

축류형 사이클론을 이용한 공기역학경과 광학직경 상관관계 분석에 관한 연구

김은정^{1),2)} · 박경려¹⁾ · 허지은¹⁾ · 조철희^{2)*} · 조윤행^{1)*}

¹⁾한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

²⁾충남대학교 에너지과학기술대학원

(투고 2023년 10월 20일, 수정 2023년 10월 23일, 게재확정 2023년 10월 24일)

A Study on Correlation Analysis between Aerodynamic Diameter and Optical Diameter Using Axial Flow Cyclone

Eunjung Kim^{1),2)}, Kyung-Ryeo Park¹⁾, Jieun Heo¹⁾, Churl-Hee Cho^{2)*}, Yun-Haeng Joe^{1)*}

¹⁾Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research

²⁾Graduate School of energy science and technology, Chungnam National University

(Received October 20 2023; Revised October 23 2023; Accepted October 24 2023)

Abstract

APS (Aerodynamic Particle Sizer) and OPC (Optical Particle Counter) have been widely used to real-time measurement of indoor and outdoor aerosols. The APS measures the size distribution based on an aerodynamic diameter, while the OPC uses optical diameter to measure the size distribution of aerosols. Since obtaining a size distribution based on aerodynamic diameter is important to understand aerosol characteristics, lots of researcher had been developed experimental equations which can convert optical diameter into aerodynamic diameter. However, previous studies have conducted repeated experiments on particles having a single diameter. In this study, an experimental method of converting optical diameter into aerodynamic diameter through a single experiment was presented. The collection efficiencies of an axial cyclone were measured using APS and OPC at the same time, and the correlation equation between aerodynamic diameter and optical diameter was driven through a theoretical model. Using the proposed method, the size distribution of NaCl particles measured by OPC showed a high correlation with the size distribution obtained by APS (0.93 of R-squared value). In the tests conducted on ISO A1, A2, and A4 test particles, the converted OPC size distribution tended to be similar to the APS size distribution, and for each of test particles (ISO A1, A2, and A4), the R-squared values for the APS particle size distribution were 0.75, 0.86, and 0.89, respectively.

Keywords: Keywords : Aerodynamic diameter, Axial flow cyclone, Correlation, Optical diameter

* Corresponding author.

Tel : +82-42-860-3636 (Y.-H. Joe), +82-42-821-8614 (C.-H. Cho)

E-mail : yhjoe@kier.re.kr (Y.-H. Joe), choch@cnu.ac.kr (C.-H. Cho)

1. 서론

에어로졸이란 공기 중에 부유하고 있는 직경 0.001~100 μm 의 입자상 물질로 발생 및 생성 기작에 따라 성분, 밀도, 모양, 크기 등의 기계적 특성과 굴절계수, 광입사량, 광소멸량 등의 광학적 특성이 다르다. 일반적으로 에어로졸의 형태를 특정하기는 어려우므로 공학적 해석을 위해 에어로졸의 형태를 구형의 입자로 가정하고, 공기역학경(aerodynamic diameter), 광학직경(optical diameter)등으로 입자의 직경을 정의하여 사용하고 있다. 공기역학경은 외력에 대하여 실제 입자가 갖는 종말속도(terminal velocity)와 동일한 종말속도를 갖는 단위 밀도($1\text{g}/\text{cm}^3$)의 가상 직경을 말한다. 따라서 공기역학경은 입자의 성분, 밀도, 모양 등 기계적 특성이 상이하더라도 동일한 종말속도를 가진다면 동일한 입경으로 분류된다. 반면 광학직경은 빛(light)이 입자에 충돌하며 산란된 빛의 강도(light intensity)를 측정하여 이를 직경으로 변환한 것으로, 두 입자가 동일한 공기역학경을 갖더라도 광학적 특성이 다르면 서로 다른 입경으로 분류된다.

해석대상이 되는 에어로졸의 특성을 이해하는데 있어서 에어로졸의 입경 분포(size distribution)는 매우 중요한 정보이다. 따라서 에어로졸 연구 분야에서는 공기역학경 입자 측정기(APS, Aerodynamic Particle Sizer), 광학 입자 계수기(OPC, Optical Particle Counter) 등의 광학 측정 기반 계측장비를 사용하여 시험 대상 입자의 입경 분포를 측정하고 있다. APS는 공기역학경을 기반으로 한 광학 측정 장치로 한 개의 가속 노즐을 이용하여 장치 내로 유입되는 에어로졸 입자를 가속화하고 가속 노즐 끝단에 상하로 분기된 레이저(laser)를 조사하여, 시험 입자가 레이저 사이를 통과하는 시간(TOF, Time Of Flight) 및 빈도 정보를 이용해 에어로졸 입경 분포를 측정한다(Volckens and Peter, 2005). OPC는 빛의 탄성 산란(elastic scattering of light)을 기반으로 한 Mie 이론에 의해 에어로졸 입경 분포를 측정한다(Heyder and Gebhart, 1979). 한 개의 광원(light source)과 광검출기(light detector)로 구성된 계측부로 입자가 유입되면, 입자와 빛의 충돌로 인해 빛이 산란되고 특정 각도 이내에서의 산란된

빛의 강도 및 빈도를 정량화하면 이를 입자의 크기 및 농도로 변환할 수 있다. 이때, 입자에 의한 빛의 산란 강도는 입자의 기계적 특성뿐만 아니라 광학적 특성에도 영향을 받으므로, 일반적으로 OPC는 광학적 특성이 잘 알려져 있는 폴리스티렌 라텍스(PSL, Polystyrene Latex) 표준 입자를 이용하여 빛의 산란 강도를 입자의 크기로 변환한다(Heim et al., 2008). 따라서 PSL 입자와 다른 광학적 특성을 가진 입자의 경우, OPC에서 측정된 입경 분포는 실제 입경 분포와 다를 수 있다.

실내의 부유하고 있는 에어로졸은 평균 하전량이 0인 볼츠만 하전분포(Boltzmann charge distribution)를 띄고 있으며(Matsoukas, 1994), 기계, 보전, 환경 분야 등에서 관심을 갖고 있는 직경 10 μm 이하의 입자들은 질량이 매우 작다. 따라서 실내 및 대기 중에 부유하고 있는 에어로졸의 거동은 주로 주변 공기의 흐름에 의해 공기역학적으로 결정됨으로, 많은 에어로졸 거동 해석 문제에서 공기역학경을 기반으로 한 입경 분포는 매우 유용하다(Mitchell & Nagel, 1999). 그럼에도 불구하고, OPC는 비교적 저렴하고, 실시간 계측이 가능하며, 휴대성이 높아(Kulkarni et al., 2011; Binnig et al., 2007) 다양한 연구 분야에서 사용되고 있으며, 광학 특성에 의한 직경 분류 오류를 해결하기 위해 OPC에서 측정된 광학직경을 공기역학경으로 변환하는 연구가 진행되어 왔다. Hand and Kreidenweis (2002)는 DMA(Differential Mobility Analyzer)를 이용하여 대기 입자를 크기 별로 분류하고, 입경별 농도를 OPC와 APS를 이용해 측정하였다. 반복 실험을 통해 다양한 크기의 대기 입자 대상 입경별 농도를 측정하였으며 이를 통해 공기역학경과 광학직경의 상관관계를 살펴보았다. Chien et al. (2016)은 VOAG(Vibrating Orifice Aerosol Generator)를 이용해 단분산 NaCl 입자와 올레산 입자를 발생 시킨 후, APS와 OPC로 입경별 농도를 측정하였다. 다양한 크기의 입자를 대상으로 반복 실험을 수행하였으며, 이를 통해 공기 광학직경과 공기역학경 간의 상관식을 도출하였다. 기존의 연구에서는 DMA 또는 VOAG와 같은 시험 장비를 이용하여 단분산 입자를 발생 시키고, 반복 실험을 통해 공기역학경과 광학직경의 상관관계를 도출하는 연구 방법들이 주로 사용되어왔다. 하지만, 반복 실험은 실험

의 복잡성과 경제성 측면에서 유용하지 못하며, 특히 DMA 나 VOAG 등을 이용한 단분산 입자 발생 방법은 성분 및 크기, 농도가 제한된 실험만 가능하다는 한계점을 가진다(Sang-Nourpour and Olfert, 2019; Duan et al., 2016). 따라서 OPC를 이용한 에어로졸 연구의 편의성을 높이기 위해서는 다양한 성분 및 농도를 갖는 에어로졸을 대상으로 간편하게 공기역학과 광학직경의 상관관계를 도출 할 수 있는 새로운 실험 방법이 요구된다.

본 연구에서는 축류형 사이클론을 이용하여 한 번의 실험으로 공기역학과 광학직경의 상관관계를 도출할 수 있는 새로운 실험 방법을 제안하였다. NaCl 입자를 대상으로 실험 방법을 정립하였으며, Chien et al. (2016)의 NaCl 대상 실험 결과와 비교하여 실험 방법을 검증하였다. 더 나아가 다양한 연구 분야에서 사용되고 있는 ISO 표준 입자인 A1, A2, A4 시험 분진을 대상으로 광학직경과 공기역학의 상관식을 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 축류형 사이클론 제작

본 실험에 사용된 사이클론은 에어로졸 유입구의 방향과 배출구의 방향이 동일한 축류형 사이클론(axial flow cyclone)이었으며, 내경은 60mm 길이는 295mm 이었다. 선회류 발생기(swirl generator)는 6개의 가이드베인으로 이루어졌으며, 선회류 발생기 출구와 가이드베인 끝단 사이의 각도는 10도였다. 몸통(body)의 길이는 약 60mm, 선회류 약화기(vortex finder)의 내경은 50mm이었으며, 선회류 약화기의 10mm는 몸통으로 삽입되어 있었다. 마찰 하전에 의한 입자 손실 방지를 위해 모든 부속품은 스테인리스(Stainless Steel)로 제작하였으며, 자세한 수치와 형상을 그림 1(a)에 나타내었다.

2.2 사이클론 효율 평가 방법

사이클론 효율 평가를 위한 실험 방법을 그림 1(b)에 도시하였다. 시험 덕트는 내경 60mm 스테인리스 파이프를 이용하여 제작하였으며, 시험 덕트 중앙에 축류형 사이클론을 설치하였다. 시험 덕트 후단에는 블로워

(blower)를 설치하여 내부 유동을 형성시켰으며, 시험 덕트 내 단면 유속은 15m/s로 고정하였다. 사이클론 전단에는 NaCl 입자 또는 ISO 표준 입자를 주입하였다. 이때 NaCl 입자는 큰입자 발생기(large particle generator, AKG-1791, ART Plus), ISO 표준 입자(A1, A2, A4)는 분진발생장치(dust generator, SAG 410, TOPAS)를 이용하여 에어로졸화하였으며, NaCl 입자 발생을 위해 2wt.%의 NaCl 수용액을 사용하였다. 사이클론의 전단 및 후단에 각각 OPC(aerosol spectrometer, 11-D, GRIMM)와 APS(Model 3321, TSI Inc.)을 설치하여 시험 덕트 내 에어로졸 농도를 동시 측정하였으며, 샘플링포트 (sampling port)후단은 Y관을 이용해 분기하여 측정 위치에 따른 실험 오차를 최소화하였다. 또한 APS와 샘플링 포트 연결 시, APS 유입구 중 흡입 유량이 1lpm인 에어로졸 유입구(aerosol inlet port)만 사용하여, OPC의 측정유량 1.2lpm과 편차를 최소화 하였다. 이를 통해 두 측정기기 사이의 샘플링 유량에 따른 오차를 방지하였다. 실험에 사용된 모든 계측 장치는 6개월 이내에 제조사를 통해 보정을 받았으며, 모든 실험은 1분 단위로 3회 측정 후 평균값을 사용하였다.

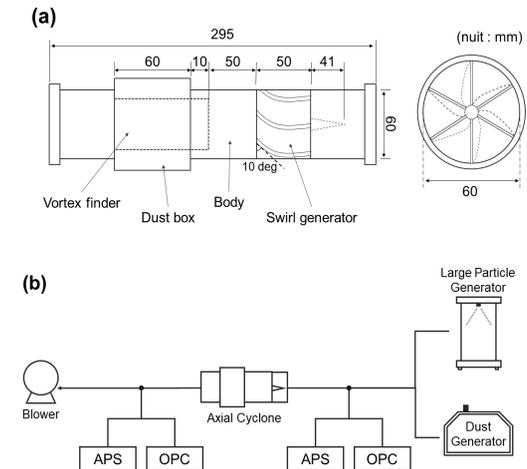


Figure 1. (a) Design of axial flow cyclone and (b) Experimental setup to measure axial flow cyclone efficiency

2.3 공기역학경과 광학직경 상관관계 도출 방법

본 연구에서는; 1) 사이클론의 입경별 효율 데이터 계산, 2) 데이터 수식화, 3) 광학직경의 공기역학경 변환식 도출 4) 변환 데이터 검증의 네 단계를 통해 공기역학경과 광학직경의 상관관계를 도출하였다. 사이클론 입경별 효율 데이터는 APS와 OPC로 측정된 사이클론 전단(C_{in}) 및 후단(C_{out})에서의 입경별 수농도를 이용해 아래와 같이 계산하였다.

$$\eta_{E,i}(d_i) = 1 - \frac{C_{out}(d_i)}{C_{in}(d_i)} \quad (1)$$

여기서, η_E 는 실험을 통해 측정된 사이클론의 효율, d 는 입자의 직경을 의미한다. 아래첨자 i 는 계측장비를 의미하며 APS 또는 OPC이다.

두 계측장비를 통해 측정된 입경별 사이클론 효율 $\eta_{E,APS}$ 와 $\eta_{E,OPC}$ 을 사이클론 효율 이론 모델을 이용하여 수식화하였다. 본 연구에서는 Lapple 모델(Lapple, 1950), Li&Wang 모델(Li and Wang, 1989), Iozia & Leith 모델(Iozia and Leith, 1990)을 고려하였으며, 각 이론 모델은 아래와 같이 표현된다.

Lapple model :

$$\eta_T(d) = \frac{1}{1 + (\frac{d_{50}}{d})^2} \quad (2)$$

Li&Wang model :

$$\eta_T(d) = 1 - \exp[-\alpha \times C_c \times d^\beta] \quad (3)$$

Iozia&Leith model :

$$\eta_T(d) = \frac{1}{1 + (\frac{d_{50}}{d})^\beta} \quad (4)$$

여기서, η_T 는 이론 모델에 의해 계산된 사이클론의 효율, d_{50} 은 사이클론의 분리입경(cut diameter), α 및 β 는 사이클론의 형상, 입자 및 작동 유체(working flow)의 특성 및 운전 조건 등에 의해 결정되는 상수이다. C_c 는 미끄럼 보정계수(slip correction factor)이며 아래와 같이 계산된다.

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d} [2.34 + 1.05(-0.39 \frac{d}{\lambda})] \quad (5)$$

여기서, λ 는 작동 유체의 평균자유행정(mean free path)을 의미한다. 이론적으로 상수 α 와 β 는 계측장비의 함수는 아니다. 하지만, APS와 OPC를 통해 측정된 효율 $\eta_{E,APS}$ 와 $\eta_{E,OPC}$ 은 두 계측장치에서 정의하는 입경의 차이에 따라 서로 다르다. 따라서 본 연구에서는 상수 α 와 β 를 계측장비에 대한 함수로 정의하였으며, 계측장비에 따라 다른 값을 사용하였다. 세 가지 이론 모델에 대하여 실험 데이터와의 결정계수(R^2)를 수식 6을 통해 계산 한 후, 가장 높은 한 개의 모델을 선정하여 이후의 데이터 분석에 사용하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\eta_{T,i}(d) - AVG(\eta_{E,i}))^2}{\sum(\eta_{E,i}(d) - AVG(\eta_{E,i}))^2} \quad (6)$$

여기서, $AVG(\eta_{E,i})$ 는 각 계측장비를 이용해 측정된 사이클론의 평균 효율을 의미한다. 동일한 형상을 가진 사이클론은 동일한 작동환경에서 동일한 입자를 대상으로 항상 같은 효율을 가져야 한다. APS와 OPC를 통해 계산된 입경별 사이클론 효율이 같다고 가정하면, 아래와 같이 광학직경의 공기역학경 변환식을 도출할 수 있다.

$$\eta_{T,APS}(d_{APS}) = \eta_{T,OPC}(d_{OPC}) \quad (7)$$

$$d_{OA} = d_{APS} = \eta_{T,APS}^{-1}(\eta_{T,OPC}(d_{OPC})) \quad (8)$$

여기서, d_{OA} 는 공기역학경으로 변환된 광학 직경을 의미하며, η_T^{-1} 은 사이클론 효율 예측 모델의 역함수이다. 수식 8에 의해 공기역학경으로 변환된 OPC의 사이클론 유입구 수농도($C_{in}(d_{OA})$)와 APS의 사이클론 유입구의 수농도($C_{in}(d_{APS})$)를 비교하였으며, Chien et al.(2016)의 연구 결과와의 비교 평가를 통해 제안 방법을 검증하였다. 이때, 정량적인 평가를 위해 APS 사이클론 유입구 수농도 데이터를 수식 9를 이용해 로그 정규 분포(log normal distribution)로 수식화 하였으며, 로그 정규 분포와 $C_{in}(d_{OA})$ 간 결정계수를 산출하여 공기역학경으로 변환된 OPC 입경 분포와 APS 입경 분포 간 상관관계를 살펴보았다.

$$C_{in,APS}(d_{APS}) = \frac{C_{tot}}{d_{APS}\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d_{APS} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

여기서 C_{tot} 은 총수농도, μ 는 평균 직경, σ 는 표준 편차를 의미한다. 한편, 서로 다른 측정 채널을 가진 두 계측장비의 입경별 수농도를 비교하기 위해서는 아래 수식을 이용해 입경별 수농도를 정규화(normalization)해야 한다.

$$\frac{dC_{i,n,i}(d_i)}{d\log d_i} = \frac{dC_{i,n,i}(d_i)}{\log d_{i,up} - \log d_{i,down}} \quad (10)$$

여기서, $d_{i,up}$, $d_{i,down}$ 은 각각의 측정 채널에서 상위 직경과 하위 직경을 의미한다. 본 연구에서는 수식 8에 의해 d_{OPC} 가 d_{O4} 로 변환하는 과정에서 각 채널의 상위 직경과 하위 직경도 변하게 되므로, 데이터 분석 시 이를 반영하였다.

3. 실험결과

3.1 입경 분포 및 축류형 사이클론 효율 특성

NaCl 입자 대상 APS와 OPC로 측정된 사이클론의 유입구 수농도와 효율을 그림 2에 나타냈다. OPC로 측정된 입자의 수농도는 약 1123.5#/cm³로 APS 측정 농도(약 979.6#/cm³)에 비해 약 15% 더 많았다. 특히 APS의 0.523 μ m 이하 영역에서의 수농도는 약 478#/cm³ 입에 반해, OPC의 0.488 μ m 이하 영역 수농도는 약 852.4#/cm³로 큰 차이를 보였다. 이는 APS의 최소 측정 입경이 광학직경 기준 0.37 μ m 입에 반해 OPC는 0.253 μ m로 더 작기 때문인 것으로 예상 된다. APS는 측정하지 못하지만 OPC로 측정되는 영역인 광학직경 0.253 ~ 0.352 μ m 영역에서 OPC로 측정된 수농도는 약 494.6#/cm³이었으며, 이를 제외하면 APS 측정 가능 영역에서 OPC 측정 농도는 약 628.9#/cm³로, APS 측정 농도보다 낮았다. 특히 광학직경 기준 0.53 ~ 1.68 μ m 영역에서 측정 편차가 컸으며, 이는 직경 1.0 ~ 2.5 μ m의 PSL 입자를 대상으로 한 기존의 연구결과와 유사하였다(Kim et al., 2012). 기하평균직경(geometric mean diameter)과 기하표준편차(geometric standard deviation)는 APS의 경우 약 0.87 μ m과 1.53, OPC의

경우 약 0.42 μ m과 1.63으로, OPC에 비해 APS가 시험 입자를 더 크고 좁은 범위로 측정하였다. 이는 APS는 유입되는 입자를 공기역학적 기준 0.523 ~ 20.52 μ m 영역에서 51개의 채널로 분류함에 반해 OPC는 광학 직경 기준 0.253 ~ 41.43 μ m 영역에서 31개의 채널로 분류하기 때문에 판단된다. 수식 9를 이용해 계산된 로그 정규 분포와 APS 입경 분포 간의 결정계수는 0.999로 매우 강한 상관관계를 보였다.

사이클론의 분리입경은 APS에서 약 1.14 μ m로 계산되었으며 이는 OPC에서 계산된 분리입경 0.67 μ m에 비해 약 1.7배 컸다(그림 2(b)). 또한 OPC로 측정된 효율이 APS로 측정된 효율에 비해 입경에 따른 변화 폭이 더 큰 특성을 보였다. 이는 두 계측장치에서 사용되는 입자의 정의 차이에 의한 것으로 판단되며, OPC로 측정되는 광학직경이 APS로 측정되는 공기역학적보다 더 작다는 것을 의미한다.

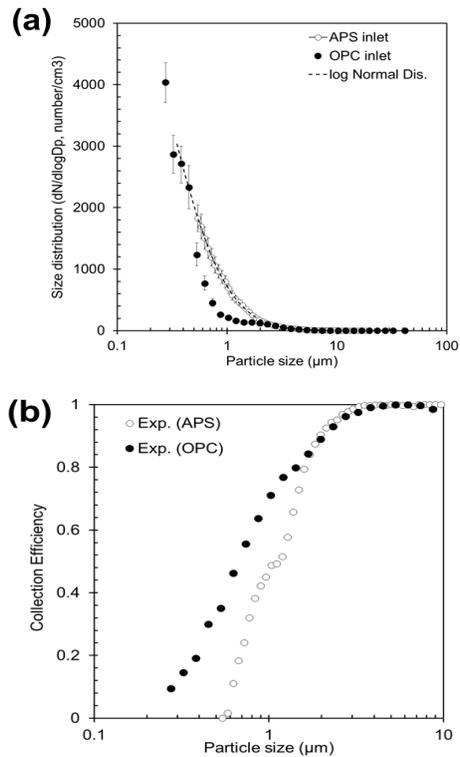


Figure 2. (a) Inlet number concentrations, and (b) collection efficiencies measured by APS and OPC

3.2 사이클론 효율 데이터 수식화

세 가지 이론 모델에 대하여 APS 측정 효율과 OPC 측정 효율 각각에 대한 결정계수를 살펴보았다(그림 3). APS 측정 효율과 Lapple 모델, Li&Wang 모델, Iozia&Leith 모델에 대한 결정 계수는 각각 0.925, 0.980(상수 $\alpha=0.49$ 일 때), 0.982(상수 $\beta=3.33$ 일 때)으로 Iozia&Leith 모델의 결정계수가 가장 높았다. OPC 측정 효율과 각각의 이론 모델에 대한 결정 계수는 각각 0.996, 0.978(상수 $\alpha=1.05$ 일 때), 0.997(상수 $\beta=1.84$ 일 때)으로 APS 측정 결과와 동일하게 Iozia&Leith 모델의 결정계수가 가장 높았다. 따라서 공기역학과 광학직경 상관관계는 Iozia&Leith 모델의 결과를 이용하여 도출하였다.

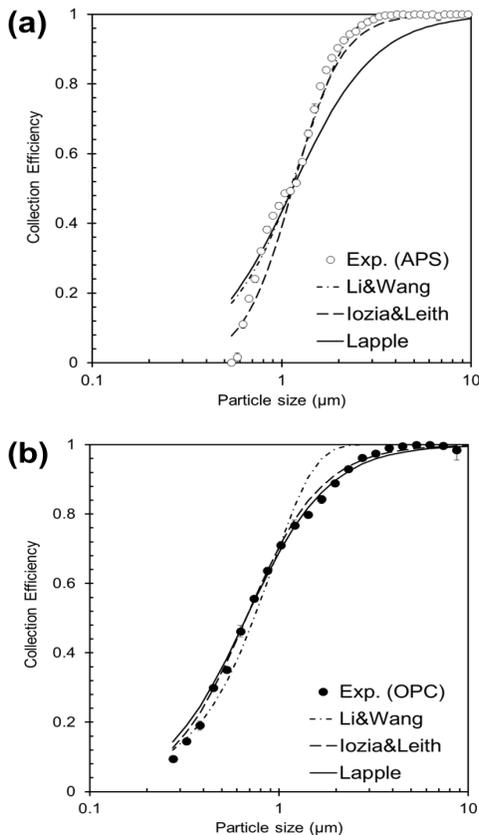


Figure 3. Mathematizations of experimental collection efficiencies obtained by (a) APS and (b) OPC using three theoretical models

3.3 공기역학과 광학직경 상관관계

3.3.1 NaCl 입자대상 상관관계

Iozia&Leith 모델을 이용해 수식화된 함수 $\eta_{T,APS}$ 와 $\eta_{T,OPC}$ 를 수식 8에 대입하여, 아래와 같이 공기역학과 광학직경의 상관관계를 도출하였다.

$$d_{OA} = d_{50,APS} \left(\frac{d_{50,OPC}}{d_{OPC}} \right)^{-k} \quad (11)$$

여기서, $d_{50,APS}$ 와 $d_{50,OPC}$ 는 각각 APS와 OPC를 통해 측정된 사이클론의 분리입경을 의미하며, 상수 k 는 Iozia&Leith 모델에서 APS 효율 데이터 수식화를 위해 사용된 상수 β 의 값과 OPC 효율 데이터 수식화를 위해 사용된 상수 β 의 값의 비($\beta_{OPC} / \beta_{APS}$)를 의미한다. 수식 11을 이용해 OPC의 광학직경을 공기역학경(d_{OA})으로 변환하였을 때 입경별 사이클론 효율을 그림 4(a)에 도시하였다. 입자 직경을 공기역학경으로 변환한 OPC 효율 데이터의 분리입경은 약 $1.14\mu\text{m}$ 로 APS 데이터의 분리입경과 동일하였으며, APS 효율 데이터를 기준으로 한 Iozia&Leith 모델($\eta_{T,APS}$)과의 결정계수가 0.997로 높은 상관관계를 가졌다. 사이클론 유입부에서의 입자 농도의 경우, 직경 $1\mu\text{m}$ 이하의 영역에서 OPC 입경 분포가 APS입경 분포에 비해 과측정 되는 것으로 나타났다(그림 4(b)). 과측정 비율은 입자의 크기가 작아질수록 커지는 경향을 보였으며, 변환 전 OPC 입경 분포와 APS 입경 분포에서의 차이 보다 컸다. 이는 변환된 OPC 입경 분포를 수식 10을 통해 정규화하는 과정에서 각각의 측정채널에서의 상위 직경과 하위 직경의 로그 값의 차이가 기존 0.071에서 0.047로 작아졌기 때문으로 판단된다. 하지만 직경 $1\mu\text{m}$ 이상의 영역에서 변환된 OPC 입경 분포와 APS 입경 분포는 유사한 경향을 보였다. 변환된 OPC 입경 분포는 APS의 로그 정규 분포 곡선과 결정계수 0.927으로, Chien et al.(2016)의 제안 수식으로 변환하였을 때의 결과인 0.806 보다 높았다(그림 4(c)).

3.3.2 ISO 표준 입자 대상 상관관계

제안한 시험 방법을 이용하여 ISO 표준 입자인 A1, A2, A4 시험 입자를 대상으로 광학직경과 공기역학경의 상관관계를 살펴보았으며, 그 결과를 그림 5에 나타

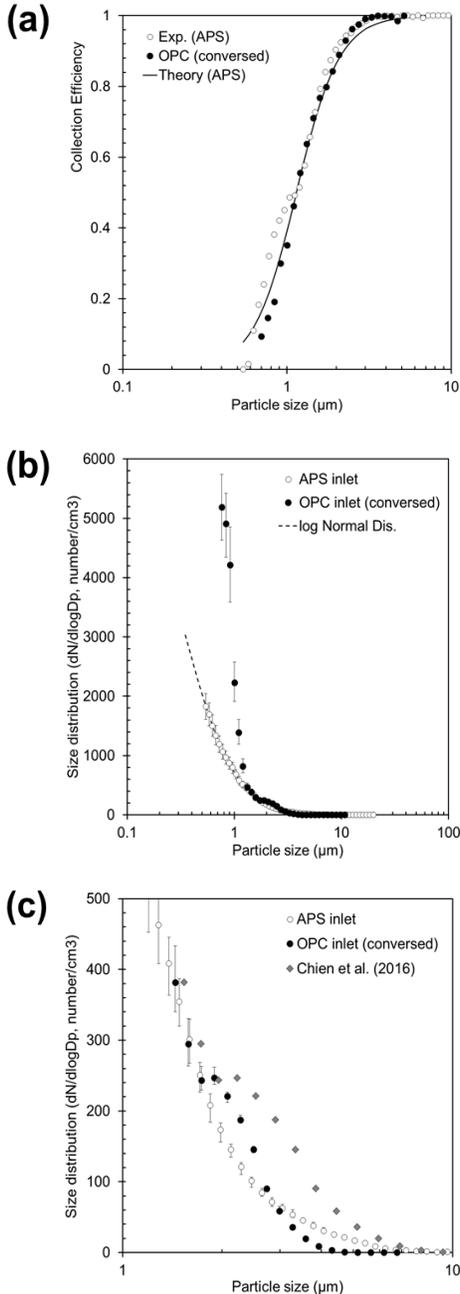


Figure 4. Comparisons between converted OPC data and APS data; (a) cyclone efficiency, (b) inlet particle size distribution, (c) inlet particle size distribution in the range of 1 to 10μm

났다. 시험 입자의 종류와 무관히 모든 실험에서 공기역학적으로 변환된 OPC 사이클론 효율은 APS 사이클론 효율 기준 Iozia&Leith 모델과 결정계수 0.99 이상의 강한 상관관계를 보였으며, 공기역학적으로 변환된 OPC 분리입경 또한 APS 분리입경과 정확히 일치하였다. 입경별 수농도의 경우 NaCl 입자 대상 실험과 유사하게 공기역학경 1μm 이하의 영역에서 두 계측장치 간의 데이터 편차가 존재하였으며, 직경 1μm 이상의 영역에서 변환된 OPC 입경 분포와 APS 입경 분포 사이의 유사성이 관측되었다. 시험 입자 A1, A2, A4에 대하여 각각의 변환된 OPC 입경 분포에 대응하는 APS 로그 정규 분포 곡선과의 결정계수는 0.75, 0.86, 0.89로, Chien et al.(2016)의 제안 수식에 따른 결과 0.57, 0.86, 0.75보다 다소 높았다. 본 연구에서 사용된 시험 입자별 상수 및 결정계수를 표 1에 정리하였다.

Table 1. Experimental constants and R-squared values for various test particles

test particle	NaCl	ISO test dust		
		A1	A2	A4
κ	0.65	0.73	0.72	0.57
$d_{50,APS}$	1.14	0.82	1.01	1.04
$d_{50,OPC}$	0.67	0.59	0.63	0.68
R^2 to APS data (for $d_{OA} > 1\mu m$)	0.93	0.75	0.86	0.89

4. 결론

본 연구에서는 축류형 사이클론을 이용하여 공기역학과 광학직경의 상관관계를 살펴보았다. APS와 OPC를 이용하여 사이클론 효율을 측정하였으며, 이론 모델을 이용하여 사이클론 효율로부터 공기역학과 광학직경의 상관관계를 수식화하였다. NaCl 입자 대상 실험에서, 본 연구 제안 수식을 이용해 광학직경을 공기역학적으로 변환할 시, OPC를 이용하여 측정한 입경 분포는 입경 1μm 이상의 영역에서 APS의 입경 분포와 결정계수 0.93으로 높은 상관관계를 보였다. ISO A1, A2, A4 시험 입자를 대상으로 진행된 실험에서도 변환된 OPC 입경 분포는 APS 입경 분포와 유사한 경향을 보였으며, A1, A2, A4 각 시험 입자에 대하여,

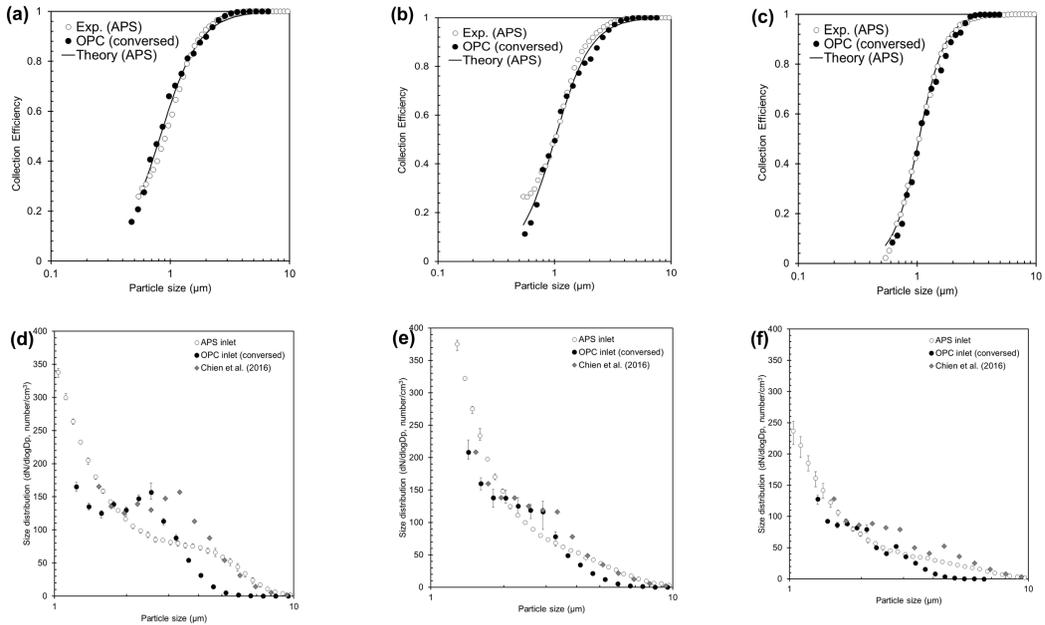


Figure 5. Comparisons between converted OPC data and APS data in cyclone collection efficiency under (a) ISO test dust A1, (b) ISO test dust A2, (c) ISO test dust A4, and in inlet particle size distribution under (d) ISO test dust A1, (e) ISO test dust A2, (f) ISO test dust A4.

APS 입경 분포와의 결정계수는 각각 0.75, 0.86, 0.89 이었다. 본 연구에서는 다양한 입자를 대상으로, 한 번의 실험을 통해 광학직경을 공기역학경으로 변환하는 방법을 제시하였다. 제안된 시험 방법은 입경 1 μm 이상의 영역에서 Chien et al.(2016)의 기존 연구결과보다 유효하였다. 하지만, 입경 1 μm 이하 영역에서는 변환된 OPC 입경 분포와 APS 입경 분포 간 차이가 있었다. 이는 APS와 OPC의 최소 측정 입경의 차이, 광학직경의 공기역학경으로의 변환 시 측정 채널의 상위 직경과 하위 직경의 로그 값 차이의 변화 등에서 기인한 것으로 예상된다. 또한 각 시험 입자별로 제안된 시험 방법의 정확도(결정계수)의 차이가 존재하였으며, 이는 시험 입자 간 산란계수, 형상 계수(shape factor) 등의 차이에 의한 것으로 예상된다. 따라서, 보다 정밀한 상관관계 도출을 위해서는 입경 1 μm 이하 영역의 입자 및 입자의 산란계수, 형상계수 등을 고려한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원으로 수행하였고, 이에 감사드립니다(grant no. 20007027).

References

- Binnig, J., Meyer, J., and Kasper, G. (2007). Calibration of an optical particle counter to provide PM_{2.5} mass for well-defined particle materials, *Journal of aerosol science*, 38(3), 325-332.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.12.001>
- Chien, C.H., Theodore, A., Wu, C.Y., Hsu, Y.M., and Birky, B. (2016). Upon correlating diameters measured by optical particle counters and aerodynamic particle sizers, *Journal of Aerosol Science*, 101, 77-85.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2016.05.011>
- Duan, H., Romay, F., Syedain, Z., Liu, B.Y.H., and Naqwi, A. (2016). A new monodisperse droplet generator and its applications, In ILASS Americas 28th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Dearborn, MI.
- Heyder, J., and Gebhart, J. (1979). Optimization of response functions of light scattering instruments for size evaluation of aerosol particles, *Applied Optics*, 18(5), 705-711.
<https://doi.org/10.1364/AO.18.000705>
- 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(12), 1019-1031.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.07.006>
- Hand, J.L., and Kreidenweis, S.M. (2002). A new method for retrieving particle refractive index and effective density from aerosol size distribution data, *Aerosol Science & Technology*, 36(10), 1012-1026.
<https://doi.org/10.1080/02786820290092276>
- Iozia, D.L., and Leith, D. (1990). The logistic function and cyclone fractional efficiency, *Aerosol Science and Technology*, 12(3), 598-606.
<https://doi.org/10.1080/02786829008959373>
- Kulkarni, P., Baron, P.A., and Willeke, K. (2011). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*, John Wiley & Sons.
- Kim, D.-Y., Chung, H., Park, J.-H., Hyeon J.-H., and Hwang, J. (2012). Comparison Study of the TSI Aerodynamic Particle Sizer 3321, Grimm Aerosol Spectrometer 1.109 and HCT Particle Sensor 3030 for PM_{2.5} measurement, *PARTICLE AND AEROSOL RESEARCH*, 8(1), 9-15.
- Lapple, C.E. (1950). Gravity and centrifugal separation, *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, 11(1), 40-48.
<https://doi.org/10.1080/00968205009344283>
- Li, E., and Wang, Y. (1989). A new collection theory of cyclone separators, *AIChE Journal*, 35(4), 666-669.
<https://doi.org/10.1002/aic.690350419>
- Matsoukas, T. (1994). Charge distributions in bipolar particle charging, *Journal of aerosol science*, 25(4), 599-609.
[https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90001-9)
- Mitchell, J.P., and Nagel, M.W. (1999). Time-of-flight aerodynamic particle size analyzers: their use and limitations for the evaluation of medical aerosols, *Journal of aerosol medicine*, 12(4), 217-240.
<https://doi.org/10.1089/jam.1999.12.217>
- Sang-Nourpour, N., and Olfert, J.S. (2019).

Calibration of optical particle counters with an aerodynamic aerosol classifier, *Journal of Aerosol Science*, 138, 105452. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105452>

Volckens, J., and Peters, T.M. (2005). Counting and particle transmission efficiency of the aerodynamic particle sizer, *Journal of Aerosol* <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.03.009>