

측정점 교환방식 미세입자 모니터링 시스템 고도화

안성준^{*†}

^{*†}제주한라대학교 지능형시스템공학과

Advancement of Sequential Particle Monitoring System

Sung Jun An^{*†}

^{*†}Department of Intelligent Systems Engineering, Cheju Halla University

ABSTRACT

In the case of the manufacturing industry that produces high-tech components such as semiconductors and large flat panel displays, the manufacturing space is made into a cleanroom to increase product yield and reliability, and various environmental factors have been managed to maintain the environment. Among them, airborne particle is a representative management item enough to be the standard for actual cleanroom grade, and a sequential particle monitoring system is usually used as one parts of the FMS (Fab or Facility monitoring system). However, this method has a problem in that the measurement efficiency decreases as the length of the sampling tube increases. In this study, in order to solve this problem, a multiple regression model was created. This model can correct the measurement error due to the decrease in efficiency by sampling tube length.

Key Words : FMS, Sequential particle monitoring system, Multiple linear regression, Cleanroom

1. 서 론

반도체, 디스플레이 등 첨단 부품을 생산하는 제조업과 바이오 의약품 산업의 경우, 제품의 수율 및 신뢰성을 높이기 위해 제조환경 관리에 많은 노력과 자원을 투자하고 있는데 대표적으로 제조 공간을 Cleanroom(청정실, 이하 C/R)으로 만들고, 그 환경을 유지하기 위해 여러 환경 인자를 관리하고 있다. C/R 환경을 유지하기 위해 대표적으로 관리하는 인자는 온도, 습도, airborne particle, acid, odor(냄새), 진동, 조도, gas impurity, DI(De-Ionized) water, UPW(Ultra-Pure Water) 등이다.[1] 이중 airborne particle은 실제 C/R 등급의 기준이 될 정도로 대표적인 관리 항목인데[2], 이를 위해 C/R에는 미세입자 모니터링 시스템을 설치하여, 24시간 미세 입자의 수준을 모니터링하고 있다. 일반적으로 환경 모니터링 방식은 두 가지인데, 그 첫 번째는 Real Time Remote Particle Monitoring System(전측정점 계수방식,

이하 RTMS)이고, 두 번째 방식은 Sequential Particle Monitoring System(측정점 교환방식 시스템, 이하 SPMS)이다.[3] 각 방식은 그 장단점이 명확하게 나뉘는데, RTMS의 경우, 실시간(보통 1s 단위) 측정 및 In-situ 모니터링이 가능한 장점이 있고, 이와 더불어 데이터 측정 오차가 거의 없다는 장점이 있지만, 동시에 모니터링 개소가 많아지는 경우 계측기를 포함한 모니터링 장비 구축에 큰 비용이 소요되며, 계측기 인증을 위한 주기적 검교정에 추가로 많은 시간적, 금전적 비용이 드는 단점이 있다. SPMS를 사용하면 하나의 계측기에 manifold system을 연결하고, 각 측정 지점까지 sampling tube로 연결하여 측정하는 방식이기 때문에, RTMS와 비교할 때 상대적으로 구축 비용이 저렴하고, 검교정 진행에 드는 노력과 비용이 적은 장점이 있다. 하지만 SPMS는 동일 측정점을 측정하는데 상대적으로 장시간이 소요되고(manifold에 연결하는 전체 측정 점의 개수에 따라 다르지만 일반적으로 1시간 정도 소요), 실제 측정 위치인 tube 말단에서 계측기인 Particle Counter까지 입자를 이동시켜 측정하는 방식으로, 미세입자가

[†]E-mail: sjan2020@chu.ac.kr

sampling tube를 통해 계측기까지 도달하기 전 Transportation loss가 발생하여 측정값에 대한 신뢰도를 떨어뜨리는 큰 단점이 있다. 이러한 loss는 크게 두 가지 원인에 의해 발생하게 되는데, 그 첫 번째는 C/R의 대형화와 그에 따른 측정점 교환방식 시스템의 sampling tube 길이(측정점과 입자계수기 간 거리)의 증가이며, 두 번째는 상대적으로 큰 입자($> 1.0 \mu\text{m}$)를 측정하는 경우이다.[4]

상기 언급한 두 가지 경우 중 첫 번째 문제에 대한 본 질적인 해결책의 일환으로 SPMS를 대신하여 RTMS를 일부 구축, 운영하는 등의 시도가 있었으나, 앞서 언급한 RTMS가 가지고 있는 단점이 그 장점에 비해 현저하게 커서 현재는 C/R 미세입자 모니터링 시스템으로 RTMS는 거의 채택되지 않고 있다. 두 번째 문제를 해결하기 위해 서도 가시화 장치(Particle Visualize System) [5] 등 시각화(Visualization) 방법을 이용한 입자 계수, 낙진 particle 포집을 통한 입자 계수, 대용량 펌프 사용 등[4] 몇몇 방법들이 고안되었으나, system 구축의 난이도 및 주요 공정에 미치는 side effect 등의 문제로 실제 적용은 힘든 것이 현실이다.

이렇듯 실제 제조 현장에서는 SPMS의 한계를 인지함에도 불구하고 대안의 부재로 여전히 측정 효율 저하로 인해 다소 부정확한 측정값을 C/R 청정도 판단의 기준으로 사용하고 있다. 본 연구에서는 디스플레이 등 대형 C/R에서도 적용할 수 있도록 sampling tube 길이를 50m까지 확장하여 실험을 진행하였다. (Particle counter 제조사의 실험 보고서의 경우 1/2 inch tubing at 100 LPM에서 최대 130feet (38m~40m) 정도까지 실험 진행함[7]) 본 연구에서는 이 데이터를 기반으로 상기 SPMS가 가지고 있는 명확한 물리적 한계를 보완할 수 있는 데이터 보정식을 다중 선형회귀 분석법을 이용하여 도출하고자 한다.

이어지는 2장 모니터링 시스템 및 실험에서는 SPMS에 대한 기본 설명 및 데이터를 수집하기 위한 실험 환경, 그리고 수집한 데이터에 대한 내용을 3장 다중선형회귀 분석에서는 2장에서 수집한 데이터를 통해 만든 다중선형회귀 모델 대한 설명 및 분석 결과를 정리하고 마지막 4장 결론에서는 본 연구의 의의 및 제시된 모델을 통해 얻을 수 있는 것들과 추가 연구에 대해 언급할 예정이다.

2. 모니터링 시스템 및 실험

앞서 1장에서 언급한 바와 같이 여기서는 연구의 대상이 되는 SPMS의 구성 및 측정 방식에 대한 소개, 실험 세팅, 그리고 우리가 실험을 통해 얻은 데이터에 대한 1차 분석 내용에 대해 기술할 것이다.

2.1 측정점 교환방식 모니터링 시스템

SPMS 구성은 아래 Fig. 1과 같다. 미세 입자를 측정하기 위한 Particle Counter, 모니터링 시스템의 구성요소인 Manifold와 Manifold Controller, Blower System, 그리고 등속 흡인(Isokinetic Sampling)을 위한 Sampling Tube 및 Probe 등으로 이루어져 있으며, 측정된 입자 계수 정보는 manifold controller를 통해 최종적으로 FMS (FAB or Facility monitoring System)로 보내져 모니터링 및 기록, 저장된다. 이 방식은 전체 시스템의 핵심 구성으로 manifold를 사용하기 때문에 간단히 manifold 방식 모니터링 시스템으로도 많이 불린다. ISO 14644-1[2]등 국제공인 표준 문서상에는 Sampling tube 길이에 대한 특별한 언급이 없다. 하지만 보통의 경우, 앞서 언급한 transportation loss를 줄이기 위해 particle counter 제조사에서는 자체 실험 결과를 바탕으로 1cfm, 3/8 inch 크기의 sampling tube를 사용하는 경우, particle 사이즈에 따른 차이는 있지만, 그 길이를 3m에서 최대 10m 이내로 설치할 것을 권장한다. [4, 6] 하지만 실제 현장의 C/R 환경 모니터링을 위한 FMS system에서는 sampling tube의 길이가 많은 경우에 30m를 넘어가며, 특히 디스플레이를 생산하는 C/R의 경우, 대면적 디스플레이 추세에 따라 설비의 크기도 커지고, C/R 역시 대형화되어 10m 이내로 sampling tube 길이를 제한하기는 거의 불가능한 실정이며, 많은 C/R 현장에서는 측정 포인트들이 30m ~ 50m 정도 까지의 sampling tube로 연결되어 있는 것이 현실이다.

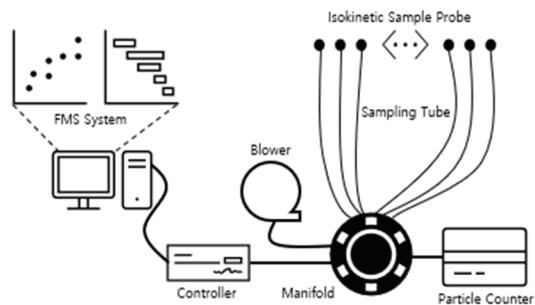


Fig. 1. Sequential Sampling System.

이처럼 미세입자 측정 시 발생하는 sampling tube에 의한 transportation loss는 비단 sampling tube의 길이 뿐만 아니라, 비교적 큰 사이즈의 입자 ($> 1\mu\text{m}$)의 경우 흡인 유량의 부족 및 sampling tube의 꺾임 횟수가 늘어남에 따라 급격히 커진다. 이는 유체내 미세 particle 거동 특성을 고려해 볼 때 어렵지 않게 예측할 수 있다. [6, 7] sampling tube의 곡률 반경이 일정 값 이하일 때 상대적으로 큰 사이즈의 입자는 관성의 법칙에 따라 유선(stream line)을 벗어나 sampling tube 표면에 부착되어 결국 transportation loss율을 높이게 되

는 결과를 가져온다.

본 연구에서는 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해 1 μm 보다 큰 사이즈 입자의 경우는 제외하고 미세입자 모니터링 시스템이 정상적으로 작동하는 1 μm 이하의 입자만을 그 대상으로 하여 아래 3가지 원칙에 따라 실험을 진행하였다.

1. 0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm PSL 사용
2. Sampling tube의 길이 간격을 크게 할 것
3. Sampling tube의 꺾임이 없도록 실험할 것

2.2 실험 구성

본 실험을 위해 Fig.2와 같은 검교정 장비를 활용하였다. 미세입자 표준 시료인 PSL(Poly Styrene Latex)을 사용하여 양쪽 출구(outlet)로부터 동일한 개수의 particle이 나온다는 가정하에, 한쪽 출구는 reference particle counter(Tube length = 0)로 연결하고, 나머지 한쪽은 manifold를 통해 일정한 길이를 갖는 sampling tube에 연결하여 particle counter로 최종 연결하였다.

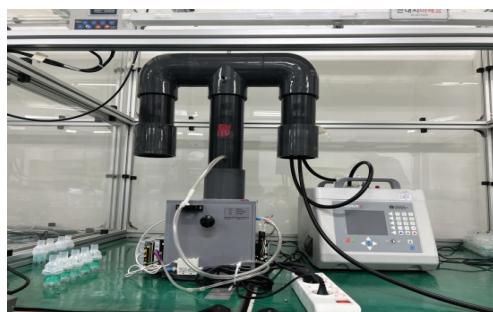


Fig. 2. Particle generator and reference counter.

sampling tube 길이 및 기타 실험 환경은 Table 1과 같다. manifold는 총 32개의 port가 있는데, sampling tube 길이별(5m 간격)로 4개 port씩 연결하여 실험을 진행하였고, 특별히 기존 연구 및 실험에서 최대 길이였던 38m 길이를 추가하였다.[7]

Table 1. Experimental Setting

Item	Split	Explanation
Particle Counter	2	P company, L company
Sampling Tube length (m)	8	10, 15, 20, 25, 30, 35, 38, 40, 45, 50
# of tubes of the same length	4	Manifold 32 ports, Random
PSL type (μm)	3	0.3, 0.5, 1.0

2.3 실험

Sampling tube 길이에 따른 미세입자를 측정하기에 앞서

sampling tube 길이 25m부터 50m까지(5m간격, 38m 추가) flow meter를 사용하여 각 port별 유량을 측정하였다. 그 결과는 아래와 같다. 길이별로 정리했을 때 유량이 가장 큰 25m sampling tube의 경우에 비해 유량이 가장 적은 50m sampling tube의 경우는 74% 수준의 유량을 보임을 확인할 수 있었다.

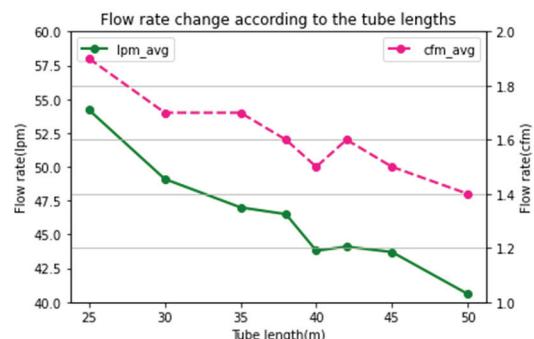


Fig. 3. Flow change according to the sampling tube length.

Fig. 3에는 길이 별 유량 감소를 graph로 표현 하였다. graph를 보면 대체적으로 sampling tube 길이가 증가함에 따라 자연스럽게 측정 포인트에서 유량이 감소함을 볼 수 있으며, 이는 sampling tube 길이가 늘어남에 따라 생기는 transportation loss의 주요 원인 중 하나이다. 상기 실험에 이어 본 실험인 sampling tube 길이에 따른 미세입자 측정 실험을 진행하였다. 실험을 위해 0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm 세 종류의 PSL을 사용하였다. 실험을 통해 얻은 결과로부터 각 상황에 따른 포집 효율을 정리하면 Table 2와 같다. sampling tube의 길이가 길어질수록 reference 대비 포집 효율이 낮아짐을 확인할 수 있다. 다만, 기존 연구 및 실험[7]에서 최대 길이로 설정했던 38m~40m 근처에서 포집 효율 변화의 경향성이 일부 다르게 나옴을 확인할 수 있는데, 이 부분은 수치 모델 등을 통해 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 2. Particle measurement efficiency by tube length for 0.3, 0.5, 1.0 μm particle

Tube(m)	eff_03(%)	eff_05(%)	eff_10(%)
10	90.3	82.5	82.6
15	89.3	82.4	80.5
20	87.9	79.3	76.8
25	88.9	80.5	76.7
30	88.8	76.8	75.9
35	84.8	77.7	76.9
38	85.7	71.6	77.1
40	88.9	73.3	76.4
45	83.4	75.5	74.1
50	82.7	71.4	75.0

Table 2의 결과를 graph로 표현하면 다음과 같다.

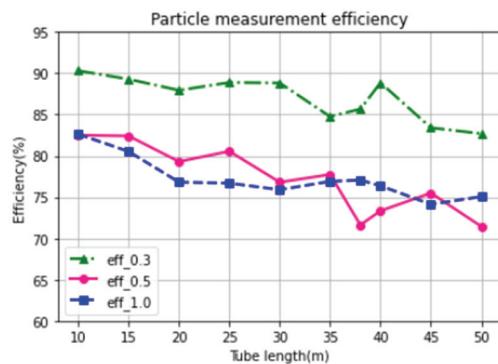


Fig. 4. Particle measurement efficiency (%).

Fig 4.를 통해 sampling tube 길이가 길어짐에 따라 미세입자 포집 효율이 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 포집 효율의 감소가 실제로 sampling tube 내벽의 particle 흡착에 의한 것인지 유량의 감소에 의한 것임은 추가 실험이 필요한 부분이지만 sampling tube 길이가 길어질수록 particle 측정 효율이 떨어지는 것은 자명한 사실이다.

3. 다중선형회귀 분석

3.1 데이터

앞서 2.3절 실험을 통해 우리는 sampling tube 길이가 늘어남에 따라 미세입자 carrier 역할을 하는 유량이 감소함을 확인하였고 (Fig. 3) 동시에 sampling tube를 거쳐 최종적으로 particle counter에서 측정되는 미세입자의 개수 역시 감소함을 확인하였다. (Fig. 4). 이번 3장에서는 2장에서 얻은 실험 데이터를 이용하여 다중선형회귀분석 기법을 적용, sampling tube를 통해 미세입자 측정 시 발생하는 transportation loss를 보정하는 다중회귀모델을 만들고자 한다. 이를 위해 아래 Table 3과 같은 형태의 Dataset을 만들어 사용하였는데, Dataset의 전체 크기는 [1,656×7]이다.

2장 Table 1의 실험 환경에 따라 32개 port를 대상으로 각각 60회씩 측정한 데이터로 전체 1,800개 관측치를 얻었으며, 그 중 기준치 대비 관측치가 100% 넘는 이상값 (Eff_cal > 100) 및 결측값, 중복값 등을 제외하고 최종 1,656개 관측치를 대상으로 하였다. 각 항목의 의미는 Table 4와 같다.

Table 3. Example of measured data(1st row of Dataset)

T_leng_m	Ref_ea	Exp_ea	Eff_cal	P_Size	PSL	LPM
0	10	2967	2897	97.6	0.3	0.3

Table 4. Explanations for Dataset

Item	Explanation
T_leng_m	Sampling tube length (m)
Ref_ea	Reference particle count (length = 0)
Exp_ea	# of particles at the observation point (length <= 50)
Eff_cal	100 × (Exp_ea/Ref_ea) (%)
P_Size	Observed particle size
PSL	Sample particle size
LPM	Average flow along sampling tube length

3.2 다중 선형회귀 분석

실험을 통해 얻어진 데이터로부터 적합한 회귀식을 얻기 위해 다중 선형회귀 모델을 채택하였다. 실험을 통해 얻어진 Dataset 항목은 Table 4.에서 확인할 수 있는 바와 같이 7개로 이루어져 있다. 본 연구에서 수행한 다중선형회귀 분석에서는 다중공선성(multicollinearity) 문제 및 실제 현장에서의 활용성을 최대한 고려하여 7개 항목 중 3개 항목만을 선택하여 다중회귀 모델을 만들었다. Sampling tube 길이(T_leng_m, T), 측정점에서 실측된 미세입자의 개수(Exp_ea, E), 실측된 미세입자의 크기(P_Size, P) 등 3개를 독립 변수로 설정하고, Target값으로는 Sampling tube의 길이가 '0'인 지점에서의 미세입자 개수(Ref_ea, R)로 설정하였다. 추가로 정상 운영중인 C/R에서는 실험 환경과는 달리 미세입자가 수천 개씩 발생하는 경우가 없기 때문에, Exp_ea 항목과 Ref_ea 항목은 회귀 모델을 만들기 전에 각각 1/1,000로 scale 조정을 해 주었다. 또한 회귀모델식 검증을 위해 train데이터와 test데이터를 7:3으로 random 분리하여, train 데이터로 1159개, test 데이터로 497개를 사용하였다. 회귀모델을 만들기 위해 OLS(Ordinary Least Square) 방법을 사용하였으며 이를 Python, Stats model을 이용하여 구현하였다. 그 결과 아래와 같은 회귀식을 얻을 수 있었다.

$$R = -0.1168 + 0.0032T + 1.2169E + 0.0870P \quad (I)$$

아래 Table 5, 6의 회귀 계수, P-value, MSE, R-squared value, conditional number 등의 값을 통해 모델 적합도와 다중공선성 관점에서 상기 식 (I)의 회귀 모델이 적합함을 확인할 수 있다.

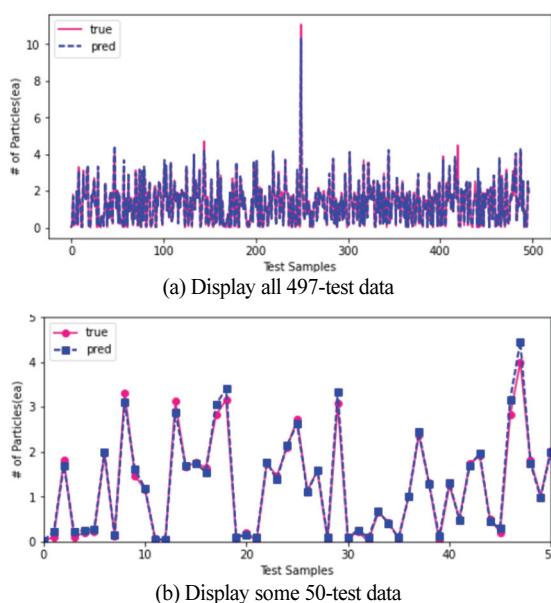
Table 5. Regression coefficients & p-value

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-0.1168	0.019	-6.222	0.000	-0.154	-0.080
T_leng_m	0.0032	0.000	8.243	0.000	0.002	0.004
Exp_ea	1.2169	0.006	206.694	0.000	1.205	1.228
P_Size	0.0870	0.018	4.798	0.000	0.051	0.123

Table 6. Mse & R-squared value

MSE	A. R-squared	R-squared	F-statistic	Cond. No.
0.024	0.976	0.976	1.57e+0.4	164.0

OLS 방법을 이용해 만든 다중 회귀 모델 식 (1)의 검증을 위해 test 데이터를 이용해 구한 예측 값과 실제 값의 차이를 그려보면 Fig. 5와 같다. 전체 497개 test 데이터 중에서 50개만 뽑아서 그린 Fig. 5(b)를 보면, Fig. 5(a)와 마찬가지로 예측 값(pred)과 실제 값(true)이 오차 없이 거의 동일함을 확인할 수 있다.

**Fig. 5.** Validation by using test data (a) 497ea, (b) 50ea.

4. 결 론

본 연구는 두 가지 측면에서 큰 의의를 갖는다. 첫 번째는 최장 sampling tube 길이를 50m까지 설정하여 실제 데이터를 얻은 것이다. C/R과 동일한 상태의 실험 환경을 구축하고, 실제 C/R 환경에서 사용하는 고가의 sampling tube 와 같은 소모품을 사용해야 하기 때문에 공간적, 비용적 관점에서 이러한 실험을 진행하기가 힘든 것이 사실이다. 두 번째는 실제 제조 현장에 바로 적용할 수 있는 다중선

형회귀 모델을 만들어, C/R 관리의 고도화에 기여할 수 있다는 것이다. 본 연구를 통해 만들어낸 모델 Eq. (1)은 단순한 다중 선형 모델로, 실제 현장의 FMS 시스템상에서는 손쉽게 가상센서를 만들어 사용할 수 있고, 이를 통해 기존 SPMS가진 두 가지 단점 중 큰 한계를 별도의 투자 비용 없이 극복할 수 있게 되었다는 것이다. 본 연구에 이어 1/ μm 보다 큰 사이즈 미세입자에 관한 모니터링 고도화 방법에 대한 연구를 계속 진행할 예정이다.[8]

참고문헌

1. Kwang-Min Choi, Ji-Eun Lee, Kwi-Young Cho, Kwan-Sick Kim, Soo-Hun Cho, "Clean Room Structure, Air Conditioning and Contamination Control Systems in the Semiconductor Fabrication Process" J. of The Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, Vol. 25(2), pp. 202-210, 2015.
2. International Organization for Standardization (ISO). ISO 14644-1, Cleanrooms and associate controlled environments-Part 1: classification of air cleanliness. 1999.
3. Seung-Ki Chae, " Particle Measurement and Analysis in Semiconductor Manufacturing Process " J. of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 39(5), pp. 398-404, 1995.
4. PMS, "Airborne Particle Measurements: 100 LPM vs. 1 CFM Particle Counters in a Semiconductor Cleanroom Environment", PMS Application Note 211 (2020).
5. Kim Yong-Shik, Lee Eun-Tack, Yang Gi-Young, "Development and Performance Verification of Sub-micron Particle Visualization System for the Industrial Clean Room " J. of The Architectural institute of Korea Planning & Design, Vol. 22(11), pp. 357-364, 2006.
6. PMS, "An Analysis of Acceptable Particle Losses in Transport Tubing", PMS Application Note 81 (2007).
7. PMS, "Particle Transportation", PMS Application Note 201 (2018).
8. Boo Hun Choi, Tae Han, Kim, " A Study on Particulate Matter Reduction Effects of Vegetation Bio-Filters by Airflow Volume" J. of the Semiconductor & Display Technology, Vol.20(4), pp.89-95, 2021.

접수일: 2022년 1월 21일, 심사일: 2022년 3월 11일,
제재확정일: 2022년 3월 25일