ISSN 1738-8716(Print)
ISSN 2287-8130(Online)
Particle and Aerosol Research
Part. Aerosol Res. Vol. 13, No. 3: September 2017 pp. 105-110
http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2017.9.30.105

고수분 환경에서 미세먼지 실시간 측정을 위한 다공 튜브형 희석장치의 개발 및 성능 평가

우 창 규[1)] · 홍 기 정[1)] · 김 학 준[1)] · 김 용 진[1)] · 한 방 우[1)*] · 안 정 언[2)] · 강 수 지[3)] · 천 성 남[3)]
[1)]한국기계연구원 환경기계연구실, [2)]파코코리아인더스, [3)]전력연구원 청정발전연구소

(2017년 8월 14일 투고, 2017년 8월 18일 수정, 2017년 8월 21일 게재확정)

Development and performance evaluation of the porous tube dilutor for real-time measurements of fine particles from high humidity environments

Chang Gyu Woo[1)], Ki-Jung Hong[1)], Hak-Joon Kim[1)], Yong-Jin Kim[1)], Bangwoo Han[1)*], Jeongeun An[2)], Su Ji Kang[3)], Sung-Nam Chun[3)]
[1)]Department of Eco-Machinery Systems, Korea Institute of Machinery & Materials
[2)]Parkor Korea Indus Co., Ltd.
[3)]Clean Power Generation Laborator, KEPCO Research Institute

(Received 14 August 2017; Revised 18 August 2017; Accepted 21 August 2017)

Abstract

Real-time measurements of fine particles from stack emission gases are necessary due to the needs of continuous environmental monitoring of PM10 and PM2.5. The porous tube dilutor using hot and cold dilutions was developed to measure fine particles without condensable particles from highly humid emission gases and compared to the commercialized ejector-type dilutor. Particle size distributions were measured at the emission gases from a diesel engine and a coal-fired boiler. The porous tube dilutor could successfully measure the accumulation mode particles including relatively large particles more than 3 μm without nuclei particles, while the ejector dilutor detected some condensable particles and could not detect large particles. The porous tube dilutor could successfully remove the already condensed water droplet particles generated by a humidifier in a 30 m^3 chamber.

Keywords: sampling, PM10, PM2.5, dilution, condensable

* Corresponding author.
Tel : +82-42-868-7068; Fax : +82-42-868-7284
E-mail : bhan@kimm.re.kr

1. 서론

우리나라의 PM10 및 PM2.5 미세먼지에 대한 고농도 발생 횟수가 증가함에 따라 국민들의 미세먼지로 인한 건강에 대한 우려가 증가하고 있다(Health Effects Institute, 2017). 미세먼지의 대책 마련을 위해서는 미세먼지의 발생원으로부터의 정확한 PM10, PM2.5의 측정기술이 동반되어야 발생 원인을 분석하여 정확한 저감기술들이 적용될 수 있다. 현재 고정원에서의 미세먼지의 측정기술은 시료 채취 및 질량 측정 방식의 수동 측정법으로서 정확한 측정을 위해서는 최소 2-3일, 많게는 1주일 이상이 소요되어 실시간으로 미세먼지 배출 상태를 분석하고 이를 기반으로 농도를 관리하는데 한계가 있다(Enrivonmental Protection Agency, 1998).

미세먼지가 배출되는 대부분의 환경은 주로 수분을 다량 함유한 고수분 환경이므로 이를 기존의 실시간 미세먼지 계측기로 측정할 경우 샘플링 과정 중 발생되는 응축성 입자로 인해 정확한 미세먼지 측정이 불가능하다(Lipsky et al., 2005). 자동차 배출 입자의 경우 이러한 응축성 입자의 생성을 억제하기 위해 고온의 공기를 주입하는 고온 희석 방법을 사용하고 있다. 이러한 고온 희석 방법으로 Fig. 1과 같이 이젝터형(ejector) 희석장치나 회전 디스크형 희석장치(rotating disk) 등이 상용화되어 적용되고 있으나(Lyyränen et al., 2004, Burtscher 2005, Li et al., 2011), 희석공기의 혼합과정이나 Cavity 이송과정에서 입자 손실이 발생하여 정확한 PM10이나 PM2.5의 측정이 어려운 상태이다(Lipsky et al., 2002).

본 연구에서는 입자 손실이 적으면서 응축성 입자의 생성을 억제할 수 있도록 벽면으로 희석 공기를 주입하는 다공 튜브형 희석장치(Deuerling et al., 2010)를 자체적으로 개발하여 응축성 입자의 생성 억제 특성을 살펴보았다. 자동차 디젤엔진과 석탄보일러에서 배출되는 미세먼지에 대해 다공튜브형 희석장치와 기존 상용 희석장치인 이젝터형 희석장치(Dekati)를 이용하여 응축성 입자의 생성 억제와 큰 입자의 입자손실을 비교해 보았다. 또한 고수분의 시험챔버 환경조건에서 이미 생성된 응축성 입자의 희석장치에 의한 저감 특성을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 다공 튜브형 희석장치의 모습을 나타내고 있다. 200 ℃의 고온으로 히팅된 1차 희석공기는 이젝터(ejector) 노즐부로 고속으로 공급하여 주변에 음압을 형성시켜 미세먼지를 포함한 공기를 흡입시키고, 20 μm 크기의 비드로 소결된 금속 다공튜브로 이루어진 원통형 튜브로 2차 상온 희석공기를 주입하여 이젝터 후단에서의 혼합시의 벽면으로의 입자 손실을 최소화 시키는 2단 희석장치를 구성하였다.

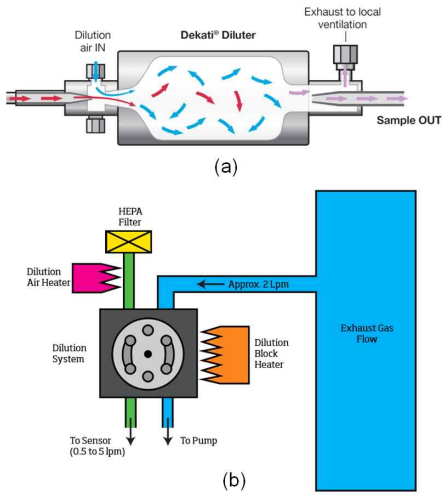

Fig. 1. Commercialized dilutors : (a) ejector (Dekati® Diluter), (b) rotating disk (Matter Engineering, MD19-2E)

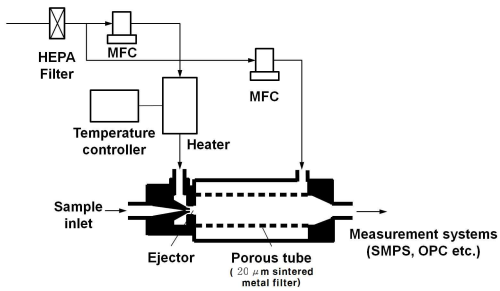

Fig. 2. The porous tube dilutor used in this work

먼저 고수분 고온 환경인 디젤 배기가스에서 미

세먼지 측정을 위해서 동력계가 연결된 디젤엔진을 사용하였다. 엔진은 배기량 1,991 cc, 최대출력 126 PS @ 4,000 rpm, 최대 토크 29.5 kg·m @ 2,000 rpm의 현대 산타페 엔진을 적용하였고 엔진오일은 현대모비스의 SAE 10W/30을 사용하였다. 주로 회전수 2,000 rpm, 토크 18 kg·m, 배기가스 온도 530 ºC 조건에서 DPF (diesel particulate filter) 전단에서 Dekati 상용 희석장치와 다공 튜브형 희석장치를 사용하여 배기가스를 샘플링한 뒤 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS+C, GRIMM) 측정장치를 이용하여 디젤 입자의 크기분포를 비교하였다. 희석비는 Dekati 상용희석 장치의 경우 약 100배로 고정하였고, 다공 튜브형 희석장치는 희석 공기유량에 따라 약 10-20배 정도를 나타내었다.

또한, 석탄 연소 배출 미세먼지는 100,000 kcal/hr 급의 석탄 보일러(GV-10, ㈜지구촌GV)를 이용하여 발생시켰다. 석탄 연료는 무연탄으로서 자동공급장치로 20 kg/hr로 속도로 공급하였고, 온수 온도를 70 ºC, 배기가스 온도를 100-150 ºC 정도를 유지할 수 있도록 운전하였다. 석탄 보일러에서 배출되는 미세먼지의 크기분포를 SMPS와 OPC(Optical Particle Counter, Grimm 1.109)를 이용하여 0.01 μm 부터 10 μm의 영역까지 광범위의 구간에 대해 측정하였고, Dekati 상용 희석장치와 다공 튜브형 희석장치의 차이를 비교해 보았다.

마지막으로 고수분 환경에서 생성된 수분 입자의 희석과정을 통한 제거 특성을 살펴보기 위해 30 m^3 (4.0 m × 3.1 m × 2.4 m) 크기의 시험챔버에서 가습기(AOS-2055, Air-O-Swiss)와 필터식 공기청정기(FU-550, Sharp)를 가동시키면서 다공 튜브형 희석장치의 사용에 따른 입자 농도 변화를 살펴보았다. 시험용 미세먼지는 KCl 1% 용액을 atomizer(model 3076, TSI)를 이용하여 발생시켰고, 가습기는 응축성 물입자를 인위적으로 발생시키기 위해 사용하였다. 공기청정기는 시험챔버 내에서 KCl 입자의 농도 저감 변화를 다양한 희석조건에서 비교하기 위해 사용하였다. 챔버 내의 입자 변화는 OPC(Optical Particle Counter, Grimm 1.109)를 이용하여 평균 0.3 μm 크기 입자인 0.25 μm와 0.35 μm 사이의 개수농도를 1분 단위로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 디젤 엔진 및 석탄 보일러 배가가스의 미세입자 비교 측정

Fig. 3은 디젤 엔진 배기가스에서 본 연구에서 개발된 다공튜브 희석장치의 1차 희석 공기량의 변화에 따른 입자 크기분포 변화를 보여주고 있다. 1차 희석 공기의 온도는 200 ºC로 고정하였고, 상온 희석 공기유량도 37 L/min으로 고정하였다. 1차 희석 공기 유량이 20 L/min일 경우에는 12 nm와 70 nm 근처에서 최대(peak)값을 갖는 이중모드(bi-modal)형 크기분포를 나타내었다. 이는 수분이나 SOF (soluble organic fraction) 등의 응축성 성분들이 포화되어 핵생성되는 핵화(nuclei) 모드의 입자와 입자들이 응집되어 성장된 응축성장(accumulation) 모드의 크기분포 모습을 나타내고 있다. 1차 희석공기를 22 및 24 L/min으로 증가시킬 경우 응축성장 모드의 입자는 희석비의 증가로 인해 수농도가 조금 감소한 상태로 크기분포가 유지되었으나 nuclei 모드 입자는 모드 자체가 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 1차 희석공기를 26 L/min 이상으로 주입하였을 때에는 핵화 모드의 입자 크기분포가 사라지고 70 nm peak의 응축성장 모드의 크기분포만이 측정되는 것을 알 수 있다. 희석공기는 고온이므로 상대습도가 낮아 희석공기의 유량이 증가하면 핵형성(nucleation)을 억제하여 핵화모드의 입자 크기분포가 감소한다. 이는 본 연구에서 개발된 다공 튜브형 희석장치에 충분한 고온의 희석공기가 주입될 경우 응축성 입자의 생성 없이 배기가스내의 입자상 물질만을 안정적으로 측정할 수 있음을 알 수 있다.

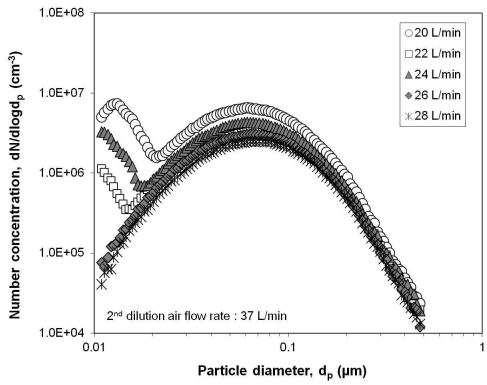

Fig. 3. Size distributions of diesel particles for different 1st dilution air flow rate at 200 ºC.

Fig. 4는 상용 제품인 Dekati사의 이젝터형 희석장치와 본 연구의 다공 튜브형 희석장치를 사용하여 디젤 엔진 배출 미세먼지의 크기분포를 측정한 결과를 보여주고 있다. 이젝터형 희석장치의 경우 히터 용량이 작아 1차 희석공기부의 온도를 약 100 ℃ 정도로 유지시켰다. 이젝터형 희석장치를 사용할 때 1차 희석공기의 온도가 충분히 높지 않아서 희석과정 중에 핵화 모드의 입자가 다량 발생하는 것을 확인할 수가 있다. 한편 응축성장 모드의 입자는 다공 튜브형 희석장치에 비해 농도만 1/10 정도로 작아졌을 뿐 크기분포는 거의 유사한 모습을 나타내었다. 따라서 다공 튜브형 희석장치가 더 적은 희석공기를 사용하면서도 응축성 물질의 생성을 충분히 억제시킬 수 있음을 보여주고 있다.

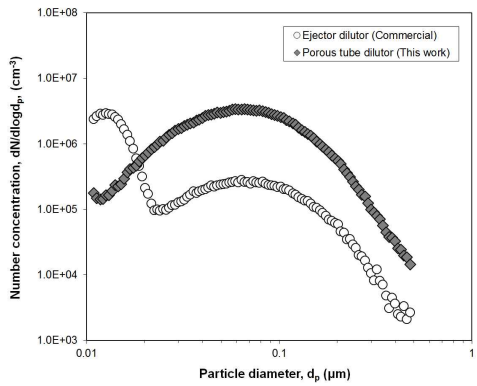

Fig. 4. Size distributions of diesel particles diluted by the ejector diluter and the porous tube diluter.

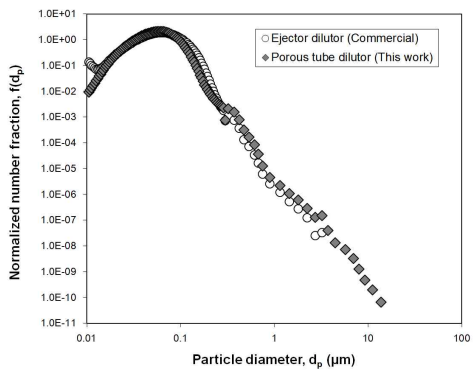

Fig. 5. Size distributions of coal-fired boiler particles diluted by the ejector diluter and the porous tube diluter.

Fig. 5는 석탄 보일러에서 배출되는 미세먼지의 크기분포를 Dekati사의 이젝터형 희석장치와 본 연구의 다공 튜브형 희석장치를 사용하여 비교한 결과를 나타내고 있다. 희석비의 차이를 고려하여 크기분포는 총 개수농도로 나눠주어 비교하였다. 두 가지의 희석장치를 사용하였을 때 응축성장 모드의 크기분포가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Dekati 이젝터형 희석장치의 경우 0.01 μm 근처에서 응축성 핵화 모드가 약간 관측되는 것을 확인할 수 있었고, 3 μm 크기 이상의 미세먼지는 거의 계측이 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 한편, 다공 튜브형 희석장치의 경우는 응축성 모드의 입자는 관측되지 않았고 3 μm에서 10 μm 이상 크기의 미세먼지도 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 낮은 희석비로도 다공 튜브형 희석장치가 응축성 성분의 생성 없이 충분히 희석시킬 수 있고, 이젝터 방식에서 샘플링 공기와 희석공기가 혼합되면서 발생할 수 있는 큰 입자의 손실을 다공 튜브 방식을 통해 손실 없이 효과적으로 희석시킬 수 있음을 보여주고 있다.

3.2 시험챔버 내에서의 미세입자 비교 측정

Fig. 6은 시험챔버 내에서 KCl 시험입자를 공급한 상태에서 가습기를 가동시켰을 때의 OPC로 측정한 0.25 μm와 0.35 μm 사이의 입자 농도변화를 보여주고 있다. 시험챔버 내의 배경농도를 10분 동안 약 2-3 개/cm^3 수준으로 유지시킨 뒤 KCl 입자를 10분 동안 주입하여 챔버 내 농도를 약 660 개/cm^3 수준으로 고정시켰고 10분 동안 이 농도를 유지시킨 뒤 가습기를 가동시켰다. 가습기를 가동시킨 뒤 0.3 μm 크기의 입자 농도가 조금씩 증가하더니 12분 후부터 급격히 증가하여 최종적으로 1,170 개/cm^3 수준까지 증가하였다. 즉, 시험챔버 내에 시험입자를 공급하고 가습기를 작동시켰더니 가습기에서 발생된 물 입자를 시험입자와 구분하지 못하고 OPC가 모두 입자로 인식하는 것을 확인할 수가 있다.

Fig. 7은 다양한 샘플링 조건에서 30 m^3 시험챔버에 KCl 입자를 공급한 뒤 공기청정기를 약풍으로 가동시켜 시간에 따른 입자 저감 상태를 측정한 결과를 나타내고 있다. 샘플링 조건으로는 희석장치를 사용하지 않고 공기청정기 성능 시험기준(SPS-KACA002-132)으로 측정할 때(without dilutor)와 희석장치를 사용하

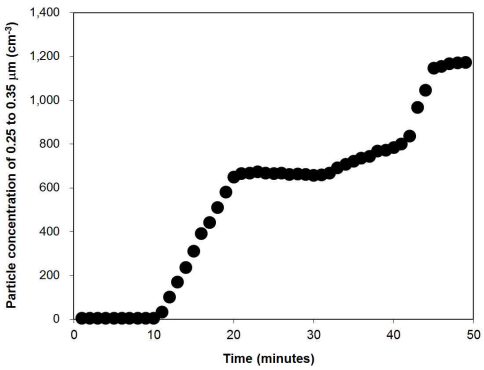

Fig. 6. Change of particle concentration of 0.25 to 0.35 μm size after operation of the humidifier

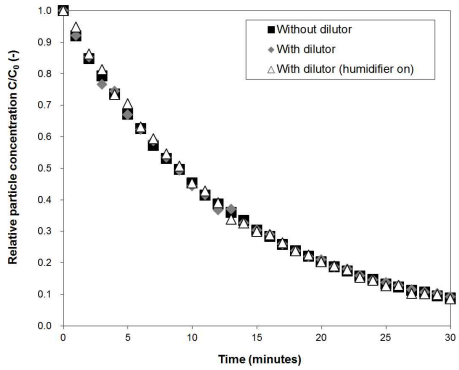

Fig. 7. Relative concentrations of 0.3 μm KCl particles with time after an air cleaner operation for different dilution conditions

여 측정할 때(with dilutor), 그리고 Fig. 3에서와 같이 가습기를 가동시켜 인위적으로 물입자를 발생시킨 상태에서 희석장치를 사용하고 측정할 때(with dilutor during humidifier on)로 구분하여 측정하였다. 공기청정기 규격시험으로 평가했을 때의 공기청정기 성능은 CADR(Clean air delivery rate)로 나타낼 수 있고 $C/C_0=\exp(-kt)$의 decay 상수인 k값에 시험챔버의 부피인 30 m^3을 곱하여 계산할 수 있다. 시험기준으로 희석장치를 사용하지 않은 방법에서 CADR값은 2.43 m^3/min을 나타내었고, 희석장치를 사용하고 또한 인위적으로 가습기를 사용했을 경우에도 CADR 값으로 2.40-2.43 m^3/min 정도를 나타내었다. 이는 본 연구에서 개발한 희석장치를 사용할 경우 응축생성된 물입자가 존재하더라도 희석장치에서 응축성 입자를 충분히 증발시켜서 원래의 시험입자인 고체 상태의 입자만을 정확하게 측정할 수 있음을 보여준다.

4. 요약

본 연구에서는 고온희석-상온희석 2단 희석의 다공 튜브형 희석장치를 제작하여 실제 배기가스와 시험챔버의 다양한 고수분 환경에서의 희석 조건에 따른 응축성 물질의 생성 억제와 생성된 응축 입자의 제거 특성에 관하여 살펴보았다. 디젤 엔진의 배출 입자는 응축 성분의 핵화 모드와 고체상의 응축성장 모드의 이중모드 분포를 나타내었고, 다공 튜브형 희석장치의 1차 고온희석 유량을 증가시킴으로써 핵화 모드 입자의 생성을 억제시키고 응축성장 모드의 입자만을 측정할 수 있었다. 석탄보일러에서 배출되는 미세먼지에 대해서도 다공 튜브형 희석장치를 적용하여 응축성 성분의 입자 생성 없이 응축성장 모드의 입자만을 측정할 수 있었고, 3 μm 크기 이상의 입자에 대해서 기존 이젝터 방식에 비해 상대적으로 입자 손실이 적음을 확인할 수 있었다. 또한 30 m^3 시험챔버에서 가습기로 인위적으로 발생시킨 물입자가 측정하고자 하는 고체 입자와 공존할 때 다공 튜브형 희석장치를 사용하여 물입자를 증발시켜 제거함으로써 고체 입자만을 정확하게 분리하여 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 산업부의 청정화력핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

Reference

Burtscher, H. (2005) Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review, Journal of Aerosol Science, 36, 896-932.

Deuerling, C. F., Maguhn, J., Nordsieck, H. O., Warnecke, R., and Zimmermann, R. (2010) Measurement system for characterization of gas and particle phase of high temperature combustion aerosols, Aerosol Science and Technology, 44, 1-9.

Environmental Protection Agency (1998) Stationary source control techniques document for fine particulate matter.

Health Effects Institute (2017), State of global air 2017. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute.

Li, X., Wang, S., Duan, L., Hao, J. and Long, Z. (2011) Design of a compact dilution sampler for satio-nary combustion sources, Journal of the Air & Waste Management Association, 61(11), 1124-1130.

Lipsky, E. M., and Robinson, A. L. (2005) Design and evaluation of a portable dilution sampling system for measuring fine particle emissions, Aerosol Science and Technology, 39(6), 542-553.

Lipsky, E., Stanier, C. O., Pandis, S., N., and Robinson, A. L. (2002) Effects of sampling conditions on the size distribution of fine particulate matter emitted from a pilot-scale pulverized-coal com-bustor, Energy & Fuels, 16, 302-310.

Lyyränen, J., Jokinielmi, J., Kauppinen, E. I., Backman, U. and Vesala, H. (2004) Comparison of different dilution methods for measuring diesel particle emissions, Aerosol Science and Technology, 38, 12-23.