

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 13, No. 4: December 2017 pp. 159-164

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2017.12.30.159>

광학식 입자 계수기 내 샘플 노즐 직경이 측정 효율 및 특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

송 현 우¹⁾ · 김 태 욱¹⁾ · 송 순 호^{2)*}

¹⁾연세대학교 기계공학과 대학원, ²⁾연세대학교 기계공학과

(2017년 10월 18일 투고, 2017년 11월 17일 수정, 2017년 11월 19일 게재확정)

Experimental analysis on effects of nozzle diameter on detection characteristics of an optical particle counter

Hyunwoo Song¹⁾, Taewook Kim¹⁾, Soonho Song^{2)*}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Yonsei University

²⁾Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received 18 October 2017; Revised 17 November 2017; Accepted 19 November 2017)

Abstract

The detection efficiency and characteristics of an optical particle counter (OPC), with various sample nozzle outlet diameters, were experimentally investigated. The OPC system, which was built with original design, was made up of a diode laser, two photodetectors, and a variety of optics such as a beam splitter and a concave mirror. The cone-shaped sampling nozzle was designed to be changeable to alter the outlet diameter, within the range of 1 to 3 mm. For samples, sets of polystyrene latex (PSL) standard particle with various sizes of 1 to 3 μm , were used. As a result, detection efficiency of the OPC greatly decreased with larger nozzle outlet diameter. Moreover, increased nozzle outlet diameter means broader sample flow, thus caused light interference and multiple scattering which results in abnormal high peaks in scattered light signal. The ratio of abnormal peaks to regular signal of single particle increased with larger nozzle outlet diameter.

Keywords: Optical Particle Counter, Light Scattering, Detection Efficiency, Nozzle Diameter

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-2811

E-mail : soonhosong@yonsei.ac.kr

1. 서론

최근 대기 중 입자상 물질의 농도 증가로 인한 대기 질 악화가 큰 문제로 인식되고 있다. 대기 중에 존재하는 미세 입자는 시정 장애부터 기관지, 안구 등 인체 질환에 이르기까지 일상적인 생활에 직·간접적인 영향을 주며, 사망률 역시 대기 중 입자상 물질의 농도와 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌다. (Dockery et al., 1993) 대기 중의 미세 입자 농도 측정은 대기오염 규제를 중심으로 하기 때문에 일반적으로 PM₁₀ 또는 PM_{2.5}에 해당하는 입자를 모두 합하여 질량 농도를 측정하는 장비가 널리 사용되고 있다. 하지만 질량 농도에 크게 기여하지 않는 sub-micron 입자의 유해성과 심각성이 지속적으로 보고됨에 따라 수 μm 이하의 입경을 갖는 에어로졸의 크기와 개수를 실시간으로 측정하는 기술이 주목받게 되었다. (Ji and Bae, 2013)

광학식 입자 측정 기술은 입자에 의한 빛의 산란량을 측정하는 광 산란 (scattering) 법과 입자의 광 흡수 량 또는 산란과 흡수 비율을 측정하는 광 흡수 (absorption) 법, 입자를 통과한 빛의 위상 변화를 측정하는 방법 등이 있다. (Son et al., 1991) 그 중 입자의 광 산란 강도를 측정하는 방법은 샘플링을 위한 지연 없이 실시간으로 측정이 이루어지며, 시스템 구성이 간단하여 장비의 크기가 작고 가벼우며 가격이 저렴하다는 장점을 갖는다. (Kim et al., 2007) 광 산란 법을 사용하는 입자 농도 측정 장비 중 가장 널리 사용되는 OPC (Optical Particle Counter, 광학식 입자 계수기) 는 입경 수백 nm - 수십 μm 범위의 입자를 대상으로 하며, 반도체 공정 등의 산업 현장 또는 공장 굴뚝과 같은 오염원 주변에서 상시 모니터링 장비로 널리 활용되고 있다. (Jung et al., 2003; Ohm, 2014)

광학식 입자 계수기의 성능은 측정 가능한 입자

의 직경과 농도의 범위로 나타낼 수 있다. 성능에 영향을 주는 인자는 광 소스의 출력, 렌즈 등 광학 기기 사양, 검출기의 민감성, 입자 유동 경로 등 매우 다양하다. (Bohren and Huffman, 1983) 입자 유동 경로에 대해서는, 일반적으로 샘플링 노즐의 출구 직경이 작을수록 입자의 정렬 효과가 뛰어나 입자 들끼리의 광 간섭이 최소화되고 측정 효율이 높아지는 것으로 알려져 있으나, 노즐 직경의 축소로 인한 입자 유속 증가 또한 무시할 수 없는 인자이다. (Kim et al., 2008; Kim et al., 2009)

이에 따라 본 연구에서는 샘플링 노즐 출구 직경이 광 산란 특성에 어떤 영향을 주는지 분석하고자 한다. 연구를 위하여 상용 다이오드 레이저 및 제어 장치, 광학기기, 광 검출기 등을 사용하여 독자적인 OPC 시스템을 구축하고 각 부의 사양과 모듈을 자유롭게 변경할 수 있도록 하였다. 입자 유로는 동일한 샘플 유입 부를 거친 뒤 지름이 좁아지는 cone 모양 노즐의 출구 부근 끝단만 교환이 가능하도록 제작하였다. 노즐 출구 직경은 1 - 3 mm까지 변화시켰고, 1 - 3 μm 사이의 입경을 갖는 폴리스타이렌 표준 입자를 통과시키며 광 산란 특성을 확인하였다.

2. 연구방법

2.1 OPC 시스템 구축

독자적인 OPC 시스템을 구축하기 위해 다이오드 레이저와 오목거울, 광 검출기를 사용하여 입자에 의한 산란광을 집광하도록 광학 장치를 구성하였고, 레이저가 입자 샘플에 도달하기 전에 빔 스플리터를 통과하여 레이저 광의 일부가 별도의 광 검출기로 입사하게 함으로써 레이저의 출력 변동을 감지하고 보정하였다. 또한 모든 광학 장치는 HEFA 필

Table 1. Specifications of the laser, mirror, and detector.

Laser		Concave Mirror		Photodetector
Power (mW)	Wavelength (nm)	Collimated Beam Dia. (mm)	Scattering Angle (deg)	Type
50	660	3	90 ± 19	Si PIN

터가 장착된 클린 박스 내에 위치하도록 하였다. 표 1에 장치 구성에 사용된 레이저 및 광학기의 사양이 나타나 있으며, 시스템의 개략도는 그림 1과 같다.

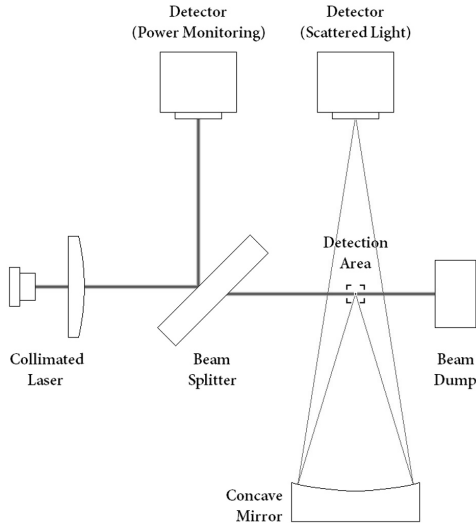


Fig. 1. Schematic diagram of the optical system.

2.2 노즐 형상

본 연구에서 고려된 유로 직경은 그림 2에서 d_1 , d_2 , d_3 에 해당하며, 각각 노즐 입구 직경, 노즐 출구 직경, 입자 배출구 직경을 의미한다. 입구 직경(d_1), 입자 배출구 직경(d_3), 그리고 노즐 길이(L)는 동일하게 유지하고 노즐 출구 직경(d_2)만을 변화시켜 총 5가지의 노즐 형상을 구현하였다. (표 2)

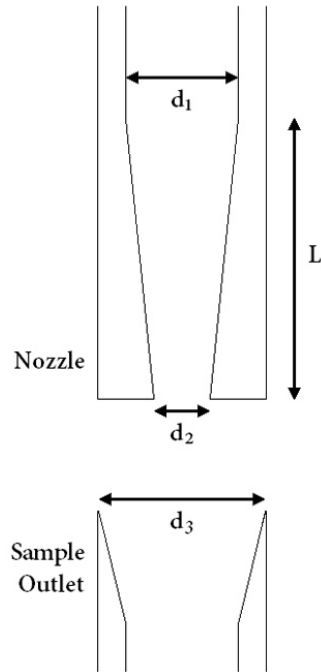


Fig. 2. Schematic of nozzle and sample outlet.

2.3 실험 방법

샘플로는 NIST 폴리스타이렌 표준 입자를 사용하였고 Oil-free 컴프레셔와 Clean Air Supply 시스템에서 공급된 압축공기를 이용하여 Atomizer를 통해 입자를 발생시켰다. Atomizer의 전단에는 유량 제어 장치(Mass Flow Controller)를 장치하여 샘플의 유량을 설정 및 제어하였고, 발생된 입자는 Diffusion Dryer에서 건조된 후 입자 증화기를 거쳐 OPC로 유입되도록 하였다. 전체적인 실험 장비의 구성을 그림 3에 나타내었다. 본 연구에 사용된 입자 직경, 농도 및 실험 조건은 표 3과 같으며, 산란광 신호의

Table 2. Nozzle length and sample inlet/outlet diameters.

Case No.	L (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	d_3 (mm)
1	10	4	1.0	6
2	10	4	1.5	6
3	10	4	2.0	6
4	10	4	2.5	6
5	10	4	3.0	6

Table 3. Experimental conditions.

Particle Diameter (μm)	Particle Concentration ($\#/cm^3$)	Sample Flow (L/min)
1.0	62	1.0
2.0	46	1.0
3.0	11	1.0

취득을 위해 5만 Hz의 샘플링 속도로 광 검출기와 데이터 취득 장치를 운용하였다.

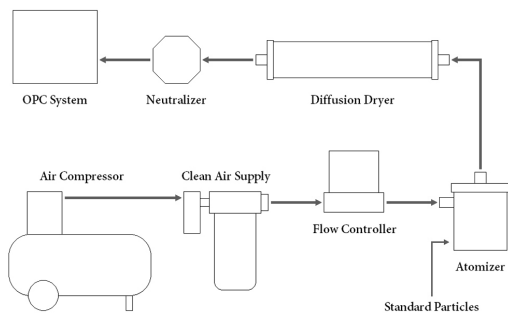


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental system.

3. 결과

3.1 입자 측정 효율

광 검출기를 통해 얻은 산란광 신호를 독자적인 알고리즘에 따라 처리하여 peak의 개수와 형태를 기초로 입자의 수 농도를 환산해 내었다. 1 - 3 μm 입경의 입자 샘플과 1 - 3 mm 지름의 노즐에 대해 각각 데이터를 취득하고 Grimm 사의 상용 OPC 장비로 측정된 수 농도 데이터와 비교하여 본 실험에서 구축된 OPC 시스템 및 해당 노즐의 입자 측정 효율을 계산하였다. 각 입자 샘플에 대해 측정된 노즐의 지름에 따른 측정 효율 변화는 그림 4 와 같다.

노즐의 직경이 작을수록 높은 측정 효율을 보였고, 노즐 직경이 커짐에 따라 급격히 감소하여 3 mm 노즐에서는 상용 OPC 대비 10 % 미만의 측정 효율을 보였다. 1 μm 입자의 경우 2, 3 μm 대비 더 완만한 감소 경향이 나타났지만, 1.5 mm의 노즐에서부터 50% 미만의 값을 보이며 크게 하락한 측정 효율을 확인할 수 있었다. 이 때 노즐의 직경이 레이저 빔의 직경보다 작거나 같기 때문에 모든 입

자들이 손실 없이 레이저 측정 영역을 통과한다. 따라서 노즐 직경이 커질수록 측정 효율이 감소하는 현상은 레이저 빔의 광 강도가 빔에 수직인 면을 기준으로 Gaussian 분포를 나타내기 때문인 것으로 보인다. (Kim et al., 2008) 광 강도가 높은 측정 영역의 중심부에 입자 유동이 집중되는 작은 직경의 노즐에서 더 높은 측정 효율을 얻어낼 수 있다. 한편, 노즐의 직경이 큰 경우에 입자의 유동 내 정렬도가 낮아지고 광 경로 상에서 입자가 겹치면서 산란광의 간섭이나 이중 산란이 일어나는 부분도 무시할 수 없을 것으로 판단된다. 이 경우 같은 수평면을 통과하는 여러 개의 입자가 하나의 큰 덩어리로 측정될 가능성이 있으며, 측정 효율은 감소하고 입자 1개에 해당하는 산란광 신호의 수 배에 달하는 peak가 감지된다.

3.2 측정 정밀성 분석

노즐의 직경이 작아지면 입자 유동 속도가 급격히 빨라져 광 검출기와 신호 처리의 높은 민감도가 요구되며, 노즐의 직경이 커지면 산란광 신호의 검출은 용이하나 측정 효율이 감소한다.

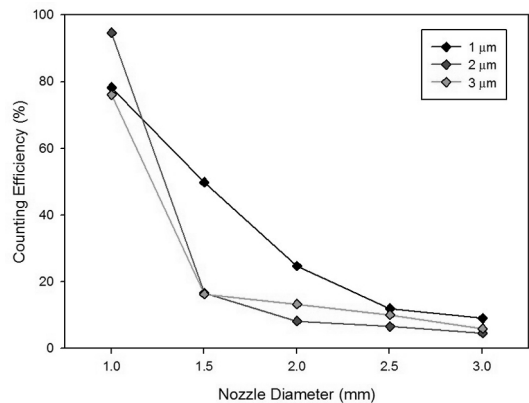


Fig. 4. Particle counting efficiency change by various nozzle diameters.

Table 4. Sample flow velocity and detection time.

Case No.	Velocity (m/s)	Detection Time (msec)
1	21.22	0.141
2	9.43	0.318
3	5.31	0.565
4	3.40	0.884
5	2.36	1.272

따라서 입자 유동 속도 및 측정 시간 확인을 통해 광 검출기의 민감도를 결정하고 측정 효율과 정밀성의 상승을 기대할 수 있다. 노즐의 형상 및 유동 관련 인자들을 통해 계산된 측정 영역의 유속과 측정 시간은 표 4 와 같다. 가장 높은 측정 효율을 보였던 1 mm 노즐의 경우 입자가 측정 영역을 통과하는 데 0.141 ms가 소요되므로, peak의 형태 파악과 광학적·전기적 노이즈 제거 등의 신호 처리를 위해 1개 입자에서 최소 3회 이상의 산란광 신호를 취득하려면 2만 Hz 이상의 샘플링 속도를 가진 광 검출기 및 데이터 취득 장치를 사용할 필요가 있다.

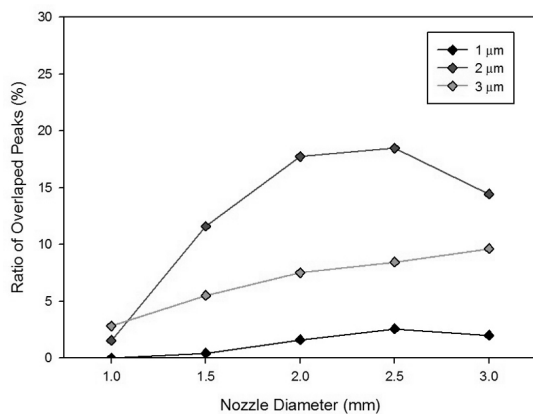


Fig. 5. Ratio of overlapped peaks to single peaks by various nozzle diameters.

한편, 상기 3.1 항에서 언급한 바와 같이 노즐의 직경이 커질 경우 같은 수평면을 통과하는 여러 개의 입자가 겹치면서 산란광의 간섭이나 이중 산란이 일어나고 측정 효율이 감소할 가능성이 있다. OPC의 광학적 특성에 따라 그 계수에는 차이를 보

이지만 입자의 직경과 산란광의 세기는 비례하는 관계를 보이며, (Heim et al., 2008) 산란광의 간섭 또는 이중 산란이 일어날 경우 신호가 큰 폭으로 증가한다. 따라서 입자가 겹친 peak의 경우 정상 peak의 수 배 이상에 달하는 크기를 보이게 되며, 본 연구에서는 단일 입자 신호를 판별하는 최고 한계 세기의 2배 이상에 해당하는 신호를 입자가 겹친 peak로 간주하였다. 각 case에 대해 측정된 정상 peak의 개수 대비 입자가 겹친 것으로 판별되는 peak의 비율이 그림 5 에 나타나 있다. 1 μm와 2 μm 입자의 경우 2.5 mm 지름의 노즐까지는 입자가 겹친 peak의 비율이 늘어나다가 3 mm 노즐에서 소폭 감소하는 경향을 보이며, 3 μm 입자에서는 노즐 지름 증가에 따라 지속적으로 비율이 높아지는 결과를 나타내었다. 한편, 입자가 겹친 peak의 비율이 10% 미만에 머무르는 1, 3 μm 입자와 달리 2 μm 입자의 경우 2.5 mm 노즐에서 최대 18.5 %에 달하는 비율을 보였다. 3.1 항에서 분석한 측정 효율에서도 노즐 직경에 따라 2 μm 입자의 효율 변화가 가장 급격하게 나타난 것을 고려할 때, 추후 본 연구에서 구축된 OPC 시스템의 광학적 특성이 측정 대상 입자의 크기에 따라 어떻게 달라지는지 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

독자적인 OPC 시스템을 구축한 후 광 계측 영역으로 샘플을 유입시키는 노즐의 출구 직경이 입자 측정 효율 및 정밀성에 미치는 영향에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 노즐 직경이 작을수록 측정 효율이 높아지는 것을 확인하였고, 이는 입자의 유동

이 광 강도가 강한 레이저 빔의 중심부를 지나가기 때문인 것으로 추측된다. 또한 노즐의 직경이 클수록 입자의 정렬도가 낮아지고 광 경로 상에서 입자가 겹쳐 peak가 중첩될 수 있기 때문에 비정상적으로 강한 산란광 신호가 나타남과 동시에 측정 효율이 감소하는 현상이 발생할 가능성을 확인하였다. 입자가 겹치면서 발생하는 수 배 이상 큰 peak는 노즐의 직경이 커짐에 따라 그 비율이 증가하는 경향을 보였으나, 1 μm 와 2 μm 입자의 경우에는 3 mm 직경의 노즐에서 소폭 감소하는 것을 확인하였다.

한편, 데이터에서 2 μm 입자의 결과가 1, 3 μm 입자와는 조금 다른 선형성과 경향을 보이는 것을 확인하였다. 본 연구에서 다루어진 미(Mie) 산란 이론에 따르면 산란광의 세기는 광 산란 각도를 포함하는 급수 함수로 나타낼 수 있으며, 따라서 산란 각도에 따라 크게 변화하는 비선형성을 보인다. (Bohren and Huffman, 1983) 보다 넓은 범위의 산란광을 검광하는 방법으로 비선형성을 상쇄하고 입자의 입경에 따라 세기가 증가하는 산란광 신호를 얻어낼 수 있지만, (Heim et al., 2008) 측정 효율과 입자 중첩 신호 등의 산란 특성에서는 여전히 비선형성이 나타나는 것으로 추측된다. 해당 부분에 대해서는 추후 산란 각도 범위나 광 검출기의 거리 등 광학적 특성을 좌우하는 인자들을 변화시키며 확인하고 추가적으로 미 산란 예측 코드를 이용한 수치적 해석을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20161110100170)

참고문헌

- Bohren, C.F., and Huffman, D.R. (1983). Absorption and scattering of light by small particles, New York: Wiley.
- Dockery, D., Pope, C.A., Xu, X., Spengler, J., Ware, J., Fay, M., Ferris, B., and Speizer, F. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, *New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759.
- Heim, M., Mullins, B.J., Umhauer, H., and Kasper, G. (2008). Performance evaluation of three optical particle counters with an efficient "multimodal" calibration method, *Journal of Aerosol Science*, 39, 1019-1031.
- Ji, J.H., and Bae, G.N. (2013). Estimation of Mass Size Distribution of Atmospheric Aerosols Using Real-Time Aerosol Measuring Instruments, *Particle and Aerosol Research*, 9(2), 39-50.
- Jung, C.H., Chun, Y., and Choi, B.C. (2003). Characteristics of Aerosol Size Distribution from OPC Measurement in Seoul, 2001, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(5), 515-528.
- Kim, Y., Jeon, K., and Kim, T. (2007). Effect of Flow Field and Detection Volume in the Optical Particle Sensor on the Detection Efficiency, *KSME Spring*, 3299-3304.
- Kim, Y., Kulkarni, A., Jeon, K., Yoon, J., Kang, S., Yun, J., Shin, Y., and Kim, T. (2009). Evaluation of an optical particle sensor to determine the effect of nozzle shape on counting efficiency, *Journal of Aerosol Science*, 40, 469-476.
- Kim, Y., Kulkarni, A., Jeon, K., Yoon, J., and Kim, T. (2008). Simulation and experimental evaluation of nozzle geometry and particle size on the detection efficiency in the optical particle sensor, *KSME Spring*, 444-447.
- Ohm, W. (2014). Development of Particle Detection Chamber for Particle Counter, *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, 51(1), 219-224.
- Son, J. Y., Kang, K.H., and Jeon, H. W. (1991). Characteristics of Optical Single Particle Sizing Techniques, *Journal of the Korean Physical Society*, 24(2), 137-144.