대기 습도가 광 산란 미세먼지 측정에 미치는 영향

Effect of Atmospheric Humidity on Fine Dust Measurement Using the Light Scattering Method

이창호* · 오성남**

Lee, Chang Ho*, and Oh, Sung Nam**

Abstract

The interest in fine dust has greatly increased. Therefore, sensors and devices for measuring the concentration of fine dust have been developed and are being used. For example, the distribution of light scattering measuring sensors has increased the use of self-measurement to manufacture and measure fine dust detectors. However, fine dust detectors that use light scattering are extremely sensitive to humidity; there is a highly sensitive component that recognizes water vapor in the air as fine dust. Therefore, the purpose of this study is to quantitatively understand the influence of atmospheric humidity on the concentration of fine dust and to use this understanding to correct measured values. In this study, we investigated the correlation between fine dust concentration and relative humidity measured by a fine dust sensor using the light scattering method. As a result, relative humidity and fine dust concentration exhibited a high positive correlation. The same trend was also observed when the humidity either increased or decreased.

Key words : Particulate Matter, PM2.5, PM10, Relative Humidity, Light Scattering, PM Sensor

요 지

미세먼지에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 따라서 미세먼지의 농도를 측정하는 센서와 이를 접목한 다양한 측정기기가 개발되어 사용되고 있다. 대표적인 사례로서 광산란 방법의 측정센서가 유통됨에 따라 미세먼지 측정기를 직접 제작하여 측정하는 자가측정이 증가하고 있다. 그러나 광산란에 의한 미세먼지 측정기는 대기의 습도에 매우 민감하여 공기 중의 수증기를 미세먼지로 인식하는 취약한 부분이 있다. 따라서 대기의 습도가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여 측정값의 보정에 활용하고자 한다. 본 연구에서는 광산란 방법에 의한 미세먼지 측정센서로 부터 측정된 미세먼지 농도와 상대습도와의 상관성을 조사하였다. 그 결과 상대습도와 미세먼지 농도는 높은 양의 상관관계를 나타내었다. 또한 습도가 증가하거나 감소할 때도 같은 추이를 나타내었다.

핵심용어 : 미세먼지, PM2.5, PM10, 상대습도, 광산란, PM측정센서

1. 서 론

대기의 미세먼지(Ambient Particle Matter, PM)는 일반적으로 직경이 2.5 μm 이하인 PM2.5와 10 μm 이하인 PM10으로 구분한다. 이들 중 인간의 호흡기에 대한 침투성이 높고 유해한 화학적 성분을 포함하고 있어 인간과 생태계에 영향

을 미치는 PM2.5에 관심이 집중되고 있다. 특히 인간활동으로부터 비롯되는 도시 및 산업지역에서 발생되어 장거리 이동되는 미세먼지는 주로 PM2.5 이하로서 지구적 규모로 볼 때 그 농도가 크게 증가하고 있어 이에 대한 대비가 요구되고 있다(WHO, 2005).

미세먼지 농도 측정 방법에는 크게 중량법, 베타선법 및

*정회원, 숭실대학교 재난안전관리학과 박사과정(E-mail: winddoorslee@gmail.com)

Member, Ph.D Candidate, Department of Disaster Safety Management, Soongsil University

**교신저자, 정회원, 숭실대학교 재난안전관리학과 교수(Tel: +82-2-828-7363, Fax: +82-2-828-7363, E-mail: mateo0319@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Disaster Safety Management, Soongsil University

광산란법이 있으며, ‘대기환경보전법 대기오염공정시험기준’에서는 대기 중 PM (PM_{2.5}, PM₁₀) 측정방법으로 중량농도법과 베타선법을 적용하고 있으나(ME, 2019), ‘미세먼지 관리 및 저감에 관한 특별법’에 따른 ‘미세먼지 간이측정기의 성능인증제도’를 도입하게 되면서 실질적으로 광산란법과 같은 PM농도 측정 방식을 인정하며 선호하고 있다(NIER, 2018).

Kim et al. (2009)은 베타선법과 광산란법의 비교측정 연구에서 베타선법보다 측정오류가 더 낮은 광산란법 측정 시스템의 효율성을 강조하였다. 광산란 현상에 의한 이론적 연구는 오래 전부터 많이 해오고 있으며, 재료분석 및 평가, 의료연구, 대기현상, 위성관측, 계측기 등 다양한 분야에서 널리 적용되고 있다(Kim, 2012).

대기의 미세입자에 의한 광산란현상이 습도(Humidity)와 상관성이 있음은 많은 연구자들에 의하여 지적되어 왔다. Bae et al. (2014)은 심각한 대기환경적인 문제에 실시간 측정이 가능하면서도 경제적인 광산란법 PM감지기를 제작하여 사용함으로써 그 우수성을 강조한 바 있다.

Oh and Cho (1975)는 “서울의 대기혼탁도의 경년 및 계절변화”를 조사한 직달일사량 분석에서 미세먼지에 의한 대기혼탁도의 월별변화가 하절기에 가장 높고 동절기에 낮게 나타났음을 밝힌 바 있다. 이 경우 하절기에는 대기의 습도가 높아 상대적으로 대기혼탁도가 높게 나타났다. 또한 Oh (1980)는 적외선 대기창역에서의 광 투과율에 관한 연구에서 파장이 8.0~12.0 μm 인 적외선의 야간 투과도가 주간 경우보다 낮게 나타난 이유는 야간의 복사 안개의 영향이 그 원인이라고 하였다.

Hong et al. (2014)은 비산먼지의 측정을 위해 베타선법과 광산란법의 측정결과를 비교분석한 결과, 실시간 광산란법으로 측정하여 미세먼지 농도가 상대습도에 의한 영향이 있다는 것을 밝힌 바 있다. 또한 Cheng et al. (2015)은 겨울철에 중국 북경에서 PM_{2.5}의 일별, 시간별 농도 변동이 대기의 습도장 변동과 일치함을 보인 바 있다. Zhang et al. (2017)은 2013년 6월부터 2016년 3월까지 베이징, 시안, 상하이, 광저우 등에서 중국국립환경모니터링센터(China National Environment Monitoring Centre, CNEMC)와 중국대기관측소가 기록한 시간별 대기 입자상 물질 농도와 기상요소와의 상관성을 조사한 연구에서, 상대습도의 변동은 PM_{2.5} 농도의 증가와 높은 상관관계가 있음을 밝혔다. Lou et al. (2017)은 상대습도와 미세먼지 농도 사이의 연관성을 동일한 단계에 대한 크기의 통계적 방법을 사용하여 조사한 바, 상대습도의 구간에 따라 규칙성을 발견하고 PM과 상대습도의 밀접한 상관관계가 있음을 밝혔다.

Lundgren and Cooper (1969)는 광산란 측정기기의 미세먼지 측정에 상대습도를 고려해야 함을 주장하면서 자연적으로 발생하는 에어로졸에 의한 산란광은 에어로졸의 물리적 특성에 따라 다르므로 습도에 따라 증가할 수 있음을 밝힌

바 있다. Di Antonio et al. (2018)은 이러한 상대습도의 영향을 보정하기 위해 기존 장비는 일반적으로 측정 전에 입자에서 수분을 제거하는 건조 시스템을 갖추고 있으나, 많은 저비용 광산란법 PM측정 센서는 이러한 건조 과정을 포함하지 않기 때문에 주위 대기의 습도가 높을 때 입자 크기가 과대 평가되어 PM농도가 높게 나타날 수 있음을 지적하였다. Huang and Tai (2008)는 상대습도가 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 조사한 결과 모니터링을 위한 적절한 범위에서 상대습도의 한계값을 유지하는 것이 중요하다고 강조하였다. Crilley et al. (2018)은 높은 상대습도 효과를 설명하기 위해 PM농도에 적용되는 상대습도 의존 보정계수를 제안했는데, 대기입자를 모니터링하기 위해 광학입자계수기인 Alphasense사의 광산란법 PM측정센서를 평가하면서 K-Köhler 이론을 기반으로 하는 보정계수를 개발하였다. 이 결과에서 Alphasense사의 소형 광산란법 PM측정센서를 사용하였지만, 이 알고리즘은 센서 유형에 관계없이 모두 적용할 수 있다고 주장하였다.

본 연구에서는 보편적으로 사용되는 있는 광산란에 의한 미세먼지 측정기 중에서 대표적으로 사용되고 있는 SDS011 sensor (Nova Fitness Co., Ltd.)로 부터 PM농도를 측정하였다. 여기서, 입자의 외형 모드는 Crilley et al. (2018)의 가정에 따라 구형체로서 균일한 모양과 밀도로 가정하였다. 또한, 센서의 입자계수기가 PM질량보다는 입자 크기 분포에 기반한 보정이 필요하다고 주장한 Di Antonio et al. (2018)의 가정을 따른다.

따라서 본 연구는 미세먼지의 측정에서 PM농도에 가장 영향이 높다고 판단되는 대기습도와 상관성을 조사하고 특히 인간 활동에 직접적인 영향을 받는 실내환경을 조사의 배경으로 택하였다. Hong et al. (2014)은 다양한 범위의 상대습도와 인위적 가열에 의한 기온을 조절함으로써 PM농도가 어떻게 변화하는지에 대한 추후 연구가 필요할 것이라고 하였다. 그러나 본 연구에서는 습도를 조절하는 방법으로 기온을 변화시키는 방법 대신, 대기의 수분량 조절에 따른 습도를 변화시키기 위하여 가습기를 사용하여 주위 습도를 조절하였다.

PM농도의 상대습도와의 상관성을 분석하기 위한 본 연구 조사에서는 지금까지 대부분 연구에서 PM농도의 변화요인에 대하여 다양한 옥외환경에서 조사를 수행한 반면, 본 연구는 측정 주위환경의 물리적 특성이 일정 수준에서 변화가 크지 않을 것으로 판단되는 실내환경을 택하였다.

2. 측 정

2.1 측정 환경

실내환경에서 측정된 미세먼지 농도와 대기의 습도와 상관성을 파악하기 위한 PM농도 및 기상요소 측정은 37.8 m^3 (3.6 m $\times$ 4.2 m $\times$ 2.5 m)의 실내 공간 내에서 수행되었다.

Fig. 1. Measuring Sensors for PM (PM2.5, PM10) Concentrations (a) and for Meteorological Parameters (b) and Detailed View of PM Sensor (c)

본 연구에서는 주위 대기환경의 상대습도 변동을 조절하기 위하여 가습기를 사용하였고, 이후 대기 중 수분의 증발 등으로 자연적 소멸과정을 거치면서 일정시간 후 초기 상태로 환원되는 과정에 따른 미세먼지 농도를 분석하였다.

2.2 PM(PM2.5, PM10)농도 측정기기

본 연구에서는 PM농도를 측정하기 위해 중국 Nova Fitness Co., Ltd.에서 개발된 광산란형 에어로졸 및 미세먼지 측정 PM센서 SDS011(Figs. 1(a), (c))을 사용하였다. 이 센서는 레이저 광산란 현상을 사용하여 공기 중 0.3~10 μm 사이의 입자 농도를 측정할 수 있으며, 입자 크기별 농도(수농도)를 측정하는 기기로서 상세한 기술적인 사양은 Table 1과 같다.

2.3 기상요소(RH, AT) 측정기기

본 연구에서 측정된 기상요소는 상대습도(Relative Humidity, RH)와 기온(Air Temperature, AT)만을 택하였다. 측정 기간 동안 기온은 일정값을 유지하였다. 이들 측정은 중국 Aosong Electronics Co., Ltd.의 Digital-Output Relative Humidity & Temperature Sensor/Module DHT22(Fig. 1(b))를 사용하였고 상세한 기술적인 사양은 Table 2와 같다.

2.4 가습기

가습기(DP-7700UH, Table 3)는 초음파(고주파+진동)를 이용하여 물 입자를 분해하고 차가운 수증기를 발생시켜 적당한 습도를 유지할 수 있도록 하는 장치로써, 본 연구에서는 기온을 일정하게 두고 습도를 조절하기 위해 사용되었으며 상세한 기술적인 사양은 Table 3과 같다.

Table 1. Technical Specification of SDS011 Sensor (Nova Fitness Co., Ltd., 2015)

Item	Parameter	Note
Measurement Parameters	PM2.5, PM10	Number Density ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Range	0.0-999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Rated Voltage	5V	
Rated Current	70mA $\pm$ 10mA	
Temperature Range	-20~60 $^{\circ}\text{C}$	
Humidity Range	Max 90%	
Air Pressure	86KPa~110KPa	
Corresponding Time	1s	
Serial Data Output Frequency	1Hz	
Limitation of Particle size	0.3 μm ~ 10 μm	
Counting yield	98%	0.5 μm
Relative error	$\pm 15\%$ and $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $^{\circ}\text{C}$, 50%RH
Product size	71 $\times$ 70 $\times$ 23 (mm)	

Table 2. Technical Specifications of Digital-Output AT & RH Sensor/Module DHT22 (Aosong Electronics Co., Ltd., 2015)

Item	Parameter	Note
Power supply	3.3-6VDC	
Output signal	Digital Signal via Single-bus	
Sensing element	Polymer capacitor	
Operating range (Humidity)	0-100%RH	
Operating range (Temperature)	-40~80℃	
Accuracy (Humidity)	±2%RH	Max ±5%
Accuracy (Temperature)	< ±0.5℃	
Resolution (Humidity)	0.1%RH	
Resolution (Temperature)	0.1℃	
Sensing period Average	2s	
Dimensions	14 × 18 × 5.5 (mm)	

Table 3. Technical Specification of DU-PLEX Ultrasonic Humidifier DP-7700UH (Foshan Shunde Geli electric appliance Co., Ltd., 2018)

Item	Parameter	Image
Product Size	400 × 150 × 190 (mm)
Code Length	about 1.5m	
Water Capacity	2liter	
Maximum Spray Volume	300cc	
Continuous Humidification Time	6hr	
Spray Outlet	Unidirectional	

3. 자료 수집 및 분석

3.1 자료 수집

본 연구의 미세먼지 및 기상요소 측정에서 측정 요소는 PM (PM2.5, PM10)농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 기온(AT, ℃) 그리고 상대 습도(RH, %)를 택하였다. 실내 각 미세먼지 농도는 Fig. 2와 같이 광산란형 SDS011센서(Nova Fitness Co., Ltd.)를 연결하여 측정하였다. 실내의 기온과 상대습도는 간편 기상 센서 DHT22 (Aosong Electronics Co., Ltd.)를 자료수집 시스템의 PM 측정기와 병렬 연결하여 측정하였다. 측정된 각 요소는 마이크로 컨트롤러 ESP8266 Node WiFi Devkit¹⁾을 통해 인터넷 클라우드 플랫폼 ThingSpeak²⁾에 실시간 저장되었다(Fig. 2 참조).

측정된 미세먼지 농도와 기상요소 측정값은 클라우드 플랫폼에 약 10초 단위로 저장되었다. 각 단계별 측정시간은 가습기의 최대 가동시간(6시간)을 고려하여 각 단계별로

동일하게 5시간씩 총 15시간³⁾ 동안 측정하였다.

본 연구의 PM농도와 상대습도와와 상관성 파악을 시간별로 구분하기 위하여 측정방법을 3단계로 구분하였다. 1단계(Step 1)에는 가습기 작동 전, 2단계(Step 2)는 가습기를 작동하여 인위적으로 주위환경의 상대습도를 변화시키는 단계이며, 3단계(Step 3)는 작동되고 있는 가습기의 작동을 멈추고 습도가 자연적으로 소멸되어 낮아지는 단계이다.

Fig. 2. Data Acquisition from Measurements of PM (PM2.5, PM10) and RH

1) ESP8266은 마이크로 컨트롤러로 자체 내장형 WiFi 네트워킹 솔루션이며 마이크로 USB 케이블을 사용하여 Arduino처럼 플래시 할 수 있다(Espressif Inc., 2017).

2) ThingSpeak는 클라우드 플랫폼으로 각종 센서의 출력 Data를 인터넷을 통해 실시간 저장 및 원격 모니터링을 할 수 있다.

3) 실제 측정기간: 2019년 6월 13일 19:03:17 ~2019년 6월 14일 10:28:48 (15시간 25분 31초)

3.2 분석결과

3.2.1 자료 분석

PM (PM2.5, PM10)농도와 기상요소 측정값인 상대습도(RH)와 기온(AT)은 매 10초 간격으로 기록되었다.

여기서, 기기의 특성상 발생할 수 있는 오류를 보정하고 오차를 최소화하기 위하여 10분 이동평균(Moving Average)값⁴⁾으로 산출하였다. Table 4는 단계별 각 요소의 10분 이동평균값을 매 10분 간격으로 나타낸 값이다.

3.2.2 PM(PM2.5, PM10)과 기상요소(RH, AT)의 시간별 변화

미세먼지(PM2.5, PM10)농도와 기상요소(RH, AT)의 시간별 변화를 측정된 자료의 10분 이동평균을 하여 10분 간격으로 일정 시간대별로 비교한 결과를 각각 Figs. 3과 4에 나타내었다. 그 결과 기습기에서 수분이 공급되는 시간으로부터 미세먼지 농도와 상대습도가 다 같이 증가함을 뚜렷이 나타내었다.

3.2.3 PM(PM2.5, PM10)과 상대습도(RH)와의 상관성

대기의 상대습도가 PM농도에 미치는 영향은 시간에 따라 다양하게 나타난다. 이에 대하여 본 연구에서는 상대습도가 미세먼지에 미치는 영향이 시간에 따라 일정하게 Eq. (1)과 같이 1차 함수의 관계로 주어진다고 가정하였다.

$$Y = aX + b \quad (1)$$

여기서 Y 는 PM농도이고, X 는 주위대기의 상대습도(RH), a 는 기울기 그리고 b 는 상대습도가 0일 때 PM농도이다.

본 연구의 측정결과는 전기간 미세먼지 평균농도가 $\overline{PM2.5}$ 가 313.9 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), $\overline{PM10}$ 이 434.3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났으며, 그 결과 상대습도와의 상관성을 파악하기 위해서 Figs. 5와 6과 같이 비교하였다.

Figs. 5와 6에서 PM과 상대습도와의 관계는 시간(Step 1-2)에 따라 상대습도가 증가할 때, PM 농도도 증가하고, 이어서 상대습도가 감소할 때(Step 3), PM 농도의 감소도 증가할 때와 유사한 비율로 감소하였다.

여기서 N 은 전체 단계에서의 총 자료수, N_{10} 은 매 10분 이동평균값의 자료수, $\overline{RH}$ 는 RH의 평균, S_{RH} 는 RH의 표준편차, $\overline{PM2.5}$ 는 PM2.5의 평균, $S_{PM2.5}$ 는 PM2.5의 표준편차, $\overline{PM10}$ 은 PM10의 평균, S_{PM10} 은 PM10의 표준편차, 그리고 Eq. (2)에 의하여 $RH_{(PM2.5=0)}$ 는 PM2.5=0에서의 RH이고 Eq. (3)에 의하여 $RH_{(PM10=0)}$ 는 PM10=0에서의 RH이다. Eq. (1)의 관계에 각 요소의 측정값을 대입하여 각 특정 단계별로 통계처리한 결과 Tables 5와 6에 나타냈다.

여기서 R^2 은 상관계수, S 는 표준편차이다.

따라서 전체 측정기간(Step 1-3)동안의 PM농도와 상대습도와의 관계를 Eq. (1)에 따라 아래와 같이 Eqs. (2)와 (3)의 결과를 나타내었다.

$$PM2.5 = 35.17 \times RH(\%) - 1788.11 \quad (2)$$

(단, $RH \geq 50.8\%$)⁵⁾

$$PM10 = 49.49 \times RH(\%) - 2523.02 \quad (3)$$

(단, $RH \geq 51.0\%$)⁶⁾

PM2.5는 RH가 50.8% 이상의 구간에서 Eq. (2)가 적용되고, 마찬가지로 PM10은 RH가 51.0% 이상의 구간에서 Eq. (3)이 적용된다.

4. 결 론

본 연구는 측정된 미세먼지 농도가 대기 습도의 영향에 민감함을 파악하기 위하여 광산란 형 PM센서(SDS011)로부터 측정된 PM농도와 주위환경의 상대습도와의 상관성을 조사하였다. 미세먼지 대기농도에 대한 많은 연구는 대부분 실외의 측정으로부터 조사되어, 측정된 미세먼지의 시간별 농도변화와 상대습도와의 관계가 명확히 규명된 바 없다. 특히 옥외 측정연구는 다양한 기상요소기의 변화 등으로 상대습도와 미세먼지 농도와의 관계를 정확히 파악하는데 어려움이 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 대기의 습도 조절이 가능한 실내측정으로부터 미세먼지 농도와 상대습도의 상관성을 구하였다. 그 결과 미세먼지 농도와 상대습도와의 상관성은 PM2.5에서 상관계수가 0.87 (R^2), PM10에서 상관계수가 0.86 (R^2) 으로 나타나 높은 상관성을 보였다. 여기에서 주위 환경의 기온은 시간에 따라 상수로 두었다. 측정과정은 실내 환경에서 3개의 단계로 설정하여 상대습도의 변화가 없는 Step 1, 습도가 증가하는 Step 2, 습도가 감소하는 Step 3으로 설정하여 조사하였다.

측정결과 전체 기간의 평균 PM 농도는 PM2.5와 PM10이 각각 313.9 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 434.3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났으며, 자료의 분산은 PM2.5에서 310.1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), PM10에서 437.9 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 여기서 측정결과와 평균치가 높고 산포가 높게 나타난 것은 실내환경이라는 조건과 그러한 조건 하에서 상대습도 변동폭을 크게하였기 때문으로 파악하였다.

즉, 상대습도의 증가와 감소에 따른 PM농도의 증감은 같은 비율로 나타났다. 이는 PM 농도의 측정값이 상대습도에 따라 민감한 반응을 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

4) 10분 이동평균(Moving Average)값: 실제 DATA 기록은 11~12초 간격으로 이루어지며, 매 60개의 데이터 단위로 이동평균을 산출하였다.

5), 6) PM농도는 음수가 될 수 없음

7) 통제할 수 없는 미세먼지 발생

Table 4. The 10min Moving Averaged Values of PM Concentration and Meteorological Elements Measured in Each Step. Those are Expressed Every 10 Minutes

a) Step 1

Time		$\overline{PM2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{PM10}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{RH}$ (%)	$\overline{AT}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Time		$\overline{PM2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{PM10}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{RH}$ (%)	$\overline{AT}$ ($^{\circ}\text{C}$)
from	to					from	to				
19:03	19:14	11.7	15.1	49.0	26.6	21:42	21:54	12.8	16.8	50.7	26.6
19:14	19:26	12.2	16.2	49.0	26.6	21:54	22:05	12.2	15.4	50.7	26.6
19:26	19:37	14.8	19.5	49.2	26.6	22:05	22:17	11.1	13.9	50.5	26.7
19:37	19:48	15.9	20.8	49.3	26.6	22:17	22:28	11.3	14.1	50.4	26.7
19:48	20:00	15.3	19.7	49.5	26.6	22:28	22:40	11.7	14.4	50.3	26.7
20:00	20:11	14.1	18.3	49.9	26.6	22:40	22:51	11.6	14.2	50.4	26.7
20:11	20:23	13.5	17.8	50.2	26.7	22:51	23:02	12.0	14.4	50.4	26.7
20:23	20:34	14.2	18.5	50.3	26.6	23:02	23:14	11.2	13.6	50.6	26.7
20:34	20:45	13.9	18.0	50.4	26.6	23:14	23:25	11.8	14.6	50.8	26.8
20:45	20:57	13.3	17.5	50.3	26.6	23:25	23:37	11.4	13.6	50.8	26.8
20:57	21:08	13.3	17.6	50.3	26.6	23:37	23:48	11.1	13.5	50.8	26.8
21:08	21:20	13.0	17.0	50.5	26.6	23:48	0:00	11.0	13.1	50.7	26.9
21:20	21:31	13.0	16.8	50.5	26.6	0:00	0:11	11.8	14.3	50.9	26.9
21:31	21:42	12.7	16.5	50.6	26.6						

b) Step 2

Time		$\overline{PM2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{PM10}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{RH}$ (%)	$\overline{AT}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Time		$\overline{PM2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{PM10}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{RH}$ (%)	$\overline{AT}$ ($^{\circ}\text{C}$)
from	to					from	to				
0:11	0:22	26.7	33.6	51.5	26.7	2:51	3:03	780.5	1127.1	69.4	26.8
0:22	0:34	159.2	209.9	53.5	26.7	3:03	3:14	771.2	1110.2	69.5	26.7
0:34	0:45	317.5	417.0	56.3	26.7	3:14	3:25	805.2	1189.3	71.0	26.7
0:45	0:57	446.0	579.8	58.8	26.8	3:25	3:37	790.6	1154.4	70.6	26.7
0:57	1:08	548.9	709.7	60.7	26.8	3:37	3:48	804.9	1190.8	71.6	26.6
1:08	1:20	594.0	780.9	61.2	26.8	3:48	4:00	776.7	1127.0	71.1	26.6
1:20	1:31	628.3	843.8	62.6	26.7	4:00	4:11	767.6	1105.5	71.5	26.5
1:31	1:42	687.9	937.9	64.4	26.7	4:11	4:23	719.6	1009.7	70.5	26.4
1:42	1:54	729.7	1018.2	65.5	26.8	4:23	4:34	687.9	948.9	70.3	26.3
1:54	2:05	727.0	1017.7	65.9	26.8	4:34	4:46	718.2	1000.9	72.1	26.3
2:05	2:17	725.4	1017.5	66.6	26.6	4:46	4:57	719.3	998.7	72.3	26.4
2:17	2:28	748.5	1061.4	68.1	26.7	4:57	5:09	727.6	1012.4	72.9	26.4
2:28	2:40	769.5	1101.1	69.5	26.8	5:09	5:20	723.6	1007.8	73.0	26.3
2:40	2:51	780.9	1126.9	69.7	26.8						

c) Step 3

Time		$\overline{PM2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{PM10}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{RH}$ (%)	$\overline{AT}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Time		$\overline{PM2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{PM10}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\overline{RH}$ (%)	$\overline{AT}$ ($^{\circ}\text{C}$)
from	to					from	to				
5:20	5:31	722.2	1005.0	72.9	26.4	8:00	8:12	189.8	256.0	61.2	26.8
5:31	5:43	663.0	891.3	70.9	26.5	8:12	8:23	156.5	215.9	60.5	26.7
5:43	5:54	615.5	812.6	69.4	26.6	8:23	8:34	150.9	207.5	60.8	26.8
5:54	6:06	556.8	727.7	67.9	26.6	8:34	8:46	131.7	179.3	60.0	26.8
6:06	6:17	526.2	685.9	67.3	26.6	8:46	8:57	120.2	162.9	59.8	26.8
6:17	6:29	477.0	625.4	66.2	26.6	8:57	9:09	97.2	131.3	58.5	26.8
6:29	6:40	433.8	573.4	65.5	26.6	9:09	9:20	84.1	113.2	58.0	26.8
6:40	6:52	409.4	546.2	65.2	26.6	9:20	9:32	84.4	113.1	58.4	26.8
6:52	7:03	367.2	498.7	64.4	26.6	9:32	9:43	59.8	80.4	55.9	26.8
7:03	7:14	340.4	459.0	64.2	26.6	9:43	9:54	58.5	78.6	56.5	26.8
7:14	7:26	286.3	382.4	63.1	26.7	9:54	10:06	57.1	76.2	57.0	26.9
7:26	7:37	251.4	336.2	62.5	26.7	10:06	10:17	53.5	71.4	57.2	26.9
7:37	7:49	227.4	304.0	62.0	26.7	10:17	10:28	52.6	69.4	57.1	26.9
7:49	8:00	210.5	281.2	61.6	26.7

Fig. 3. The Variations of PM2.5 and Air Temperature (AT) and Relative Humidity (RH), The Values are obtained by 10min Moving Average Each

Fig. 4. The Variations of PM10 and Air Temperature (AT) and Relative Humidity (RH), The Values are Obtained by 10 Minutes Moving Average Each

Fig. 5. Correlation Between PM2.5 and Relative Humidity

Fig. 6. Correlation Between PM10 and Relative Humidity

Table 5. Statistical Values of Each Parameter in Eq. (1) between PM2.5 and RH

Step	a	b	R ²	S
Step 1	-1.26	75.93	0.27	1.53
Step 2	29.42	-1306.17	0.83	174.23
Step 3	44.84	-2521.84	0.98	197.17
Total Step Periods	35.17	-1788.11	0.87	310.14

Table 6. Statistical Values of Each Parameter in Eq. (1) between PM10 and RH

Step	a	b	R ²	S
Step 1	-2.16	124.80	0.31	2.44
Step 2	44.32	-2034.99	0.85	263.51
Step 3	59.79	-3361.82	0.98	261.53
Total Step Periods	49.49	-2523.02	0.86	437.85

Step 2에서 Step 3까지의 분석결과에서 높은 상대습도 구간(50.8~74.5%)에서는 상대습도와 PM과는 매우 높은 양의 상관관계가 나타났다. 이는 상대습도가 최소한 50.8% 미만의 구간에서는 측정된 PM농도가 습도의 영향을 받지 않았음을 알 수 있다.

따라서 상대습도가 약 50.8~74.5%의 구간에서는 상대습도와 미세먼지의 상관성이 높기 때문에 이 구간의 상대습도에서는 광산란 방식의 미세먼지 측정기로 측정된 미세먼지 농도는 습도에 따른 보정이 필요함을 알 수 있다.

본 연구의 결과는 측정된 상대습도와 미세먼지 농도의 상관성 분석으로부터 상대습도가 광산란 형 미세먼지 측정 기기의 개발에 보정값으로 활용되어야 함을 보여준다.

그러나 향후 수치해석을 통한 정확한 보정값을 산출하기 위해서는 확장된 상대습도의 범위(50.8% 미만 및 74.5% 이상)와 실외에서의 대기의 기온에 따른 상대습도 변화를 고려한 추가적인 조사가 이어져야 할 것이다.

References

- Aosong Electronics Co., Ltd. (2015). *Manual of digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)*. Retrieved from <http://www.aosong.com/en/>
- Bae, D.H., Kim, K.S., Kim, T.H., and Lee, T.D. (2014). Development of a small dust concentration sensor using light scattering method for real-time data collection of fine dust. *Proceedings of 2014 Spring Conference*, Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, pp. 999-1002.
- Cheng, Y., He, K., Du, Z.Y., Zheng, M., Duan, F.K., and Ma, Y.L. (2015). Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing. *Environmental Pollution*, Vol. 197, pp. 68-75.
- Crilley, L.R., Shaw, M., Pound, R., Kramer, L.J., Price, R., Young, S., et al. (2018). Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 11, pp. 709-720.
- Di Antonio, A., Popoola, O.A.M., Ouyang, B., Saffell, J., and Jones, R.L. (2018). Developing a relative humidity correction for low-cost sensors measuring ambient particulate matter. *Sensors (Switzerland)*, Vol. 18, No. 9, 2790. doi:10.3390/s18092790
- Espressif Inc. (2017). *Manual of ESP8266 technical reference*. Retrieved from https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf
- Foshan Shunde Geli Electric Appliance Co., Ltd. (2018). *Manual of DU-PLEX ultrasonic humidifier DP-7700UH*. Retrieved from <http://item2.gmarket.co.kr/English/detailview/item.aspx?goodscode=882342457>
- Hong, J.H., Kim, H.S., Kim, Y.S., Lee, M.K., Pokhrel, R., and Lee, H.K. (2014). Analysis of meteorological factors effect for airborne particle monitoring using optical method. *Proceedings of 2014 Spring Conference*, Korean Society for Disaster Information, pp. 123-124.
- Huang, C.-H., and Tai, C.-Y. (2008). Relative humidity effect on PM_{2.5} readings recorded by collocated beta attenuation monitors. *Environmental Engineering Science*, Vol. 25, No. 7, pp. 1079-1090.
- Kim, E.S. (2012). Small particle detection system by optical scattering effect. *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, Vol. 7, No. 3, pp. 579-583.
- Kim, S.J., Son, Y.S., Kang, H.S., Kim, J.C., Lee, J.H., Kim, G.S., et al. (2009). Compensation of particulate matter measurement by light scattering method. *Proceedings of Fall Conference*, Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 613-615.
- Lou, C., Liu, H., Li, Y., Peng, Y., Wang, J., and Dai, L. (2017). Relationships of relative humidity with PM_{2.5} and PM₁₀ in the Yangtze River Delta, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 189, No. 11, Article No. 582. doi:10.1007/s10661-017-6281-z
- Lundgren, D.A., and Cooper, D.W. (1969). Effect of humidity on light-scattering methods of measuring particle concentration. *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 19, No. 4, pp. 243-247.
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Clean Air Conservation Act*. Act No. 16266.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018). *Super PM (PM-2.5) simple meter guidebook*. NIER-GP2018-032, NIER.
- Nova Fitness Co., Ltd. (2015). *Manual of laser PM_{2.5} sensor specification product model: SDS011 version: V1.3*. Retrieved from www.inovafitness.com
- Oh, S.N. (1980). On the atmospheric transmission in the IR window region. *J. of Korean Met. Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 22-29.
- Oh, S.N., and Cho, H.K. (1975). Secular and seasonal variations of atmospheric turbidity at Seoul. *J. of*

Korean Met. Soc., Vol. 11, No. 1, pp. 31-40.

World Health Organization (WHO). (2005). *WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. WHO. Retrieved from https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf;jsessionid=D984E0D32F3FA3C11D9E13E9E8C69736?sequence=1

Zhang, L., Cheng, Y., Zhang, Y., He, Y., Gu, Z., and Yu,

C. (2017). Impact of air humidity fluctuation on the rise of PM mass concentration based on the high-resolution monitoring data. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 543-552.

Received	September 4, 2019
Revised	September 23, 2019
Accepted	October 2, 2019