ISSN 1738-8716(Print)
ISSN 2287-8130(Online)
Particle and Aerosol Research
Part. Aerosol Res. Vol. 18, No. 3: September 2022 pp. 61-68
http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2022.18.3.061

# 미세먼지 간이측정기 현장 검사용 시험 입자 발생기 개발 및 성능 평가

**정 혁[1)*] · 박 진 수[2)]**
[1)]에이알티플러스 기업부설연구소
[2)]국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과
(투고 2022년 3월 4일, 수정 2022년 5월 15일, 게재확정 2022년 6월 15일)

# Development and performance evaluation of a test particle generator for a field inspection equipment of PM-2.5 sensors

Hyeok Chung[1)] · Jin-Soo Park[2)]
[1)]*Aerosol Research and Technology Plus (ART+)*
[2)]*Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER)*

## Abstract

In this study, a fluidized bed particle generator was developed to generate an aerosol without supply of compressed air and to increase portability. It was assumed that the mixing ratio of the test particles and beads, the input amount, and the air flow rate supplied to the generator would have effect on the aerosol generation characteristics. The product of these three parameters was set as a characteristic parameter and particle generation characteristics according to the change of the characteristic parameter were observed. As a result, it was confirmed that the input amount of test particles and beads was not suitable as a characteristic parameter and a characteristic parameter expressed as a product of the mass mixing ratio and the air flowrate was newly defined. When the new characteristic parameter is applied, it can be confirmed that the total amount of particles generated from the particle generator is a function of the characteristic parameter. As a result of measuring the amount of particle generation by adjusting the characteristic parameter, it was confirmed that the performance required for the test particle generator for the field inspection equipment of PM-2.5 sensors could be satisfied.

Keywords: aerosol generator, particle generator, fluidized bed, low cost dust sensor

*Corresponding author.
Tel : +82-31-635-4040, Fax : +82-31-635-0094
E-mail : art_rnd@art-plus.co.kr

## 1. 서론

미세먼지 농도 정보는 날씨 정보와 더불어 개인의 일상 생활 패턴에 영향을 미치는 주요 인자로 자리매김하고 있다. 개인 생활 영역에서 미세먼지 농도 정보의 수요가 증가하는 것에 발맞추어 산업계에서는 구조가 비교적 간단한 광산란방식으로 미세먼지의 농도를 측정할 수 있는 센서를 개발하여 공급하였으나 미세먼지 센서에 요구되는 성능 규격 및 제한 사항이 없어 미세먼지 측정 값의 정확도에 대한 우려가 있었다. 이에 미국 환경보호국(US EPA)에서는 형식승인 이외의 미세먼지 측정기를 저가형 미세먼지 센서(low cost dust sensor)라고 명명하고, 2013년도에 저가형 미세먼지 센서에 대한 이해와 올바르게 활용하는 방법을 담은 가이드북을 발간하였다(Air Sensor Guidebook). 우리나라는 2018년 8월에 '미세먼지 관리 및 저감에 대한 특별법'(이하 미세먼지법)을 제정하였고, 형식승인 및 예비형식승인을 받지 아니한 미세먼지 측정기를 미세먼지 간이측정기로 명명함과 동시에 성능 인증을 받은 미세먼지 간이측정기만 제작, 수입 및 판매를 허용하는 내용을 담고 있다. 같은 해 10월 국립환경과학원에서는'초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북(이하 가이드북)'을 발간하였으며 가이드북에서는 미세먼지 간이측정기 원리 및 성능 평가 방법, 성능 범위에 따른 등급을 명시하고 공포하였다. 미세먼지 간이측정기 성능 인증제도는 2019년부터 시행되어 오고 있으며 현재는 성능 인증 받은 미세먼지 간이측정기는 지자체 주도의 스마트시티 사업 및 민간 통신사를 통해 미세먼지 농도 제공 서비스에 활용되고 있다.

미세먼지 간이측정기는 대부분 광산란방식을 채택하고 있으며 반도체 소자의 기술발전으로 형식승인 장비 대비 적은 비용으로 미세먼지의 농도를 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 미세먼지가 광학부 표면에 부착되는 오염이 필연적으로 발생하고 오염정도에 따른 정확도 등의 성능 저하를 유발하게 된다. 또한 미세먼지 농도는 공기를 일정량으로 흡인하여 공기 중에 포함된 미세먼지의 양을 정량화하여 농도로 표시하기 때문에 흡인하는 공기의 양을 일정하게 유지하는 것은 측정 정밀도 유지와 밀접한 관계가 있다. 하지만 저가의 미세먼지 간이측정기는 원가 절감 차원에서 소형 직류팬(DC FAN)등을 이용하고 비교적 간단한 제어시스템을 적용함으로써 사용시간 경과에 따른 흡인 유량의 변화를 초래할 수 있다.

최초의 미세먼지법 및 미세먼지 간이측정기 성능 인증 등에 관한 고시에는 미세먼지 간이측정기 사용연한 및 관리 기준 등이 명시되지 않았으나, 미세먼지 간이측정기의 구조적인 특징으로 인해 발생할 수 있는 문제점을 인식한 국립환경과학원은 2020년 8월 '초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북 개정을 통하여 미세먼지 간이측정기 성능 인증 평가를 마치고 성능인증 등급을 부여받아 실제 현장에 설치하여 운영중인 미세먼지 간이측정기를 대상으로 측정 정확도를 분석하여 부여받은 성능 인증 등급에 해당하는 측정 정확도 범위 내에 있는지 확인하는 것을 목적으로 하는 '미세먼지 간이측정기 점검 방법-현장검사법'을 부록에 명시하였다. 부록 내용의 '미세먼지 간이측정기 성능 점검 장비의 구성품 및 기능' 중 '시험입자 발생기'의 요구 기능은 'ISO 12103-1 A2 Fine Test Dust 혹은 동등 이상의 규격을 만족하는 물질을 발생시켜 현장 점검 장비에 공급하며, 1분~10분 동안 미세먼지 평균 농도 50μg/m$^3$ ±5μg/m$^3$, 11분~20분 동안 미세먼지 평균 농도 25μg/m$^3$±5μg/m$^3$를 발생시킬 수 있는 구조여야 한다.'으로 명시하고 있다. 부록에는 입자 발생 농도의 평균을 구하는 산술식을 포함하고 있으며, 시험 시간 구간에서의 발생된 시험 입자 농도의 적분을 통해 평균을 구하도록 명시하고 있다. 또한 현장 검사가 용이하도록 휴대성을 강조하고 있다. 본 연구에서는 일정 시간 동안 발생한 시험 입자의 누적 평균의 재현성을 확보할 수 있고 휴대성을 확보할 수 있는 소형의 입자 발생 장치를 개발하여 미세먼지 간이측정기 현장 검사 장비의 구성품으로 적용 가능성을 검토하였다.

두 가지 목적을 달성하기 위한 방법으로 유동층(fluidized bed)방식의 입자 발생기를 소형화하여 개발하였다. 유동층 방식의 입자 발생기는 서브마이크로미터(submicrometer) 범위의 벌크 에어로졸(bulk aerosol)을 정량적으로 발생시킬 수 있다고 보고되었으며(Boucher and Lua, 1982), 분진 형태의 서브마이크로미터 입자의 발생을 위한 유동층 방식의

에어로졸 발생기를 개발하고 특성을 분석한 연구 결과가 있다(Anthony et al, 2000). 또한 기존 유동층 에어로졸 발생기의 제작 비용을 절감시키고 소형화를 위해 3D 프린터 기술을 이용하여 저비용·소형의 유동층 방식의 분진 발생기를 개발한 결과가 있다(Michael et al. 2017). 본 연구에서는 선행 연구를 바탕으로 유동층 방식의 입자 발생기를 개발하였고 입자 발생량에 영향을 미치는 인자들을 통합하여 하나의 특성 변수를 도출하고자 하였으며, 단일 특성 변수로 입자 발생량 제어가 가능한지 살펴보았다.

## 2. 실험장치

### 2.1 유동층 시험 입자 발생기

본 연구에서 개발한 유동층 시험 입자 발생기의 모식도는 Fig.1과 같다. 공급된 공기는 HEPA필터를 거쳐 입자가 제거된 상태로 비즈(beads)와 입자가 혼합되어 있는 공간으로 유입된다. 비즈와 입자의 혼합물은 유입된 공기의 압력과 유량에 대응하는 버블링(bubbling)이 발생하며, 버블링된 비즈와 입자 중 비즈는 중력에 의해 침강하고 입자만 공기에 부유되어 발생기 외부로 배출된다. 비즈와 입자 혼합물은 625메쉬(20㎛) 위에 놓이며 유동층을 위한 공간은 지름 15mm, 높이 41mm인 원통형으로 설계하였고, 비즈와 마찰로 인한 마모를 방지하기 위해서 전해연마(eletro-polishing)된 스테인리스 스틸을 사용하였다. 원통을 제외한 나머지 기구부는 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC) 재질로 제작하였다. 공기의 유입은 크기가 40mm×40mm(가로, 세로)인 직류 12V 팬(DC 12V FAN)을 사용하였으며 유량 조절은 모터 회전수 제어 방식의 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM) 제어를 적용하였다.

본 연구에서 사용한 비즈는 평균 입경 100㎛, 표준편차가±20㎛인 지르코니아(ZrO2, Yttria Stabilized Zirconia) 비즈로 밀도는 6.04g/cm$^3$, 겉보기 밀도(bulk density)는 3.70g/m$^3$ 이다. 시험 입자로 사용한 ISO 12103-1 A2 fine dust의 밀도는 2.65g/cm$^3$, 겉보기 밀도는 0.9g/cm$^3$로 비즈 대비 밀도는 약 44%, 겉보기 밀도는 약 24% 정도이다.

### 2.2 실험 장치 및 구성

유동층 방식 시험 입자 발생기의 성능 시험을 위한 실험 장치 개략도는 Fig.1 (b)과 같다. 2.1의 시험 입자 발생기에서 발생한 에어로졸은 PM2.5(TSI社) 임팩터 및 에어로졸 공급관을 거쳐 덕트 내부로 유입된다. 덕트의 상류에는 시험 공기를 유입하기 위한 직류 12V 팬이 장착되어 있으며 유량 조절은

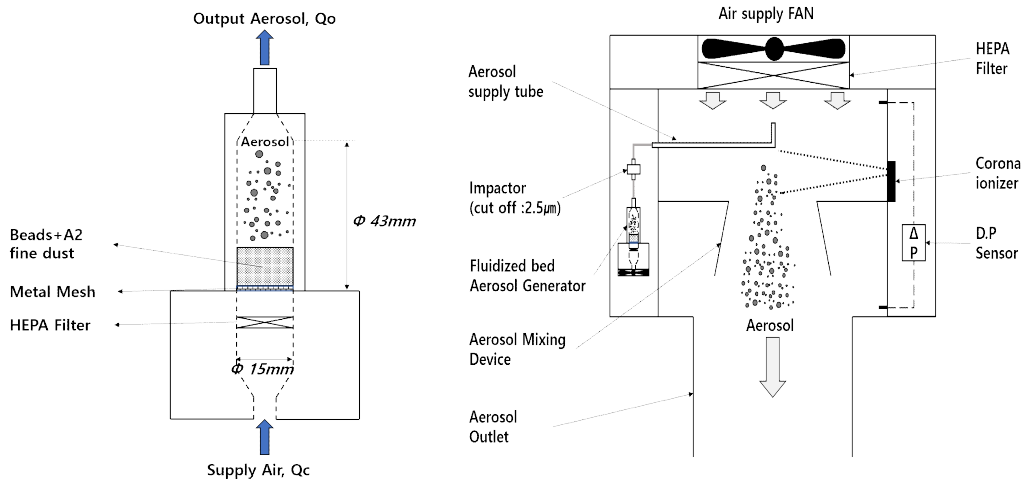



Figure 1 Schematic diagram of the fluidized bed test particle generator(a) and the experimental setup(b)

PWM 방식으로 제어하였다. 팬에 의해서 유입된 시험 공기는 HEPA필터를 거치면서 입자가 제거되어 장비 내부로 유입된다. 시험 입자 발생기에서 유입된 시험 에어로졸은 시험 공기의 방향과 반대 방향(counter flow)으로 유입되고, 입자의 정전기를 제거하기 위한 목적으로 장비 한쪽 면에서 장비 내부 방향으로 양극성의 이온을 주입시킬 수 있는 이오나이저(SIMCO社, ionONE)를 장착하였다. 시험 입자는 에어로졸 믹싱장치로 유입되면서 시험공기와 균질하게 섞이고 에어로졸 토출구를 통해 배출된다. 장비 내부의 상부와 하부에는 차압(difference pressure)을 측정할 수 있는 포트(port)를 설치하여 전체 시험 유량을 모니터링하고 시험 공기 유량을 제어하여 토출구의 유속을 일정하게 하였다.

유동층 시험 입자 발생기의 발생 특성 실험은 상온, 상습, 상압 조건에서 수행하였고, 발생기에 투입되는 시험입자 및 비즈 혼합물 시료는 매 실험마다 새로운 시료로 교체하였다.

### 2.3 유동층 입자 발생기의 특성 변수

본 연구에서는 입자 발생 농도량과 패턴에 영향을 미치는 변수들을 통합한 새로운 지표를 사용하고자 하였다. 시험입자와 비즈의 혼합비(m/M, m은 시험입자의 질량, M은 비즈의 질량)와 시험입자 및 비즈 혼합물이 입자 발생기 내부 원통에서 차지하는 부피비(v/V, v는 시험입자+비즈 혼합물의 부피, V는 지름 15mm, 높이 43mm 원통의 부피), 시험 입자 발생기의 공급 유량 $Q_c$ 곱으로 식 (1)과 같이 표현하였으며 유동층 시험입자 발생기의 특성 변수(Characteristic Parameter)로 지정하여 사용하였다.

$$C.P = \frac{v}{V} \times \frac{m}{M} \times Q_c \quad (1)$$

식 (1) 계산식에 의하면 특성 변수의 단위는 유량 단위(단위 시간당 부피)가 되며 본 연구에서의 특성 변수는 유량 단위를 사용하였다.

설정한 3개의 각 변수 별 입자 발생량 추이 분석을 통하여 독립적으로 작용하는 변수를 파악한 후, 해당 인자가 제외된 새로운 특성 변수를 도출하였다

## 3. 실험결과

### 3.1 배경 농도 측정

시험 입자 발생기에서 발생되는 순수 시험 입자를 제외한 입자 농도 파악을 위한 실험을 진행하였다. 먼저 시험 입자 발생기는 작동시키지 않은 상태에서 실험 장치의 토출구에서 질량 농도를 측정하였다. 입자 질량 농도의 측정은 미국 EPA Class III을 획득한 Teledyne API社의 T640 모델을 사용하였고, 장비에서 표출하는 PM2.5 질량 농도 값을 측정 값으로 하였다. 20분간 시험 입자 발생기를 배제한 실험 장치 내부 입자 질량 농도의 측정을 진행한 후, 시험 입자 발생기에 비즈만 주입시킨 상태로 작동시켜 20분간 장비에서 발생한 입자의 질량 농도를 측정하였다. 입자의 질량 농도 측정은 실험 장치의 토출구에 샘플링 관을 삽입시켜 측정하였으며, 총 3회 반복 진행하였고 그 결과는 Table.1에서 확인할 수 있다.

비즈만 적용하였을 때의 특성 변수는 식 (1)에서

Table.1 Comparison data of mass concentration of the test particle generator with beads only operation and none of test particle generator operation

| Average mass concentration for 20 minutes (μg/m³) | | |
|---|---|---|
| | No test particle generator operation | Test particle generator operation with beads only |
| 1st test | 0.6 | 0.80 |
| 2nd test | 0.5 | 0.72 |
| 3rd test | 0.6 | 0.73 |
| avg. value | 0.57 | 0.75 |

시험입자와 비즈의 혼합비는 제외시키고, 비즈와 발생기 내부 부피비와 발생기 공급 유량의 곱을 0.285(LPM)으로 설정하여 시험 입자 발생기를 작동시켰다. 장비 전체의 시험 유량은 분당 360리터가 되도록 설정하였으며, 이 유량은 실험장치 토출구에서의 유속 0.5m/s에 상응하는 유량이다.

시험 입자 발생기의 작동을 하지 않은 상태에서 측정한 장비의 배경 농도는 3회 평균 0.57μg/m$^3$ 였으며, 시험 입자 발생기에 비즈만 삽입하여 작동시켰을 때 3회 평균 농도는 0.75μg/m$^3$ 로 나타났다. 비즈에 의해 발생되는 입자의 발생 질량 농도가 미세먼지 간이측정기 현장 검사법에서 명시한 시험 농도 50μg/m$^3$ 및 25μg/m$^3$ 대비 각각 0.36%, 0.72% 수준으로 시험결과에 미치는 영향은 매우 미미하다고 할 수 있다.

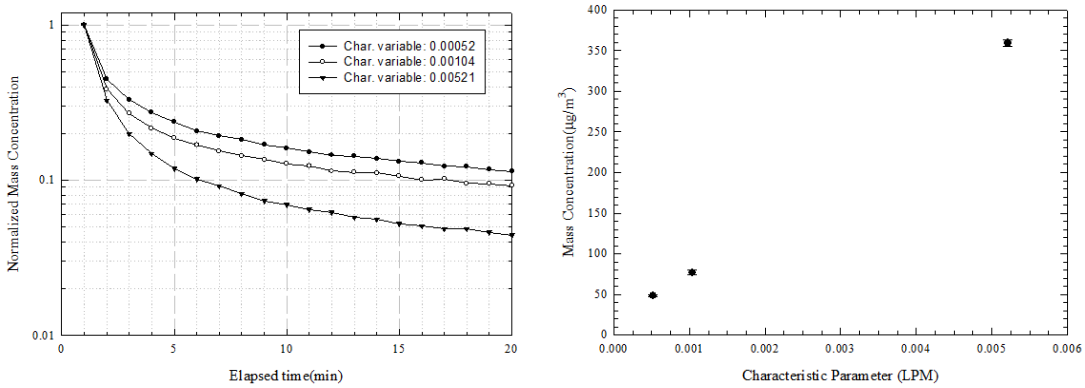
### 3.2 시험입자와 비즈의 질량비율에 따른 시험 입자 발생 특성

시험 입자 발생기의 유입유량, 혼합시료의 부피비는 고정시키고 시료의 질량 비율을 변경시키면서 장비에서 발생하는 입자 농도의 시간 추이를 관찰하였다. Fig.2는 특성 변수 변화에 따른 시험 입자 발생 농도의 시간 추이 및 특성 변수 변화에 따른 20분 동안 발생된 입자의 평균 농도를 파악하고자 하였다.

시험 입자의 질량 대 비즈의 질량 비율이 높아질수록 특성 변수의 값은 증가하며, 특성 변수의 값이 증가할수록 유동층 시험 입자 발생기에서 발생된 전체 입자 농도는 증가하고 있음을 Fig.2 (b)에서 확인할 수 있다. 하지만 Fig.2 (a)에서 살펴보면 시험 입자의 질량 비율이 높아질수록 입자 발생 농도의 감소 기울기는 증가하는 결과를 얻었다. 다시 말해 시간당 시험 입자의 농도 감소 비율이 커짐을 확인할 수 있었다. Anthony et al.(2000)의 실험 결과에서는 시간이 경과함에 따라 초기 농도의 10% 수준으로 수렴하고 있다고 보고하였는데, 본 연구 결과에서 시험입자의 질량 비율이 상대적으로 낮을 때 선행 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있으나 시험입자의 질량 비율이 커질수록 초기 농도의 10% 이하로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

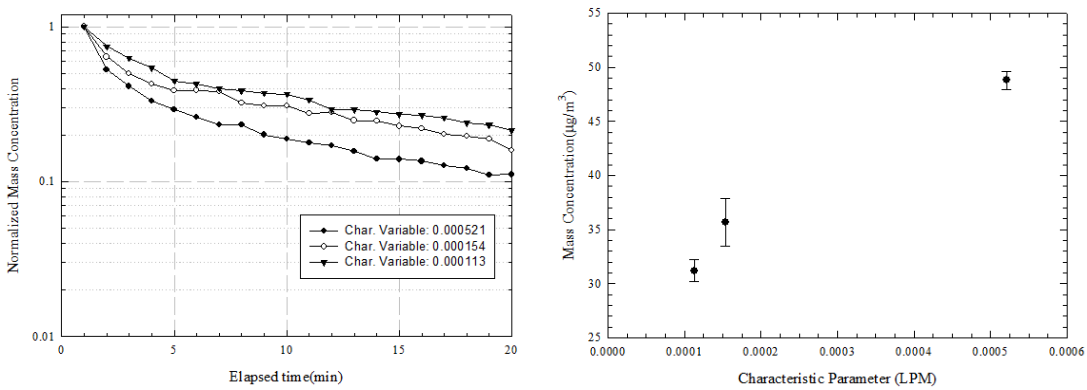
### 3.3 시험 입자 발생기의 공급 유량 변화에 따른 시험 입자 발생 농도 특성

시험 입자 발생기의 공급 유량의 증가는 시험 입자 발생 농도를 증가시킬 것으로 예상되나 시험 입자 발생 농도의 단위 시간당 감소하는 비율은 파악할 필요가 있다. 따라서 본 실험은 시험입자 대 비즈의 질량 비율 및 시료 혼합물 대 발생기 내부 부피비율은 고정시키고, 시험 입자 발생기로 공급하는 유량을 변화시키면서 실험 장치 토출구에서의 입자의 질량 농도의 특성을 관찰하여 Fig.3에 실험 결과를 나타냈다. 시험 입자 발생기에 공급하는 유량이 증가할수록 특성변수의 값은 큰 값을




(a) (b)

Figure 2 Characteristics of the test particle generator according to the mass mixing ratio: (a) normalization of the particle mass concentration over time, (b) the average mass concentration according to the characteristic parameter



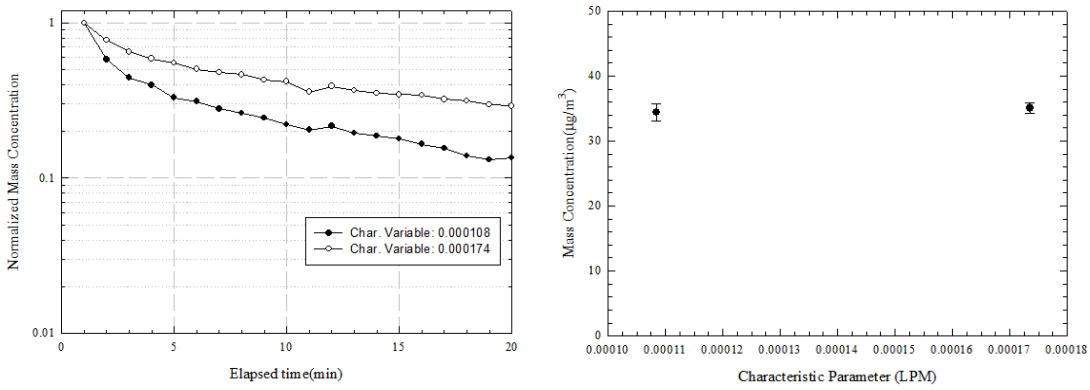

(a) (b)

Figure 3 Characteristics of particle generation according to the supply air flowrate of fluidized bed test particle generator: (a) normalization of the aerosol generation concentration over time, (b) the average mass concentration according to the characteristic variable

나타내며 Fig.3 (a)의 결과에서 특성변수의 값이 클수록 시험 입자의 질량 농도는 시간에 따라 상대적으로 빠르게 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 장비에서 발생하는 시험 입자의 총 질량 농도의 평균 값은 공급 유량이 증가할수록 증가하는 결과를 얻었다(Fig.3 (b)). 이와 같은 결과는 시험입자의 질량 농도의 비율 변화에 따른 장비 특성과 유사한 결과를 나타내는데, 특성변수의 값이 증가할수록 발생되는 시험 입자의 절대량은 증가하나, 발생 농도는 시간에 따라 빠르게 감소하는 특성을 알 수 있다.

### 3.4 시료 혼합물의 시험 입자 발생기 내부 체적비 변화에 따른 시험 입자 발생 특성

유동층 방식의 입자 발생은 시료가 발생시키는 차압과 유동층에 공급되는 유량에 따라 버블링되는 시점과 버블링 양상이 변화한다(J.I Córcoles et al.(2021)). 본 연구에서 개발한 시험 입자 발생 장치에 투입하는 시료의 양을 결정하기 위하여 시료 혼합물의 투입량을 변화시키면서 장비에서 발생하는 시험 입자 농도 특성을 파악해보았다. 시료 혼합물의 공급량을 증가할수록 특성변수는 큰 값을 나타내며 시료 혼합물의 변화에 따른 시험 입자 발생 특성 결과를 Fig.4에서 볼 수 있다. 특성변수




(a) (b)

Figure 4 Characteristics of particle generation of the test particle generator according to the particle and beads mixture volume ratio to generator inner volume: (a) normalization of the particle mass concentration over time, (b) the average mass concentration according to the characteristic parameter

의 값이 증가할수록 입자 발생 농도의 시간 변화율은 작게 나타나는 결과를 얻었으며(Fig.4 (a)), 시험 시간 동안 발생된 입자의 농도는 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 있었다(Fig.4 (b)). 시료 혼합물의 투입량이 많아질수록 초기 농도는 낮고 시간당 감소율도 낮아지면서 결과적으로 발생된 입자의 총 농도가 비슷해지는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 시험 입자 발생기에 공급되는 유량이 동일한 경우, 시료 혼합물의 투입량이 많아질수록 유동층의 버블링 강도가 낮아지고, 투입된 시료 혼합물 내부의 시험 입자의 질량의 절대량은 상대적으로 많아 시간경과에 따른 시료혼합물 내부에 잔류하는 시험 입자의 감소가 천천히 진행되어 시간당 발생하는 시험 입자의 농도 감소율이 낮게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

### 3.5 특성변수 재정의

시험입자와 비즈의 혼합비, 발생기에 공급되는 공기유량, 시료혼합물의 투입량 변화에 따른 입자 발생특성 분석 결과, 시험입자와 비즈의 혼합비 및 발생기 공급 유량에 따른 입자 발생량의 선형을 관찰할 수 있었으나, 시료혼합물의 투입량에 따른 입자 발생 총량은 변하지 않은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 초기 설정한 특성 변수에서 시료혼합물의 부피비율을 제외하고 특성변수를 재정의하면 식(2)와 같다.

$$C.P = \frac{m}{M} \times Q_c \tag{2}$$

재정의된 특성 변수를 적용하고 Fig 2(b), Fig 3(b)를 통합하면 Fig 5와 같다. 새롭게 정의된 특성변수에 따른 입자 발생량의 선형성이 높은 것을 확인할 수 있다.

### 3.6 미세먼지 간이측정기 현장 검사 장비의 시험 입자 발생기로의 적용 검토

미세먼지 간이측정기 현장 검사 장비의 시험 입자 발생기에 적용 가능성을 검토하기 위하여 실험을 수행하였다. 식(2)로 재정의된 특성변수의 값을 조절하면서 발생 시작부서 10분 동안 1분 간격으로 측정된 질량 농도의 10분 평균값과 발생 시작 후 11분부터 20분까지의 10분 동안 측정된 질량 농도의 평균값이 미세먼지 간이측정기 시험 입자 발생기의 요구사항을 만족하는지에 대한 여부를 확인하였다. 반복실험을 통하여 특성변수를 0.000612lpm으로 설정하였을 때, 가장 만족한 결과를 얻을 수 있었다. 도출된 특성 변수를 적용하여 5회 반복 시험을 진행한 결과 시험 입자의 발생 시작부터 10분 동안 발생된 시험 입자 질량 농도의 5회 평균은 48.9μg/m$^3$이며

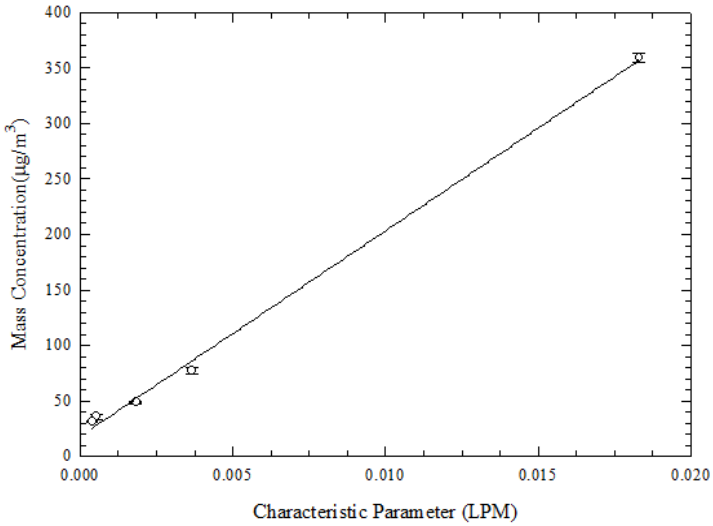



Figure 5 Function of the particle mass concentration generated from the test particle generator on new characteristic parameter

표준편차는 ±2.12으로 나타났으며, 11~20분 구간의 5회 평균 질량 농도와 표준편차는 각각 27.4μg/$m^3$, ±1.72로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 유동층 방식의 시험 입자 발생기를 개발하였고 성능을 평가하였다. 유동층 에어로졸 발생 방식의 특성을 파악하기 위해서 시험입자와 비즈의 질량 혼합비율, 발생기에 공급되는 공기 유량, 발생기에 투입하는 시료의 양을 변수로 설정하고, 3가지 변수의 곱으로 표현되는 특성변수를 이용하여 실험 조건으로 사용하였다. 초기 설정한 특성 변수의 인자 중에서 시료 투입량을 제외하여 특성 변수를 적용하면 단일 변수로 시험 입자 발생기의 입자 발생량 특성을 표현할 수 있었다. 초미세먼지 간이측정기 가이드북에서 명시하고 있는 미세먼지 간이측정기 현장 검사 장비의 시험입자 발생기의 요구 사항을 만족할 수 있는 특성 변수를 도출하였고 반복 실험을 통하여 입자 발생 농도의 재현성을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 유동층 방식의 시험 입자 발생기는 미세먼지 간이측정기의 현장 검사 장비의 시험 입자 발생기로 적용 가능할 수 있을 것으로 보인다.

## References

국립환경과학원고시 제2019-24호, 미세먼지 간이측정기 성능인증 등에 관한 고시

국립환경과학원 (2020), 초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북, 부록, 23-30

R.F.Boucher and Chong Lua (1982). A stable, high-concentration, dry aerosol generator, Journal of Aerosol Science, 13(6), 499-511

Michael Roesch, Carolin Roesch, and Daniel J. Cziczo (2017), Dry particle generation with a 3-D printed fluidized bed generator, Atmospheric Measurement Techniques, 10(6), 1999-2007

Anthony J. Prenni , Ronald L. Siefert , Timothy B. Onasch, Margaret A. Tolbert and Paul J. Demott (2000), Design and Characterization of a Fluidized Bed Aerosol Generator: A Source for Dry, Submicrometer Aerosol, Aerosol Science and Technology, 32, 465-481

J.I. Corcoles, A. Acosta-Iborra, J.A. Almendros-Ibanez and C. Sobrino (2021), Numerical simulation of a 3-D gas-solid fluidized bed: Comparison of TFM and CPFD numerical approaches and experimental validation, Advanced Powder Technology, 32, 3689-3705