침착에 의한 결함을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Oh, M.D., 2002, A trend of GiGA level cleanroom technology, International Symposium on Clean Technology and Management for Indoor Air, Korea Air Cleaning Association, pp. 17-62
2. Kim, K. Y., 1995, Next generation cleanroom technology and air quality control, Manazine of the society of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 24, No. 1, pp.33-43
3. Noh, K.C., Lee, H.C., Park, J.I., Oh, M.D., 2008, Prediction and evaluation of cleanliness levels inside a mini-environment by measuring mean air age and effective flow rate. IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing, Vol. 21, No. 2, pp. 297-304.
4. M. sandberg and M. Sjöberg, 1983, The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms, Building and Environment, Vol. 18, No. 4, pp. 181-197.
5. Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington DC.
6. Shiu, H. R., Huang, H. Y., Chen, S. L., and Ke, M. T., 2003, Numerical Simulation for Air Flow in Minienvironment and SMIF Enclosure, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 16, pp. 60-67.
7. Noh, K. C., Lee, S. C., and Oh, M. D., 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.