

광산란 계측기의 미세먼지 측정 정확도 향상을 위한 수분제거 전처리 기술 개발

강 두 수¹⁾ · 오 정 은¹⁾ · 이 상 열¹⁾ · 신 희 준¹⁾ · 봉 하 경¹⁾ · 최 주 현¹⁾ · 김 대 성^{2)*}

¹⁾센트리 부설연구소, ²⁾에어리스

(2018년 12월 26일 투고, 2018년 12월 28일 수정, 2018년 12월 28일 게재확정)

Development of Drying Systems for Accurate Measurement of Particulate Matter by means of Optical Particle Measuring Instruments

Doo Soo Kang¹⁾ · Jung Eun Oh¹⁾ · Sang Yul Lee¹⁾ · Hee Joon Shin¹⁾ · Ha Kyung Bong¹⁾ ·

Joohyun Choi¹⁾ · Dae Seong Kim^{2)*}

¹⁾R&D Center, Sentry Inc., ²⁾Aeris

(Received 26 Dec 2018; Revised 28 Dec 2018; Accepted 28 Dec 2018)

Abstract

In this study, we have developed drying systems for reducing the error by humidity on measuring particulate matter (PM) in the ambient air with optical particle measuring instruments. Two types of drying systems were designed: drying systems using heating and dilution methods. In addition, 3 types of drying systems using a heating method were designed: Type A (1 hole), B (3 holes) and C (7 holes). After making them, the laboratory and field tests were carried out to evaluate the developed drying systems. As a result, it was shown that the PM concentrations obtained by PM monitoring devices with drying systems agree well with that of the reference devices. Therefore, it could be concluded that the drying systems can be applied to PM monitoring devices for real-time monitoring of the ambient aerosols.

Keywords: drying system, heating method, dilution method, particulate matter, aerosol measurement

* Corresponding author.

Tel : +82-10-6788-8929

E-mail : dskim94@hanmail.net

1. 서론

광산관법으로 측정된 수치는 미세먼지의 중량을 이용한 농도 값이 아닌, 미세먼지의 개수 및 산란양을 이용하여 질량 보정계수(mass factor)를 구하여 계산한 상대적인 값이다(Kim et al., 2014; Kang et al., 2018). 보정계수란, 미세먼지 농도의 절대값이 측정되는 것이 아니라 미세먼지 입자 개수를 측정하는 광산관법의 한계를 극복하기 위한 것으로, 해당 환경에서의 미세먼지 평균입자밀도에 해당한다. 따라서 광산관법으로 측정된 값은 절대값이 아니며, 미세먼지의 입자밀도에 따라 상대적으로 많은 차이를 나타낸다. 또한, 미세먼지의 형태는 매우 다양하여 그 모양에 따라 레이저 빛의 산란이 달라지기도 한다.

광산관법은 다양한 간섭 요인으로 인하여 지역, 장소, 계절에 따라 상이한 차이를 나타낸다. 이러한 간접측정 방식은 중량농도법에 비해 과대측정되는 경향이 있으며, 여기에는 먼지의 밀도와 습도 조건이 크게 작용한다. 광산관 측정기에서 먼지농도가 과대 측정되는 이유는 측정되는 에어로졸의 밀도, 굴절률, 형태, 크기 및 크기분포에 대한 미 산란 특성에 기인한다(Kim et al., 2014). 대기 중 상대습도가 높을 경우, 광산관방식 미세먼지 측정은 다른 표준 측정법에 비해 중량농도가 비교적 높게 측정되는 것은 여러 문헌을 통해 확인할 수 있다. 이는 입자가 수분을 흡수하여 입자의 흡습 성장(Hygroscopic growth)을 초래하여 입자 크기의 증가로 더 많은 빛을 산란시키기 때문에 실제보다 높은 중량농도로 측정되기 때문이다(Branis, 2006; Day et al. 2011). Kim et al. (2015)에 따르면 상대습도 75% 이상의 조건에서는 광산관계수가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 상대습도를 낮추기 위해 실제 시료를 가온하는 경우 온도가 40°C 이상이면 대기 중에서는 대기화학반응에 의해 생성된 염이나 Semi-volatile 물질의 손실 우려가 있다는 연구 결과들이 있다(McMurry and Stolzenburg, 1989; Malm et al., 2011a; Malm et al., 2011b). 따라서 미세먼지 성분의 유실없이 수분의 영향을 최소화할 수 있도록 시료를 온도 40°C 이하, 상대습도 75% 이하로 전처리하여 측정할 수 있도록 한다.

시료 전처리(수분제거) 기술은 원리에 따라 확산제습, 가열제습, 삼투압제습(ex. 나피온), 희석제습 등으로 구분되며 관측환경에 따라 조합하여 기술을 채택할 수 있다. 제습장치들은 장비로의 수분유입을 방지하고 측정값에 수분에 의한 노이즈를 줄여준다. 확산 제습장치는 흡습제로 활용되는 실리카겔의 수분 흡수 성질을 활용한 제습장치로, 흡입된 공기를 실리카겔 튜브에 통과시켜 공기 내 수분이 실리카겔에 흡착되면서 물리적으로 제거되는 방식이다.

가열 제습장치는 흡입된 공기의 온도를 높여서 포화수증기압을 높여 상대습도를 낮추는 방식의 제습장치이다. 흡입된 공기의 온도를 10°C 이상 급격한 온도차이로 가열하거나 승온되지 않도록 해야 휘발성 에어로졸의 질량손실을 막을 수 있다. 미국 TSI사는 시료도입부를 가열시킴으로서 광산관에 의한 수분의 영향을 감소시키기 위한 장치(TSI Heated Inlet Sample Conditioner)를 개발하였다. 이 장치는 시료가 TSI DustTrack 측정 센서에 유입되기 전 시료의 습도를 일정하게 유지시켜 주는 역할을 하는데, 시료의 상대습도 30~50%로 조절할 수 있다.

희석 제습장치는 흡입된 공기에 특정 비율로 깨끗한 건조공기와 혼합하여 상대습도를 낮추는 기술로 혼합된 희석비율에 따라 에어로졸 측정값의 보정이 필요하다.

나피온 튜브의 수증기 투과 원리는 Flemion(중공사막)의 내부에 상대적으로 고압인 샘플링 가스가 지나가면 이온 교환막의 술폰기(-SO₃H)가 수분을 흡수해서 저압인 중공사막 외부로 퍼지에어와 함께 배출되고, 건조된 가스는 Flemion 내부 관을 통해 이동한다. 독일 Grimm사는 추가적인 가열없이 나피온 건조기(Nafion Dryer)를 이용하여 시료의 수분을 조절하기 때문에 반휘발성 물질의 손실은 없다고 한다.

문헌조사 결과 온도 40°C 이하, 상대습도 75% 이하에서 광산관방식 미세먼지 측정값이 안정적인 것으로 확인되었으므로 본 연구에서는 광산관방식 미세먼지 측정기의 측정오차를 최소화하기 위해 해당 구간의 온도 및 상대습도를 유지할 수 있도록 전처리장치를 개발하였다. 또한 개발된 전처리 장치 부착 전후의 측정기를 서울시에 위치한 대기측정소에 설치하여 대기오염공정시험 기준인 중량농도법 또는 베타선흡수법과 비교 분석하였다.

2. 전처리 장치 설계 및 제작

2.1 전처리 방식

시료의 전처리 방식으로 가열식 및 희석식을 고려하여 전처리 장치를 설계 테스트를 진행하였으며 각 방식의 특징은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 가열방식 중 멀티홀 타입과 희석방식의 전처리 장치를 설계 및 제작하였다.

2.2 희석식 전처리장치

희석식 전처리장치는 대상시료와 습도가 낮은 청정 공기를 희석하여 전처리하는 방법으로 대상시료와 저습도의 청정시료의 온도조건 등을 충분히 고려하여 적용한 상태에서 최종 계수 및 증량농도의 보정이 이루어져야 하므로 조건의 설정 및 유지가 수월하지 않아 실시간 측정시스템에 적용하기에는 고려사항이 많다. 그림 1은 본 연구를 통해 개발된 희석식 전처리장치 설계도 및 제작도를 나타낸다.

Table 1. Characteristic of drying systems using heating and dilution methods.

구분	가열 방식	희석 방식
원리	시료의 온도를 높여 상대습도를 낮추는 방식	시료의 희석을 통해 상대습도를 낮추는 방식
문제점	가열시 온도가 40℃ 이상으로 올라갈 경우 대기 중에서는 대기화확반응에 의해 생성된 염이나 Semi-volatile 물질의 손실로 인해 과소 평가 우려됨.	희석 방식의 경우 상대습도를 적절하게 낮추는지와 미세먼지가 효율적으로 희석되는지에 대한 평가 필요함.
구조	<p>(a) Spiral type: 카트리지가 히터를 시료가 흐르는 유로 안에 설치하여 시료를 가열하는 방식으로 유로가 회오리 형태로 히터를 감싸면서 가열되도록 설계.</p> <p>(b) Multi hole type: 카트리지가 히터가 안쪽의 유로를 감싸면서 시료를 가열시키는 방식이며, 유로를 멀티홀로 제작하여 시료가 균등하게 가열될 수 있도록 설계.</p>	유입되는 시료와 강제로 주입되는 깨끗한 공기가 혼합챔버 안에서 고르게 혼합될 수 있도록 설계.

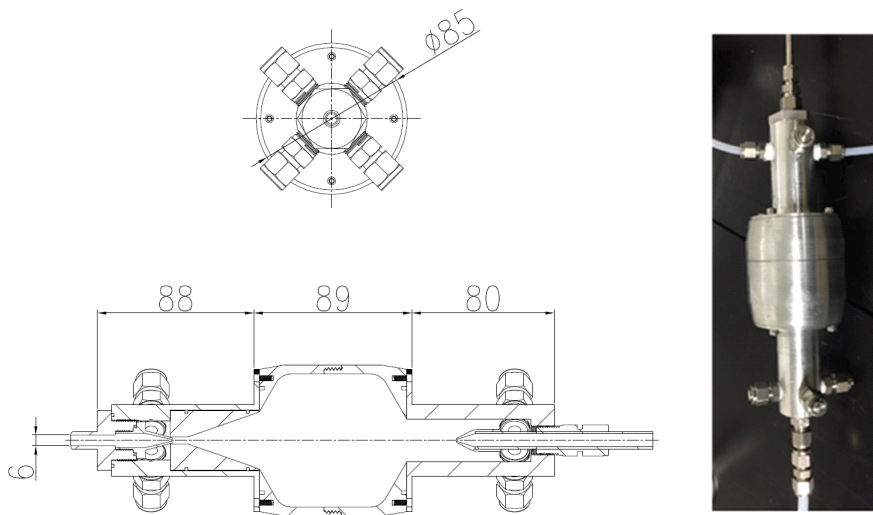


Fig. 1. Design of the drying system using a dilution method

2.3 가열식 전처리장치

가열식 전처리장치는 시료 유로의 분할수에 따라 1홀, 3홀, 7홀 총 3가지로 제작하여 테스트를 진행하

였으며, 장치의 설계 및 제작도는 Fig. 2와 같고 1홀, 3홀, 7홀의 차이는 Fig. 3과 같이 유로의 개수이다.

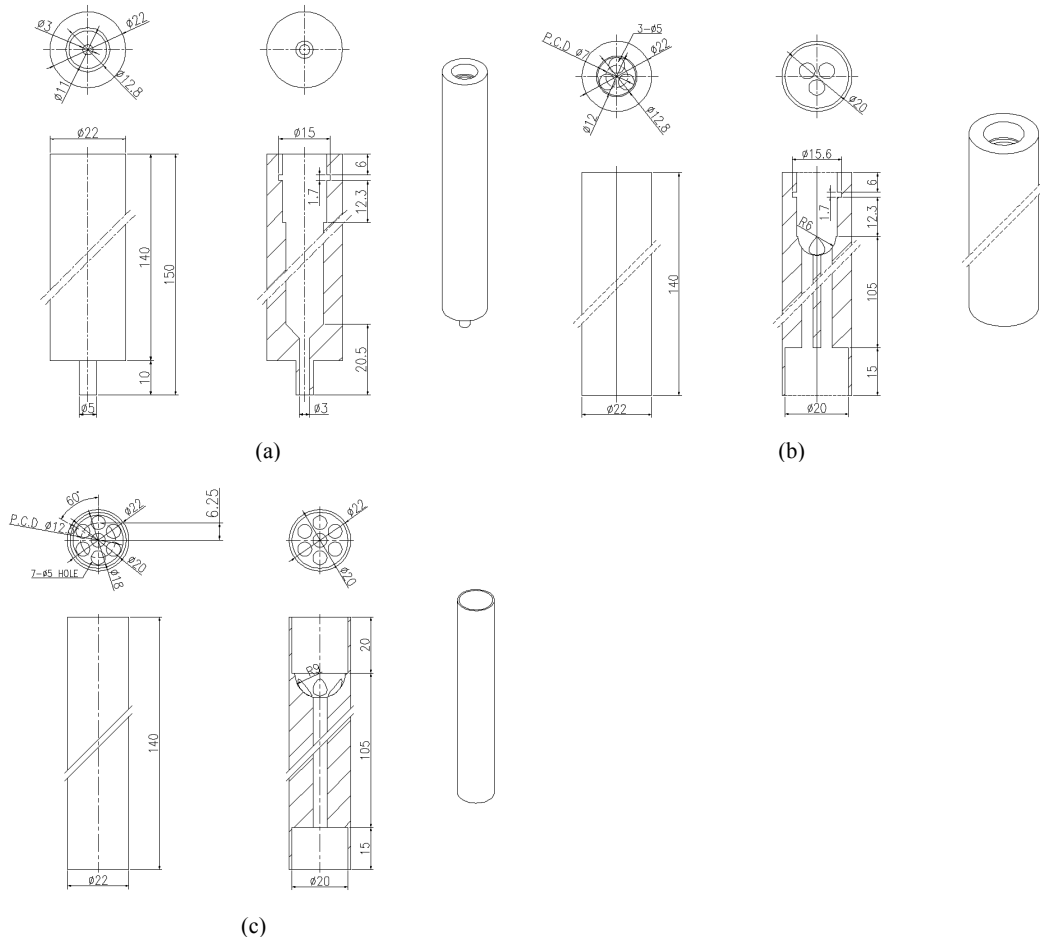


Fig. 2. Design of the drying systems using a heating method : (a) A (1 hole), (b) B (3 holes), and (c) C (7 holes)

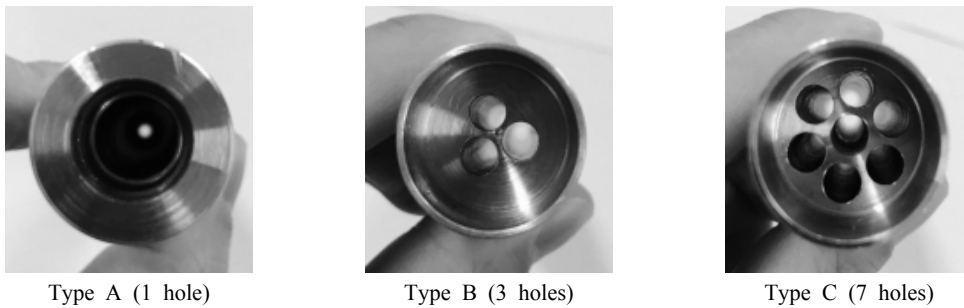


Fig. 3. Photographs of drying systems using a heating method

3. 실험 방법

본 연구에서는 3가지의 가열식 전처리장치와 1가지의 희석식 전처리 장치를 제작하여 성능을 평가하였다. 가열식 전처리장치를 테스트하기 위한 시료는 항온/항습 챔버를 이용하여 온도 및 상대습도 조건을 유지하였으며, 희석식 전처리 장치에 활용할 고습도 시료는 일정 압력이 필요할 가스로 인입되어야 함에 따라 임핀저를 이용하여 온도 및 상대습도 조건을 유지하였다. 또한 전처리장치 전/후단의 온도 및 상대습도 실시간 데이터 확인을 위해 온/습도 센서를 장착하여 이용하였다.

3.1 희석식 전처리장치

희석식 전처리장치 성능평가 테스트 장치 개요 및 구성도는 Fig. 4와 같으며, 시료의 일정한 상대습

도 및 청정도 유지를 확인하기 위해 별도의 온습도 센서를 장착하여 온도 및 상대습도 변화를 실시간으로 확인하였다. 테스트의 상세 조건은 다음과 같다.

- 희석식 전처리장치 온도: 60℃ 내외
- 희석식 전처리장치의 인입시료 조건: 온도 23℃, 상대습도 99% 내외, 0.5 lpm
- 희석식 전처리장치의 청정시료 조건: 온도 23℃, 상대습도 15% 내외, 1.0 lpm

3.2 가열식 전처리장치

성능평가에 앞서 시료가 전처리장치 전후 유량변화가 없어야 함에 따라 전처리 장치 전·후단의 유량을 확인한 결과, 전·후단 모두 약 0.64 lpm으로 유지되어 전처리장치 통과 시 유량의 변화는 없는 것으로 확인되었다. 전처리장치에 적용한 히터의 사양 및 목표 상대습도는 Table 2와 같다.

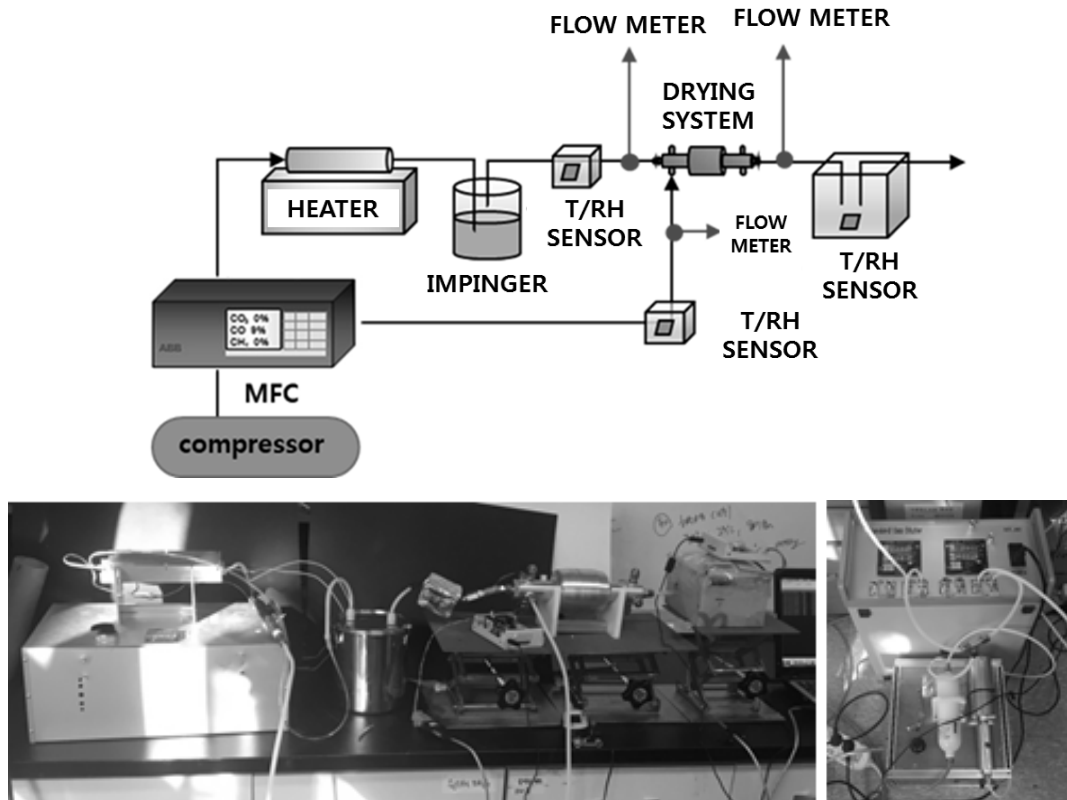


Fig. 4. Experimental set-up for performance evaluation of the drying system using dilution method

Table 2. Specifications of the heater for drying systems

히터용량	처리가스용량	발열량(이론값)	목표 승온온도
7 W	0.64 lpm	6.02 kcal/hr	6℃

※ 공기비열 : 0.173 kcal/kg·℃ (Air, dry, 0-200℃ 기준)

※ 물 비열 : 1.0 kcal/kg·℃

가열식 전처리장치 성능평가 테스트 장치 개요 및 구성도는 Fig. 5와 같으며 본 테스트에서 펌프의 성능을 유지하기 위해 전단에 실리카겔을 장착하여 고장을 방지하였다. 테스트의 상세 조건은 다음과 같다.

- 가열식 전처리장치 온도: 60℃ 내외
- 가열식 전처리장치의 인입시료 조건: 온도 23℃, 상대습도 99% 내외
- 희석식 전처리장치의 인입시료 조건: 온도 30℃, 상대습도 82% 내외

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 시뮬레이션

제작한 가열식(3종) 및 희석식(1종) 전처리 장치의 성능평가를 진행하기 전 유량에 따른 유속의 변화량에 대한 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 결과는 Table 3과 Fig. 6과 같이 3종류의 전처리장치 모두 각 유로에서의 유속은 비교적 유사한 것으로 확인되어 유속과 관련된 특별한 차이는 없는 것으로 확인되었다.

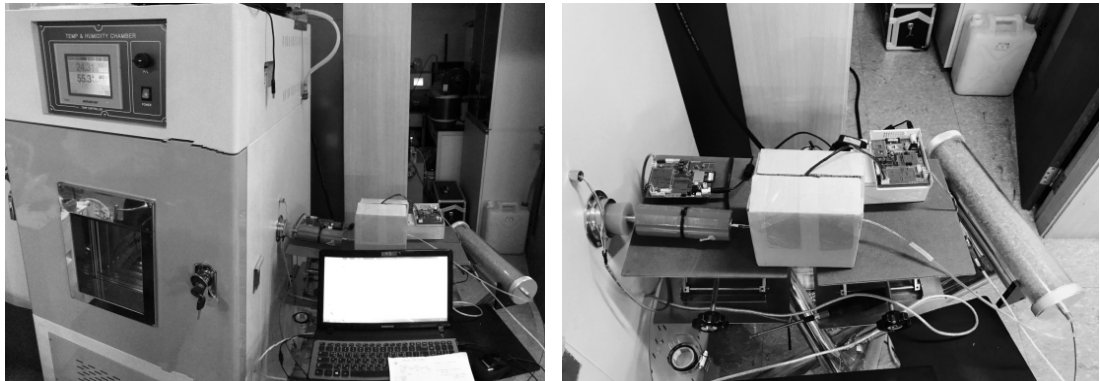
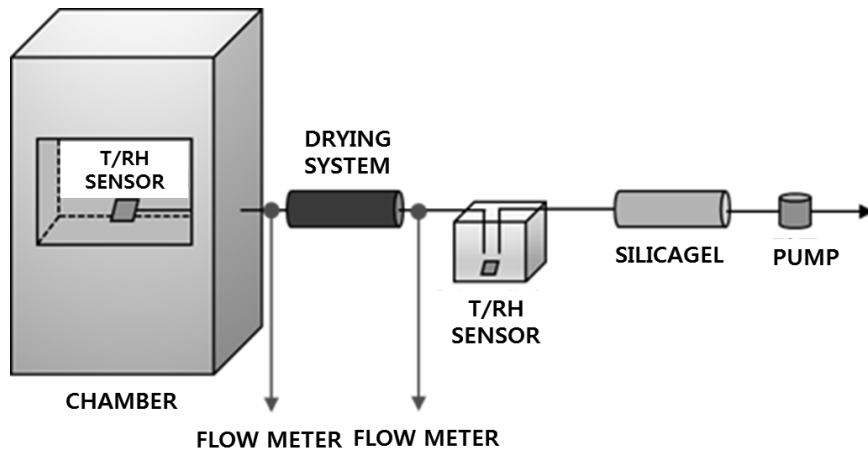
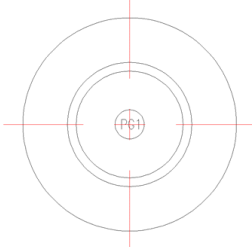
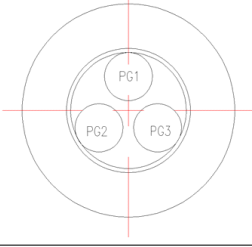
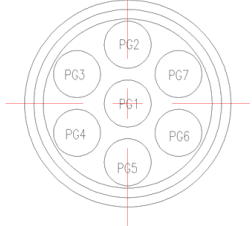
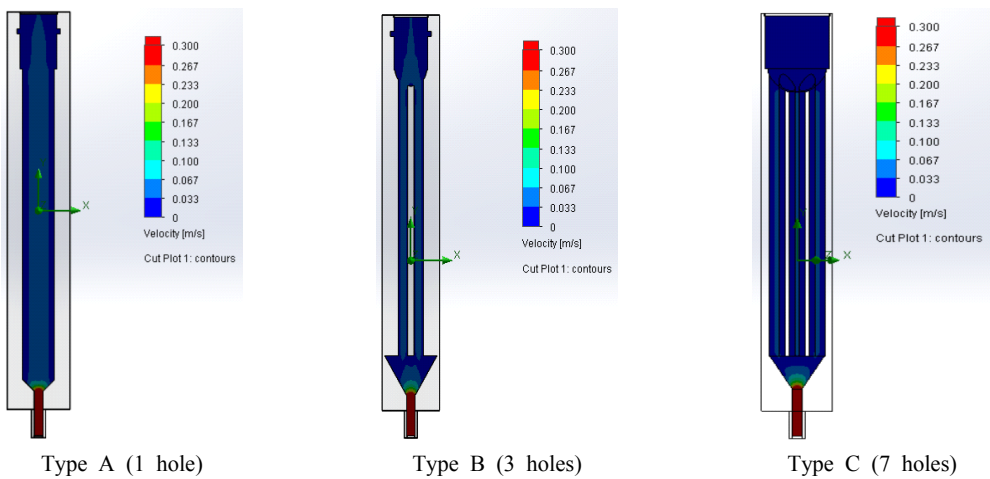


Fig. 5. Experimental set-up for performance evaluation of the drying system using a heating method

Table 3. Simulation of velocity of the drying system using a heating method

구분	지점	유속 (m/s)		
		0.5 lpm	1.0 lpm	
Type A		PG1	0.054	0.108
Type B		PG1	0.087	0.175
		PG2	0.087	0.174
		PG3	0.087	0.174
Type C		PG1	0.038	0.077
		PG2	0.037	0.074
		PG3	0.037	0.073
		PG4	0.037	0.073
		PG5	0.037	0.074
		PG6	0.037	0.073
		PG7	0.037	0.073



(a)

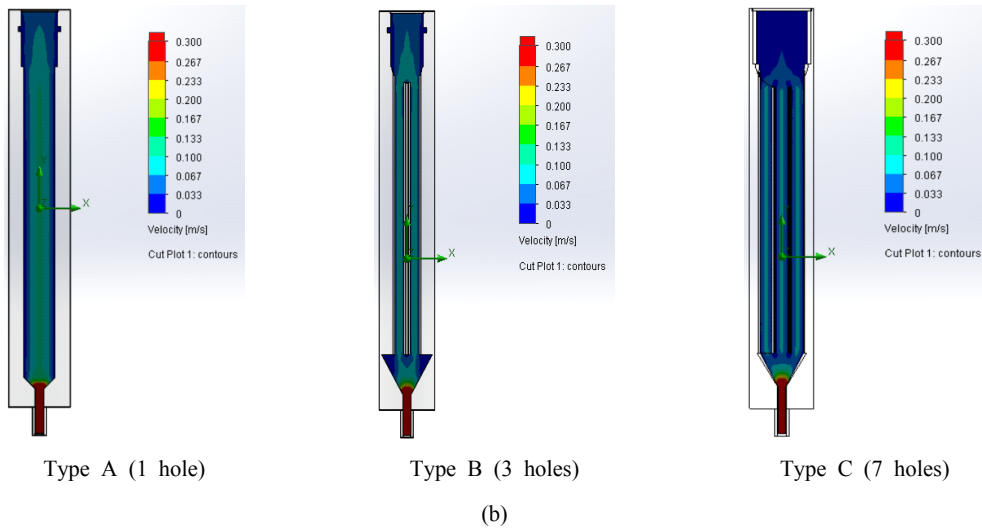


Fig. 6. Simulation of velocity of the drying system using a heating method : (a) 0.5 lpm, (b) 1 lpm

4.2 희석식 전처리장치

임편저를 이용하여 고습도의 시료 조건을 설정하고 유지하였으며, 시료 및 청정시료 모두 컴프레서를 이용하여 주입하고 유량은 MFC를 이용하여 시료 : 청정시료(희석 공기)를 1:2 비율로 전처리장치에 주입하고 테스트를 진행하였다. 두 시료 모두 컴프레서와 연결된 필터로 수분 및 오염물질을 제거하는 과정을 선행하고 주입하였으며 전처리장치 통과 전의 시료 및 청정시료와 전처리장치 통과 후의

온도 및 상대습도를 측정하였다.

그 결과, Fig. 7과 같이 가열방식보다 더 안정적으로 안전구간에 쉽게 도달하는 것으로 확인되어 입자상물질의 안정적인 희석만 가능하다면 희석식 전처리장치는 매우 효과적으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

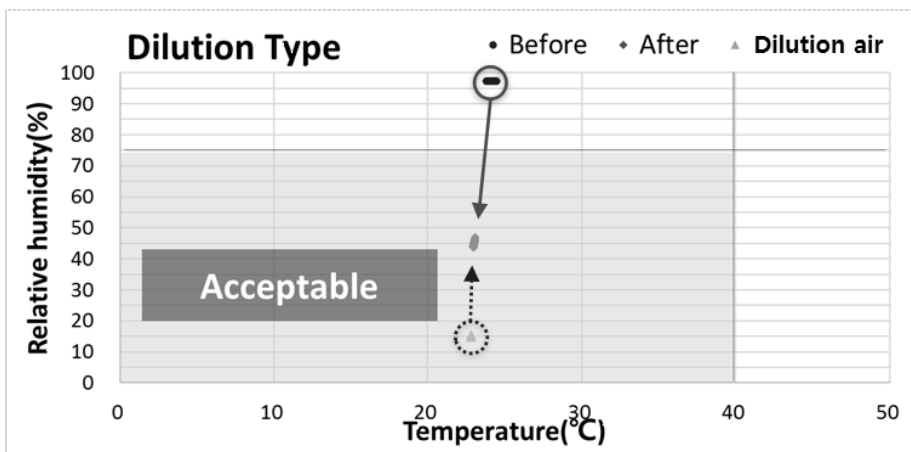


Fig. 7. Performance evaluation of the drying system using a dilution method

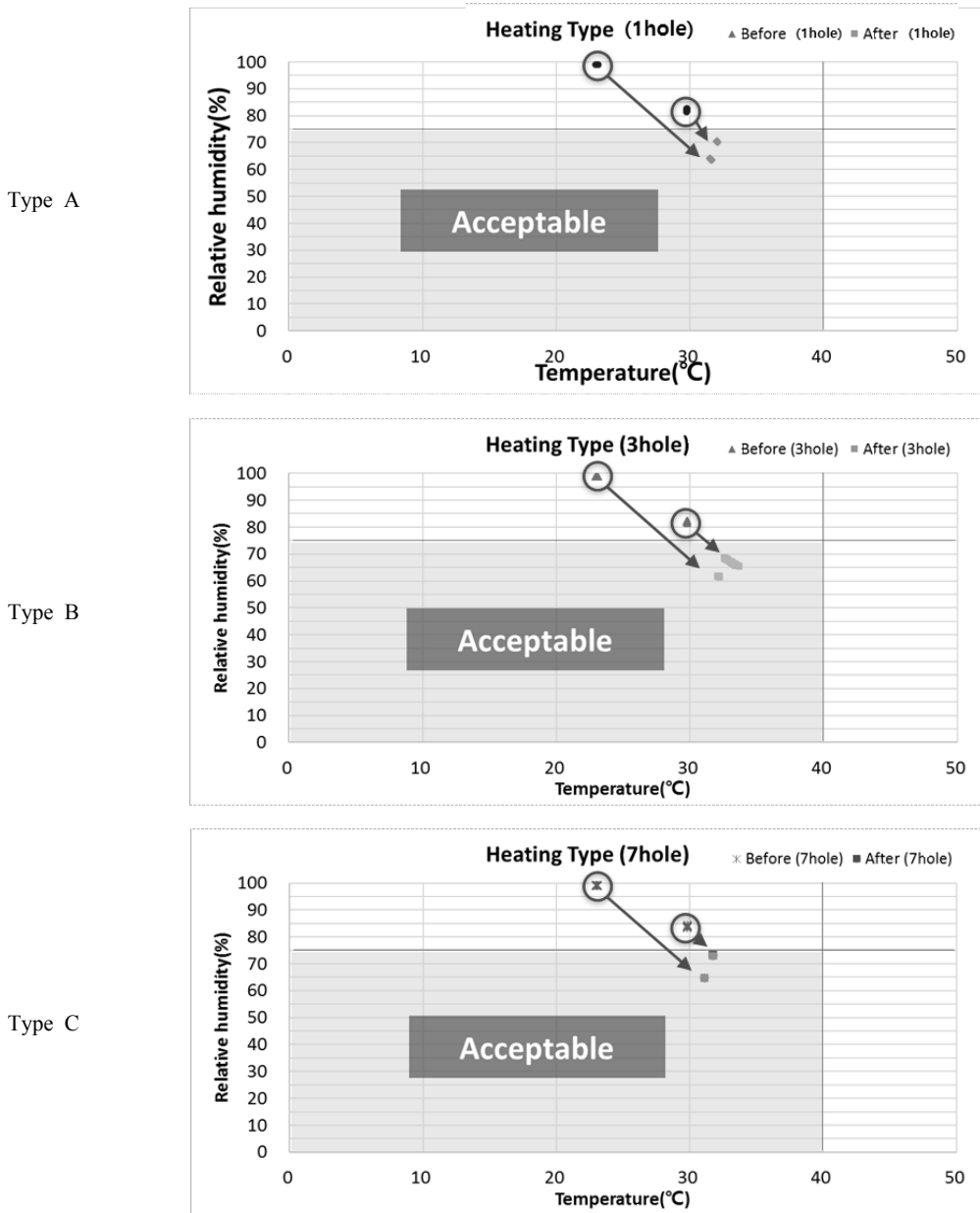


Fig. 8. Performance evaluation of the drying system using heating method

4.3 가열식 전처리장치

전처리장치 온도를 60°C로 설정하고, 온습도 조절 챔버를 이용하여 시료를 두가지 조건으로 제조하여 가열식 전처리장치 3가지(가열식 A, B, C)에 각각

통과 전 후 시료의 온도 및 상대습도를 측정하였다. 그 결과, Fig. 8과 같이 안정구간 외에 있던 시료가 가열식 전처리장치 A, B, C 통과 후, 모두 안정구간인 온도 40°C 이하, 상대습도 75% 이하 범위를 유지

하는 것으로 확인되었다. 사전 예상으로는 유로가 7개로 구성되어 있는 가열식 C가 시료내 열전도율이 가장 효율적일 것으로 예상하였으나 실험 결과, 가열식 A, B, C 장치의 결과가 모두 유사한 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 구조가 간단하고 제작비용이 저렴한 가열식 A를 현장 평가에 적용하였다.

4.4 현장 적용성 평가: 대기측정망 자료와의 비교 분석

기존 도시대기 측정소에 설치된 측정기는 국가에서 관리하는 측정기기로 미세먼지 대기오염공정시험 기준인 베타선법의 미세먼지 측정기가 설치되어

있다. 따라서 본 연구에서는 서울시에 위치한 종로구 대기 측정소에 개발한 전처리장치(가열식 A)가 부착된 미세먼지 측정기를 설치하고 일정기간 이상 데이터를 수집하여, 측정망 자료와 측정데이터를 비교/분석하여 성능을 검증하였다.

- ✓ 측정장소: 서울시 대기 측정소(종로구)
- ✓ 측정기간: 약 12일(2017.11.30 ~12.11)
- ✓ 측정망 자료와 측정기(가열식 A 전처리장치 포함) 측정 데이터 비교 및 분석
- ✓ 기존 측정망 자료는 시간별 측정 자료이므로, 측정결과를 시간평균으로 비교

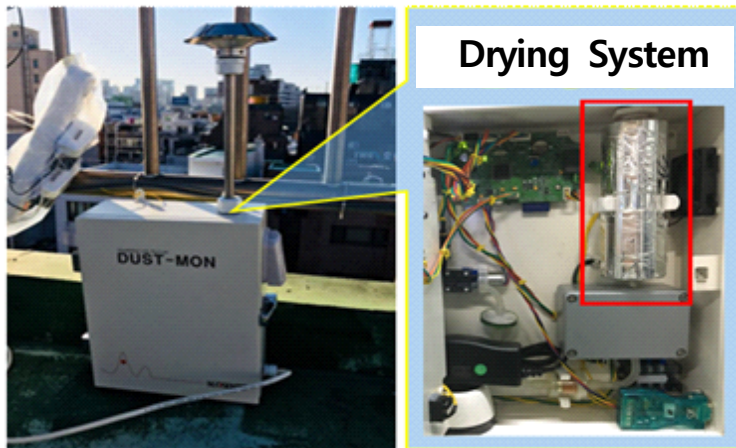


Fig. 9. Experimental set-up for a field test

2017년 11월 30일부터 2017년 12월 11일까지 약 12일간 수집된 종로구 측정소의 데이터를 기준으로 동일 시간에 측정된 본사 측정기의 측정데이터를 비교/분석하였다. 종로구 측정소 및 본사 측정기기, 두 기기의 PM10, PM2.5 측정값을 비교한 결과 Fig. 10과 같이 기존 측정망 자료와 전처리 장치가 포함

된 광산란 측정기의 측정결과가 일반 대기상태, 눈이나 비가 오는 상황에 관계없이 일정하게 유사한 경향성 및 상관도가 높은 것으로 나타났다.

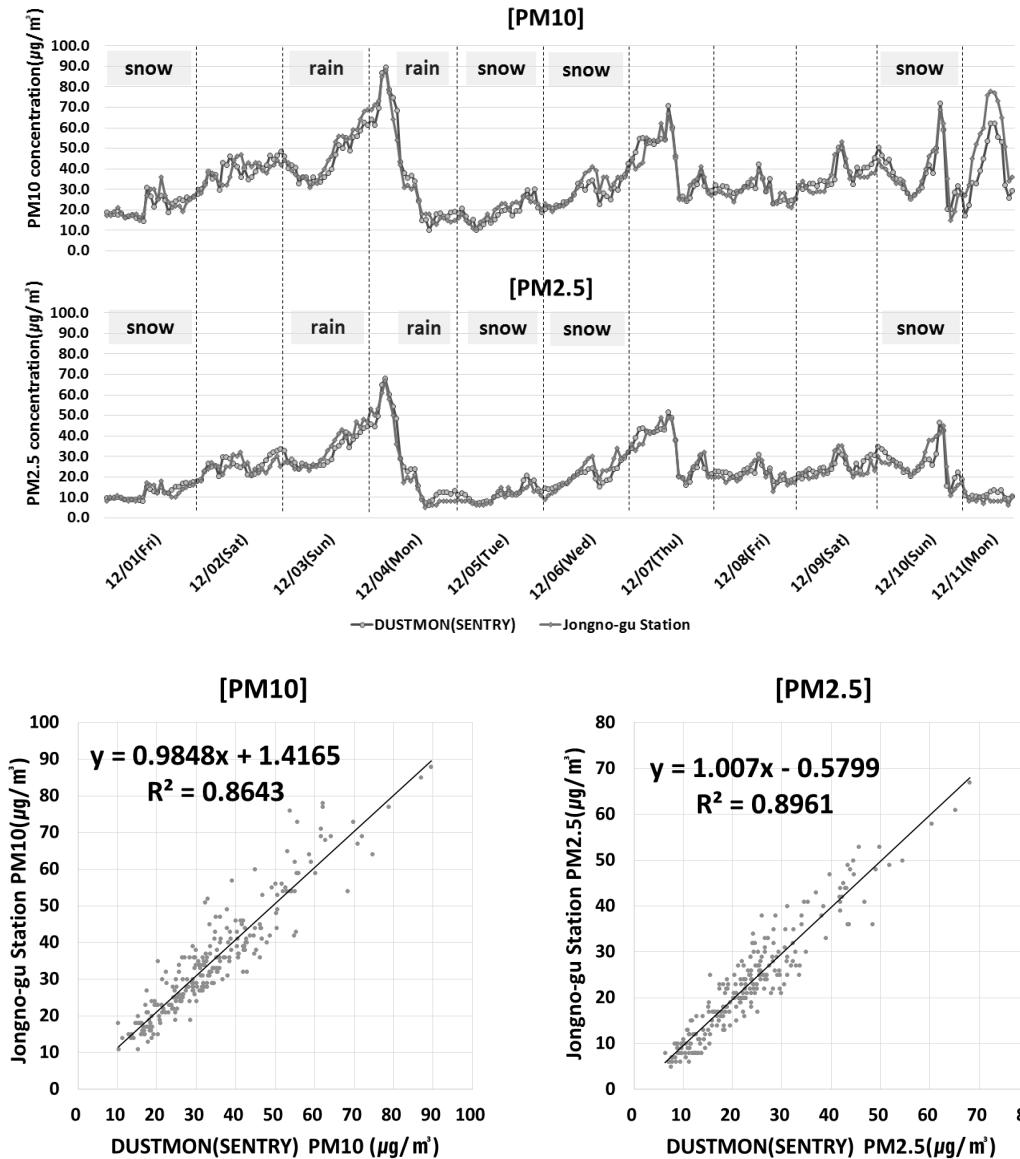


Fig. 10. Comparison of PM10 and PM2.5 between the SENTRY Dust Monitor with a drying system using heating method and a beta ray gauge (Jongno-gu station).

5. 결론

본 연구에서는 실외환경에서 광산란방식을 이용하여 실시간으로 미세먼지 측정 시, 환경변화로 발생하는 측정값의 오차 발생을 최소화할 수 있도록 기존 실내용 미세먼지 센서의 안정성을 확보하고 측정값의 정확도를 향상시키고자 전처리장치(제습장치)를 개발하였다.

광산란방식 미세먼지의 측정오차의 원인은 고온, 다습환경으로 확인되었으며 측정 안정 온도 및 상대습도 범위는 40℃ 이하, 75% 이하인 것으로 확인되었다(Kim et al., 2015). 해당 범위를 유지할 수 있는 안정적이고 효율적인 전처리장치 개발을 목표로 하였으며, 시료의 가열에 의해 상대습도를 낮추어 수분의 영향을 최소화하는 가열식과 희석에 의해 상대습도를 낮추는 희석식 장치를 개발하여 제작하고 성능테스트를 진행하였다. 그 결과, 최악의 온도 및 상대습도 조건(온도 30℃, 상대습도 82%; 온도 24℃, 상대습도 100%)에서 가열식 및 희석식 전처리장치 모두 측정 안정 온도 및 상대습도 범위를 유지하는 것으로 확인되었다.

또한 개발된 전처리 장치를 적용하여 광산란방식 미세먼지 모니터링장치를 구성하고 해당 장치를 서울시 종로구에 위치한 일반대기측정소에 설치하여 대기오염공정시험 기준인 베타선흡수법과 비교 분석하여, 그 성능에 대한 현장 적용성 평가를 진행하였다. 현장 측정 데이터를 비교한 결과, 기존 측정망 자료와 본 연구에서 개발한 전처리 장치를 적용한 미세먼지 측정기의 측정결과가 유사한 것으로 나타났다으며, 평균 오차율은 PM10의 경우 3.34%, PM2.5의 경우 4.40%로 나타났다.

개발한 전처리 장치를 이용하여 시료의 상대습도를 낮출 경우 별도의 보정식을 적용하지 않아도 비교적 신뢰도가 높은 것으로 확인되어 본 연구에서는 온/습도 보정식을 별도로 적용하지 않았다. 그러나 현장 특성에 따른 입자별 밀도 분석 및 온/습도 보정 등을 통해 중량농도 환산노직에 추가 적용한다면 보다 신뢰도 높은 측정값을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 녹색환경지원센터 공동연구개발사업 “수도권 미세먼지 대응을 위한 실시간 미세먼지 모니터링 시스템 상용화 검증”에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Kim, D. S., Cho, Y. K., and Yoon, Y. H. (2014). Development of a real-time monitoring device for measuring particulate matter, *Particle and Aerosol Research*, 10, 1-8.
- Kang, D. S., Oh, J. E., Lee, S. Y., Shin, H. J., Bong, H. K., and Kim, D. S. (2018). Development and performance evaluation of a real-time PM monitor based on optical scattering method, *Particle and Aerosol Research*, 14, 107-119.
- Kim, J. H., Oh, J., Choi, J. S., Ahn, J. Y., Yoon, G. H., and Park, J. S. (2014). A study on the correction factor of optic scattering PM2.5 by gravimetric method, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 14, 41-47.
- Branis, M. (2006). The concentration of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system, *Atmospheric Environment*, 40, 348-356.
- Day, D. E., Malm, W. C., and Kreidenweis, S. M. (2011). Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity, *Journal of the Air & Waste Managements Association*, 50, 710-716.
- Kim, J. H., Kim, S. W., Heo, J., Nam, J., Kim, M. H., Yu, Y. S., Lim, H. C., Lee, C., Heo, B. H., and Yoon, S. C. (2015). Aerosol light absorption and scattering coefficient measurements with a photoacoustic and nephelometric spectrometer, *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, 25, 185-191.
- McMurry, P. H., and Stolzenburg, M. R. (1989). On the sensitivity of particle size to relative humidity for Los Angeles aerosols, *Atmospheric Environment*, 23, 497-507.

Malm, W. C., Day, D. E., and Kreidenweis, S. M. (2011a). Light scattering characteristics of aerosols as a function of relative humidity: part I—a comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the theoretical models, *Journal of the Air & Waste Managements Association*, 50, 686-700.

Malm, W. C., Day, D. E., and Kreidenweis, S. M. (2011b). Light scattering characteristics of aerosols as a function of relative humidity: part II—a comparison of measured scattering and aerosol concentrations using the statistical models, *Journal of the Air & Waste Managements Association*, 50, 701-709.