

◆특집◆ 전자부품 패키징 기술

CCM 정밀 공정에 사용되는 장비의 청정도 평가

이문석*, 박영진**

A Clean Level Test for a Precise Devise in CCM Assembly Process

MoonSeok Lee* and Youngjin Park**

Key Words : Clean level test (청정도 실험), Stage (스테이지)

1. 서론

현재 반도체 및 LCD, Compact Camera Module(CCM)과 같이 고정밀도를 요하는 제조 공정들이 산업 전반에 걸쳐 증가하고 있다. 이런 정밀 공정은 제조 공정에서의 고정밀도 제어도 중요하지만, 미세 먼지에 의해 제품이 오염되어 제품의 불량률이 발생하는 문제도 매우 중요하다. 이런 미세 먼지에 의한 제품의 오염을 막기 위해, 정밀 제조 공정 외에 작업 환경을 고 청정의 환경으로 유지하는 것도 매우 중요하다. 이런 정밀 공정이 이루어지는 clean room¹은 Federal Standard 209D와 ISO standard 14544-1 등에서 Table1~2와 같이 제시되는 청정 기준으로 평가되며, Federal Standard 209D에 따르면 고 정밀 작업들은 Class 10 혹은 100의 깨끗한 환경에서 작업이 이루어져야 한다. 이를 위해, 기존의 많은 연구와 실험을 통해 clean room에 대한 여러 청정 방법들이 제시되어 왔다. 이런 방법들은 clean room의 청정도를 평가하는 방법, 혹은 외부에서 유입되는 먼지를 효과적으로 차단하는 방식 그리고 원하는 청정도에 따른 작업

공간의 공기 순환 방식²에 관한 여러 지침들로 이루어져 있다. 이는 clean room에 대한 전반적인 내용들로 정밀 공정이 이루어지는 작업 공간에 대한 기본적인 내용들이다.

반면 국부적으로는 공정에 필요한 여러 장비들이 clean room 내에서 미세 먼지를 발생시킬 수 있는데, 이 장비들은 실제 작업 공정이 이루어지는 공간에 가장 가까이 위치하고 있어 미세 먼지에 의한 제품 수율에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 하지만, 앞에서 언급한 청정 기술들과 기준들은 직접적으로 이런 장비들의 청정도 평가에 적용할 수 없으며, 그에 따른 효과도 매우 미비하다. 그래서, 현재로는 이런 clean room에서 사용될 장비에 관한 명확한 청정 기준 및 평가 방법은 마련되어 있지 않으며, 이를 위한 명확한 해결 방법이 제시되어 있지 않은 상태이다. 그 결과, 이런 장비에서 발생하는 미세 먼지는 제품 수율에 직접적인 영향을 끼칠 수 있으며, 이런 미세 먼지들을 효과적으로 제거하지 않으면 지속적으로 제품 불량률이 야기된다. 그래서, 실제 이런 장치에 대한 청정도 평가 방식이 마련되어야 한다.

본 연구에선 고 청정을 요하는 정밀 공정에서 사용되는 장비들이 작업 환경의 청정도에 미치는 영향을 실험을 통해 살펴보고자 한다. 또한, 특별히, Compact Camera Module 자동화 공정에 사용되는 Z θ stage에 대해서 평가를 수행하고자 한다. 이를 위해, Z θ stage에서 발생하는 미세 먼지량을

* KAIST 기계공학과,
Tel. 042-869-3060, Fax. 042-869-8220
Email : esteban@kaist.ac.kr

** KAIST 기계공학과,
구조 동역학, 구조/음향 연성 문제에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

측정하는 방식을 제안하고, 이를 실험을 통해 측정을 한다. 또한 측정된 결과를 토대로 Table 1~2에서 제시된 clean room 평가 기준에 따라 발생된 미세 먼지가 작업 환경에 미치는 영향을 평가하도록 한다. 또한, stage에서 발생하는 미세 먼지로 인해 제품 불량률이 일어나지 않기 위한 기준과 방식을 제시하고자 한다.

Table 1 Maximum concentration limits (Particles/1ft³) according to Federal Standard 209D Class

Class	Particle size (um)				
	>=0.1	>=0.2	>=0.3	>=0.5	>=5
1	35	7.5	3	1	...
10	350	75	30	10	...
100	...	750	300	100	...
1,000	...	...	...	1,000	7
10,000	...	...	...	10,000	70
100,000	...	...	...	100,000	700

Table 2 Maximum concentration limits (Particles/m³) according to ISO Standard 144644-1Class

Class	Particle size(um)					
	>=0.1	>=0.2	>=0.3	>=0.5	>=1	>=5
1	10	2	...	...	...	...
2	100	24	10	4	...	...
3	1000	237	102	35	8	...
4	10000	2370	1020	352	83	29
5	100000	23700	10200	3520	832	293
6	1000000	237000	102000	35200	8320	2930

2. Stage에서의 미세 먼지 측정

2.1 Stage에서의 미세 먼지 발생 원인

Fig. 1은 본 연구에서 사용되는 Zθ stage의 모습을 보여준다. 이 stage는 shaft가 coil motor에 연결되어 있으며, shaft의 축 방향으로 직선운동과 축을 중심으로 θ 방향의 회전운동을 하는데, 이때 베어링과의 shaft 사이에 마찰이 일어난다. 이런 마찰에 의한 베어링 수명 단축을 막고 shaft의 원활한 운동을 위해 베어링 내에 윤활유가 존재하는데, shaft의 운동 시, 베어링과 shaft 사이의 마찰에 의해 베어링 부분에 열이 발생하고, 이 열은 윤활유의 온도를 상승시킨다. 이렇게 윤활유의 온도가 상승하면, 윤활유의 viscosity가 감소³하면서 윤활유의 입자들이 활성화되어 외부로 방출되는데, 이로 인해, Fig. 1에서 보이는 것처럼, 작업이 이루어지는 target 영역으로 미세 먼지들이 분사되어, 작업 환경을 오염시켜 제품의 불량률을 야기시킬 수

있다. 이런 미세 먼지의 방출을 막고자 윤활유가 방출되지 않도록 ball 베어링을 완벽하게 감싼 베어링도 있지만, 축 방향 왕복운동에선 shaft와 ball 사이의 마찰에 의해 shaft에 윤활유가 묻어질 수 있어 미세 먼지 방출을 막을 수 없다. 또, 미세 먼지를 없애고자, air-베어링을 사용하기도 하는데 이 경우, shaft 축을 완벽하게 지지하지 못해 축 방향의 운동을 정밀하게 제어하기는 힘들다.

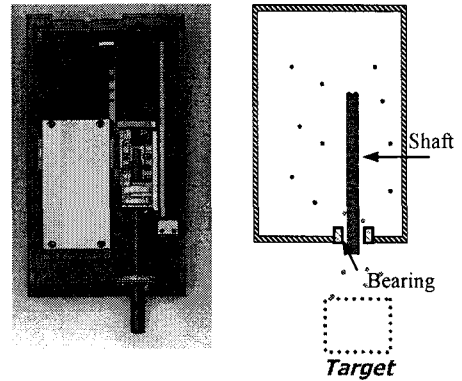


Fig. 1 Zθ stage

2.2 Stage에서의 미세 먼지량 측정 방법

앞에서 설명한 것처럼 stage에서 발생한 미세 먼지에 의해 주위의 공기가 얼마나 오염되는지를 파악하기 위해선 먼저 작동 중에 stage에서 발생하는 미세 먼지량을 측정해야 한다. 본 연구에서는 미세 먼지 size에 따라 미세 먼지 개수를 측정하기 위해 Hira/Royco (Optical Particle Counter)를 사용하며, 이 OPC는 미세 먼지 크기 0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5, 20 um 단위로 흡입한 공기 중의 미세 먼지 개수를 측정해 준다.

일반 공기 중의 미세 먼지는 1cc 당 수백 개의 미세 먼지가 존재하므로, 1m³ 안에서는 헤아릴 수 없을 만큼의 미세 먼지가 존재한다. 이 경우, 일반 공기 중에서 stage를 작동시켜 미세 먼지 개수를 측정하면, 주변의 미세 먼지가 너무 많기 때문에 stage에서 발생한 미세 먼지 양을 구분해 내기 힘들다. 그러므로, stage에서 발생하는 미세 먼지의 양에 따라 Federal Standard 209D 기준으로 class 10 혹은 100의 청정한 조건에서 stage를 작동시켜 그때 발생하는 미세 먼지 개수를 측정해야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 Hepa filter를 통해 외부로

부터의 미세 먼지 유입을 차단한 밀폐 공간을 만들고, 이 공간에서 stage 를 작동시켜 stage 에서 발생하는 미세 먼지 개수를 OPC 를 통해 측정하였다. Hepa filter 는 0.3um 이상의 크기를 가지는 미세 먼지를 99.99% 걸러 내주며, 밀폐공간은 OPC 에서 흡입되는 공기에 의해 내부 공기가 빠른 속도로 순환되도록 작은 크기의 밀폐 공간을 Fig. 2 에서처럼 만들었으며, Fig. 2 는 stage 에서 발생하는 미세 먼지 측정을 위한 실험 모습을 보여준다.

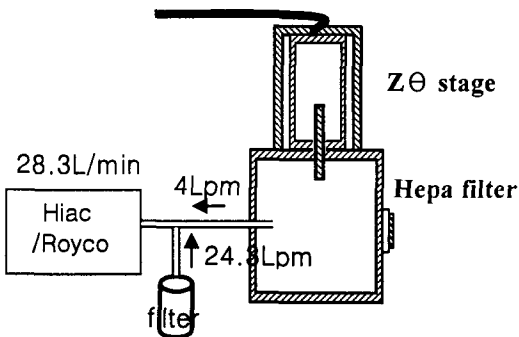


Fig. 2 Experimental set up for clean test

2.3 Stage 에서 발생한 미세 먼지 개수

Fig. 2 와 같은 실험으로 미세 먼지 크기에 따라 stage 에서 발생한 미세 먼지 개수를 OPC 를 통해 측정하였다.

먼저, stage 작동 전에 밀폐된 공간에 존재하는 미세 먼지를 OPC 를 통해 뽑아 내어 밀폐된 공간의 공기가 시간이 지남에 따라 Hepa filter 를 통해 걸러진 공기로 바뀌도록 하였으며, 이를 통해 stage 작동 전에 밀폐된 공간을 고청정 환경으로 만들었다. 하지만, Fig. 3 ~ 4 에서 보이는 것처럼 밀폐된 공간의 미세 먼지는 완전하게 제거되지 않는다. 이는 Hepa filter 자체가 0.3um 이상의 미세 먼지는 99.99% 걸러내지만, 일반적인 주변 공기에서는 1cc 당 수백 개에서 수십 개의 미세 먼지가 존재하므로, 아무리 Hepa filter 로 미세 먼지를 걸러 밀폐된 공간의 공기를 바꿔어도 미세 먼지가 외부로 조금씩 밀폐된 공간 안으로 유입된다. 그 결과 Fig. 2 에서처럼 OPC 가 4L/min 의 공기를 밀폐된 공간에서 뽑아낼 경우, 수백에서 수십 개의 미세 먼지가 OPC 에 측정될 수 있다. Fig. 3 ~ 6 은 stage 작동 하기 전, 작동 중 그리고 작동한 후에 2 분 간격으로 OPC 에서 측정된 미세 먼지 개

수를 시간에 따라 크기 별로 측정한 결과를 보여주고 있다. 0.3um 에서 0.5um 사이의 미세 먼지 개수를 측정한 Fig. 3 의 경우, 작동 전의 상황을 보면, 8L 당 약 40 개의 미세 먼지가 존재하므로 ISO 규격으로 Class 4 은 조금 넘고, Class 5 는 만족한다. 이는 Federal Standard 209D 로 Class 10 과 Class 100 사이에 해당한다. 반면, 0.5um 이상의 미세 먼지는 모두 ISO Class 4(Federal Standard Class 10)을 만족한다. 이를 통해, 청정한 환경에서 실험을 수행하였음을 알 수 있으며, 또한 stage 에서 발생하는 미세 먼지 개수를 주위 환경의 영향을 덜 받으면서 측정해 낼 수 있다.

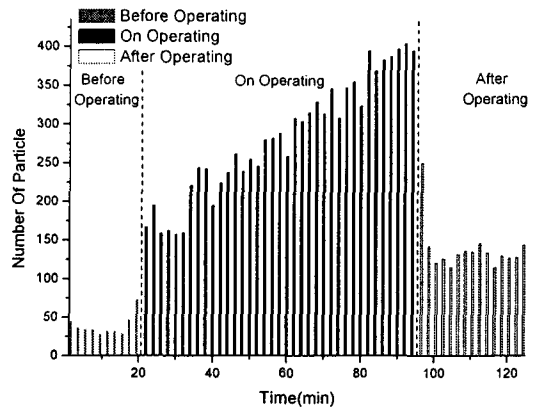


Fig. 3 Number of particles (size 0.3 ~ 0.5 um) measured by OPC for 2 min (stage : 4Hz round motion)

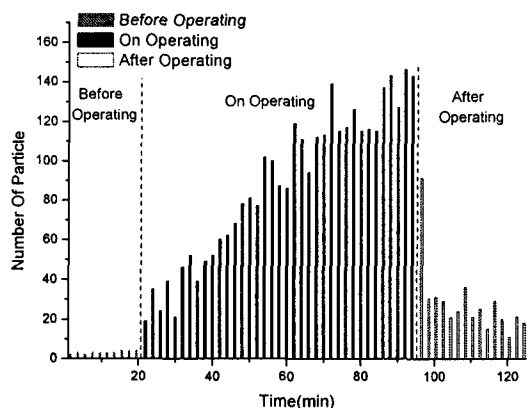


Fig. 4 Number of particles (size 0.5 ~ 1.0 um) measured by OPC for 2 min (stage : 4Hz round motion)

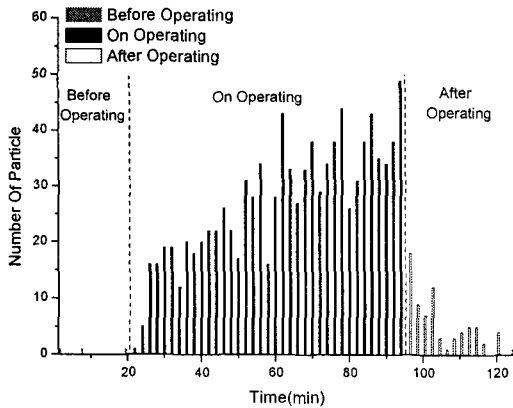


Fig. 5 Number of particles (size 1.0 ~ 2.5 um) measured by OPC for 2 min (stage : 4Hz round motion)

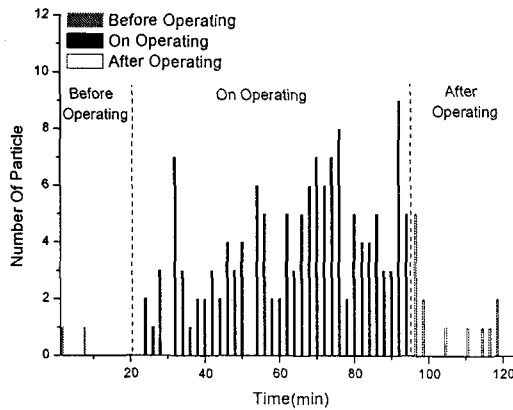


Fig. 6 Number of particles (size 5~2.5 um) measured by OPC for 2 min (stage : 4Hz round motion)

Table 3 Average(Maximum) number of particles generated from the operating stage for 1 min

Hz	Average number of particle per min (max)				
	>=0.3	>=0.5	>=1	>=2.5	>=5
4	122(182)	43(71)	13(24)	1.8(4)	0.07(2)
2	131(276)	45(87)	11(22)	0.96(2)	0.00(1)

본 연구에서 사용된 Z0 stage 는 2.1 장에서 미세 먼지 발생 원인을 설명한 것처럼 작동 시 베어링 부분에서 미세 먼지가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 stage 에서 발생하는 미세 먼지를 shaft 를 4Hz 와 2Hz 로 왕복 운동시키면서 측정하였다.

Fig. 3-6 은 Stage 작동 중 측정된 미세 먼지 개수를 보면 시간이 지남에 따라 발생하는 미세 먼지 개수가 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 마찰에 의해 베어링부분의 온도가 증가하면서, 미세 먼지 발생량이 증가한 것으로 추후 이에 대한 원인 분석이 필요하다. Table 3 은 이를 종합하여 작동 중 stage 에서 발생한 미세 먼지 개수를 크기 별로 분류한 것이며, 작동 중 분당 발생한 미세 먼지의 평균 값과 최대 값을 보여준다. 이를 보면, 발생한 미세 먼지의 대부분은 1um 이하의 미세 먼지인 것과 2.5um 이상의 미세 먼지는 매우 적은 양이 발생한 것을 알 수 있다. 여기서 계산된 평균 값과 최대 값은 작동 전 OPC 에서 측정된 미세 먼지의 평균 값을 뺀 나머지 값으로 작동 중에는 0.5um 이하의 미세 먼지를 제외하곤, 측정된 미세 먼지 개수가 작동 전보다 10 배 이상 증가했다.

3. Stage 의 청정도 평가

3.1 Stage 에 작업 환경에 미치는 영향

stage 에서 발생한 미세 먼지는 실제 작업 조건에 따라 제조 공정에 미치는 영향을 달라진다. 만약 stage 가 제조 공정 과정에 정밀 부품 조립 파트에 근접하여 작동하게 되면, 매우 작은 양의 미세 먼지도 제품의 불량률을 높이게 되며, 미세 먼지를 많이 발생시켜도 작업 위치가 정밀 조립 파트에서 멀리 떨어져 있으면, 제품에 미치는 영향이 적게 된다. 또한, 작동 주파수와 운동 폭에 따라서도 발생한 미세 먼지의 양에 차이가 날 수 있다. 그러므로 실제 작동 조건에 맞추어 stage 에서 발생하는 미세 먼지량을 측정해야 한다.

반면, 이런 작동 조건이 완벽하게 정해져 있지 않을 경우, 여러 작동 조건에 대해 실험을 하여, stage 에서 발생하는 미세 먼지의 특성을 파악해야 한다. 본 연구에서는 사용되는 stage 의 작동 주파수가 명확히 제시되어 있지 않은 관계, stage 의 shaft 가 4Hz 로 왕복 운동한다고 가정하고 청정도를 평가하도록 하겠다.

3.2 Stage 의 청정도 평가 방법

정밀 공정을 요하는 제조 공정의 clean room 은 정밀도에 따라 요구되는 청정도 조건이 다르다. 초정밀을 요하는 반도체 공정의 경우 Federal Standard 로는 청정도 class 10 이상을 유지해야 하

며, 그 외의 정밀 공정의 경우는 class 100 정도의 청정도를 유지해야 한다. 이를 위해, 외부로부터 유입될 수 있는 미세 먼지를 차단해야 하며, 지속적으로 작업 공간의 공기를 깨끗한 공기로 환기시켜줘야 한다. 이를 위해, Federal Standard 209D 에 따르면, class 100 에 대해서는 clean room 의 공기를 전체적으로 시간 당 600 회로 환기를 시켜야 한다.¹ 하지만, 이는 유지 비용상 쉽지 않으며, 부분적으로 공기 흐름이 정체될 수 있다. 그러므로, 본 연구처럼 부분적으로 미세 먼지가 발생할 경우, 전반적인 clean room 의 공기 순환 이외에도 미세 먼지가 발생할 수 있는 부분에 공기 순환이 빠르게 이루어 지도록 해야 한다. 그래서, clean room 에서의 원활한 공기 순환이 이루어 지는지 알기 위해, clean room 에서의 유동 흐름에 관한 연구들이 많이 이루어 졌으며,^{1,2} 국소부분에 대한 유동 해석을 통해 청정도를 평가하는 연구도 이루어졌다.⁴ 본 연구에선 이런 유동에 관한 연구들을 바탕으로 미세 먼지가 발생하는 국부지점에 필요한 유동 값을 살펴 보고 이에 따른 국부 지점에서의 청정도를 예측하도록 하겠다.

3.2.1 청정도에 따른 필요 유량

본 연구처럼 clean room 내에 미세 먼지를 발생시키는 장비가 있을 경우, 발생 지점 P 에서의 미세 먼지의 실내 평균 농도 $\langle C_p(part/m^3) \rangle$ 는

$$\langle C_p \rangle = \frac{\dot{m}}{Q_{eff}} \quad (1)$$

과 같으며 이 때, $\dot{m}(part/min)$ 은 P 지점에서 발생하는 미세 먼지량이고, $Q_{eff}(m^3/min)$ 은 유효 유량이다. 이 식을 이용하여, 장비가 작동 중인 지점의 실제 유효 유량을 측정하고, 2 장의 실험을 통해 얻은 미세 먼지 발생량으로 국소 지점의 미세 먼지 농도를 예측할 수 있다. 만약 이렇게 예측된 미세 먼지 농도가 Table 1 과 2에서의 원하는 청정도를 만족시키지 못할 경우, 반대로 필요한 청정도에 대한 유효 유량을

$$\bar{Q}_{eff} = \frac{\dot{m}}{\langle \bar{C}_p \rangle} \quad (2)$$

으로 계산해서 이 유량 이상으로 공기가 흐르도록

해야 한다. 본 연구에선 clean room 내에서 실제 장비가 위치할 지점에서의 실제 유효 유량을 알지 못하므로, ISO 의 Class Level 5 을 만족하도록, 필요 유량을 2 장에서 실험을 통해 얻은 Zθ stage 의 미세 먼지량을 이용하여 Table 4 와 같이 구하였다. 이 경우, 2.5um size 이하의 미세 먼지에 대해서는 약 13L/min 의 유효 유동으로 stage 부분의 공기를 환기 시켜야 ISO 의 Class Level 5 을 만족하며, 본 연구의 경우, Zθ stage 가 사용될 CCM 공정에서 제작되는 Chip pitch 기준으로 2.5um 이상의 미세 먼지는 완전히 제거해야 한다.

만약 이보다 더 높은 청정도 조건을 만족해야 하면, 그에 따른 미세 먼지 농도를 통해 미세 먼지 발생 지점에서의 유효 유동을 다시 계산해야 한다. 또한 그 지점에서의 실제 유효 유동이 필요 유효 유량을 만족하지 못할 경우, 발생된 미세 먼지에 의해 제품 수율에 문제가 될 수 있으며, 실제 유효 유동을 증가시키거나, 미세 먼지를 줄이는 추가적인 방법을 수행해야 한다.

Table 4 Required flow rate according to clean standard ISO Class 5

Hz	Required flow rate according to ISO Class 5			
	>=0.3	>=0.5	>=1	>=2.5
4	12 (L/min)	12	16	...
2	13	13	13	...

4. 결론

본 논문은 고 청정 환경을 요하는 정밀 공정에 사용되는 장비의 청정도를 평가하는 방법에 관한 내용이다.

이는 기존의 전반적인 clean room 에 대한 청정도 기준과 평가 방법과 달리, 실제 clean room 에 사용되는 장비에 대한 청정도 평가 방법으로 기존의 clean room 기준을 국부적으로 적용할 수 있는 있도록 하였다. 이를 적용하고자, 실험을 통해 clean room 에 사용되는 장비가 발생시키는 미세 먼지량 측정 방법 보여주었으며, 이를 이용하여 원하는 청정도에 따라 장비의 청정도 평가 방법과 이를 해결하기 위한 필요 유량을 계산하였다. 이를 통해, 실제 clean room 에 사용되는 장비가 주위 환경의 청정도에 얼마나 영향을 끼칠 수 있는지 판단 할 수 있다.

후 기

본 논문은 (과제명 : CCM (Compact Camera Module) 시스템통합 및 핵심요소기술 개발, 과제 번호 : 10024124-2007-13) 과 BK21 로 수행된 연구 임.

참고문헌

1. Chung, M. S., Lee, C. S., Cho, S. J., Lee, C. H., Jung, J. S., Bae, G. N., Shin, H. T., Park, Y. S., Kim, S. H. and Chae, S. K., "Development of Advanced Technology in Extreme Conditions : Development of Clean Room Technology," Korea Standards Research Institute Reports, KSRI-91-159-IR, 1991.
2. Noh, K. C., Lee, H. C. and Oh, M. D., "A Numerical Analysis on the Airflow Characteristics in Super Cleanrooms with Different Design Types," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 15, No. 9, pp. 751-761, 2003.
3. Shigley, J. E. and Mischke, C. R., "Mechanical Engineering Design 6th Edition," Mac Graw Hill, pp. 714-729, 2001.
4. Noh, K. C., Lee, H. C., Park, J. I. and Oh, M. D., "Evaluation and Prediction of Cleanliness Level in the Mini-Environment System Using Local Mean Air-Age," Trans. of the KSME (B), Vol. 31, No. 5, pp. 457-466, 2007.