

블랙카본 측정기용 초소형 사이클론 집진기 개발

안익현*, 임준형*, 이효영**, 육세진*[#]

*한양대학교 기계공학부, **SCINCO Co.,Ltd

Development of a Miniature Aerosol Separator for a Black Carbon Measuring Instrument

Ik-Hyun An*, Jun-Hyung Lim*, Hyo-Young Lee**, Se-Jin Yook*[#]

*School of Mechanical Engineering, Hanyang UNIV., **SCINCO Co.,Ltd.

(Received 23 September 2020; received in revised form 08 November 2020; accepted 11 November 2020)

ABSTRACT

Given the increasing interest in air pollution, several technologies to measure black carbon (BC) aerosol particles have been developed. As most BC aerosol particles are smaller than 1 μm , it is necessary to pre-separate the particles by size before a BC measuring instrument samples the aerosol particles. In this study, a miniature cyclone separator for portable BC measuring instruments was developed. A numerical approach was used to design the miniature cyclone separator with operating flow rates of 50, 100, or 150 mLPM, and then a prototype cyclone separator was manufactured for experimental validation. The numerical results of the cut-off size and pressure drop of the miniature cyclone separator agreed well with the experimental data. The cut-off sizes of the miniature cyclone separator were determined to be 2.9, 0.94, and 0.63 μm for operating flow rates of 50, 100, and 150 mLPM, respectively. Thus, the miniature cyclone separator is suitable for use as a sampling inlet for the portable black carbon measuring instrument to sample BC aerosol or PM_{2.5} aerosol.

Key Words : Cyclone Separator(사이클론 집진기), Collection Efficiency(포집효율), Black Carbon(블랙카본), Cut-off Diameter(절단직경), PM_{2.5}(초미세먼지)

1. 서 론

전 지구적인 기후변화 및 인체 건강에 악영향을 미치는 물질 중 하나인 블랙카본(Black Carbon, 이하 BC)은 승용차나 버스 등의 엔진연소 과정에서 발생하거나, 석유나 석탄을 연료로 사용하는 발전 시설 또는 여러 물질을 태우는 소각장 등에서 발생한다^[1,2]. 이러한 BC를 모니터링 하는 기술들이 속

속 개발되고 있고, 특히 기존의 설치형 모니터링 장비와 달리 다양한 장소에서 BC 농도를 측정할 수 있는 휴대용 측정기가 개발되고 있는 추세이다. 발생 원인에 따라 BC 입자의 크기가 다양하지만 일반적으로 1 μm 이하인 것으로 알려져 있다^[3]. 모니터링 장비의 측정 오차에 영향을 줄 수 있는 큰 입자를 미리 제거하고 작은 입자만 BC 측정기에 유입되어야 BC 농도를 정확히 측정할 수 있다. 휴대 가능한 BC 측정기는 작동 유량이 매우 적기 때문에 이에 맞는 초소형 사이클론 집진기의 개발이 필요하다.

Corresponding Author : ysjnuri@hanyang.ac.kr

Tel: +82-2-2220-0422, Fax: +82-2-2220-2299

사이클론 집진기는 원통형 구조 내에서 생기는 회전 기류로 인해 발생하는 원심력을 이용하여 에어로졸 입자를 크기에 따라 분리하는 장치이다. 사이클론 집진기는 산업용부터 가전제품인 진공청소기에 이르기까지 다양한 분야에서 쓰이고 있다^[4,5]. 사이클론 집진기의 포집효율 곡선은 일반적으로 S자 형태로 나타나며, 포집효율이 50%에 해당하는 입자 크기를 절단직경(cut-off size)이라고 한다. 대기 중 초미세먼지(PM_{2.5})를 샘플링하기 위해서는, 공기역학적 직경 2.5 μm 에 해당하는 절단직경을 가지며 분립 효율이 매우 높은 사이클론 집진기가 필요하다. Kenny & Gussman은 에어로졸 샘플러용으로 sharp-cut cyclone (SCC)과 extra-sharp-cut cyclone (ESCC)을 개발하였다^[6,7]. Moore & Mcfarland는 사이클론 집진기의 크기에 따른 집진 성능을 연구하여 사이클론 집진기의 크기와 vortex finder의 직경이 감소함에 따라 절단직경이 감소하는 것을 발견하였으나, 이전에 개발된 사이클론 집진기 형상들이 산업용의 비교적 큰 크기로 개발되었기 때문에 소형 사이클론 집진기의 성능을 예측하는데 어려움이 있을 것으로 예측하였다^[8,9]. 최근에는 다양한 장소에서 에어로졸 농도를 모니터링하기 위해 휴대용 장비가 많이 개발되고 있는데, 이러한 휴대용 장비는 샘플링 유량이 매우 낮은 특징을 가지고 있다. PM_{2.5} 또는 sub-micron 입자를 모니터링하기 위해서는 큰 입자가 사전에 제거되어야 하므로, 낮은 유량에서 작동하는 소형화된 사이클론 집진기가 필요하다. Hasiao 등은 mini-CPC의 샘플링 유량인 0.3 LPM에서 작동되고 절단직경이 1.0, 0.3 μm 인 소형 사이클론 집진기를 개발하였다^[10]. 그러나, 본 연구에서 대상으로 하는 휴대용 BC 측정기(Fig. 1 참조)는 샘플링 유량이 50~150 mLPM 수준이어서 기존 연구 대비 더 작은 초소형 사이클론 집진기의 개발이 필요하다.

수십 년에 걸쳐서 사이클론 집진기의 포집효율과 절단직경을 예측할 수 있는 수치해석 모델이 다양하게 개발되어 왔다^[11-15]. Lapple은 입자의 체류시간을 이용하여 사이클로 입구 폭과 절단직경간의 관계를 예측하는 모델을 제시하였다^[11]. Barth는 사이클론 집진기의 코어 영역에서 원심력과 입자에 작용하는 항력의 상대적인 크기로부터 절단직경을



Fig. 1 Photo of a portable black carbon monitor

예측하였다^[12]. Iozia & Leith는 사이클론 집진기의 입구면적, 높이, 유량의 변화에 따라 사이클론 집진기 내부에서의 집진속도 분포를 측정하고 이를 바탕으로 절단직경을 예측하는 식을 제시하였다^[13,14]. 사이클론 집진기를 설계하는 방법은 이론적 모델 및 통계적 모델 외에도 전산유체역학(CFD)을 이용하는 방법이 널리 사용된다. CFD 시뮬레이션은 사이클론 집진기 내에서의 유동 특성을 관찰할 수 있고 입자의 궤적을 예측할 수 있기 때문에 높은 잠재력이 있는 기술이다^[15]. 많은 수치해석 모델들이 사이클론 집진기 설계에 적용되었고, 이 중 Reynolds Stress Model (RSM)이 사이클론 집진기 내부의 난류 유동을 잘 모사하는 것으로 알려져 있다^[16].

사이클론 집진기와 관련하여 많은 연구들이 이루어졌지만, 대체로 산업용으로 개발되었고 일부는 소형으로 개발되었으나 본 연구에서 목표로 하는 150 mLPM 이하의 유량에서 작동하는 사이클론 집진기의 개발은 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는, Fig. 1에 나타난 휴대용 BC 측정기용으로 사용될 수 있는 초소형 사이클론 집진기를 개발하였다.

2. 수치해석 방법

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 휴대용 BC 측정기(SCAB, SCINCO, Seoul, Republic of Korea)의 사진이며, 샘플링 유량은 50, 100, 150 mLPM으로 설정하였다. BC 입자의 크기가 대체로 1 μm 이하이므로, 사이클론 집진기의 절단직경으로 1 μm 또는 초미세먼지를 고려하여 2.5 μm 를 목표로 설

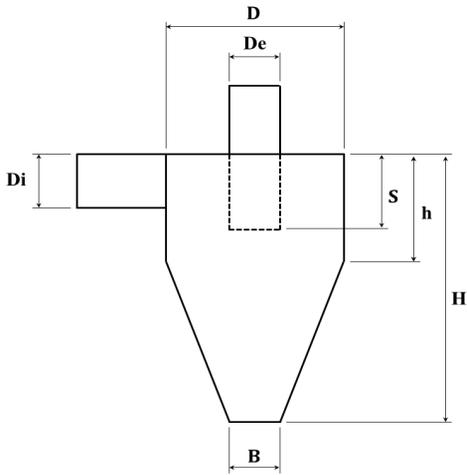


Fig. 2 Geometric parameters of the miniature cyclone separator

Table 1 Dimensions of the miniature cyclone separator

Geometric Parameter	Di	De	D	S	H	h	B
Value (mm)	0.6	0.6	2.1	0.7	2.2	0.7	0.6

정하였다. BC 측정기의 크기(110×64×35 mm)와 샘플링 유량을 고려하여, 초소형 사이클론 집진기의 형상과 크기를 Fig. 2와 Table 1에 나타낸 바와 같이 설계하였다. 본 연구에서 설계한 소형 사이클론 집진기는 sharp-cut cyclone (SCC)를 기반으로 설계하였다⁴⁾.

사이클론 집진기의 성능을 예측하기 위해 상용 CFD 코드인 ANSYS FLUENT Release 18.0을 사용하였다. 작동 압력과 온도를 각각 101.3 kPa, 300 K으로 설정하였다. 유동은 정상상태, 비압축성, 난류인 것으로 가정하였다. 난류 해석을 위해 사이클론 집진기의 회전유동을 가장 잘 모사하는 것으로 알려진 Reynolds Stress Model (RSM)을 사용하였다. 해석에 사용된 pressure-velocity coupling scheme, pressure interpolation scheme, momentum equation scheme으로 각각 SIMPLEC, PRESTO, QUICK을 사용하였고, 모든 방정식의 수렴 조건으로 10^{-3} 을 적용하였다. 사이클론 집진기 내부의 모든 벽면에

no-slip 조건을 적용하였다. Grid independence test를 통해 결정된 격자수는 약 50만개였다. 입자의 포집 효율을 구하기 위해 FLUENT에 내장된 입자 해석 코드인 Discrete Phases Models (DPM)을 사용하였다. 일반적인 대기 에어로졸 수농도를 고려하여 사이클론 집진기 내에서의 입자 수농도가 충분히 낮은 것으로 가정하였고, 이에 따라 입자의 거동이 유동에 미치는 영향은 무시하였다. 입자의 공기역학적 크기(aerodynamic size)를 고려하기 위해, 입자는 구형인 것으로 가정하였고 입자의 밀도는 1000 kg/m^3 로 설정하였다. 입자의 거동에 영향을 주는 힘으로 Stokes drag force, Brownian force, gravitational force, 그리고 Saffman lift force를 고려하였다. 난류에 의한 입자의 확산을 고려하기 위해 Discrete Random Walk Model을 사용하였다.

3. 실험 방법

수치해석을 통해 설계된 초소형 사이클론 집진기를 알루미늄 재질을 사용하여 제작하였고 그 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 제작된 초소형 사이클론 집진기는 유입구가 포함된 몸통, 출구, 그리고 먼지통의 3가지 부분으로 이루어졌다. Fig. 4는 초소형 사이클론 집진기의 포집효율을 측정하기 위한 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다. Solid Aerosol Generator (SAG 410, TOPAS, Dresden, Saxony, Germany)를 사용하여 Arizona Test Dust (ISO 12103 -1, A4 type)을 에어로졸로 발생하였다. 에어로졸의 유량을 측정하기 위해 Laminar Flow Meter를 사용하였고, 사이클론 집진기로 유입되는 에어로졸의 유량은 50, 100, 150 mLPM으로 설정하였다. Solid

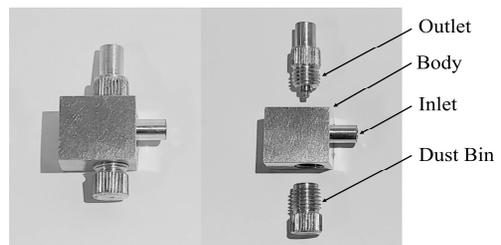


Fig. 3 Photo of the miniature cyclone separator designed and manufactured in this study

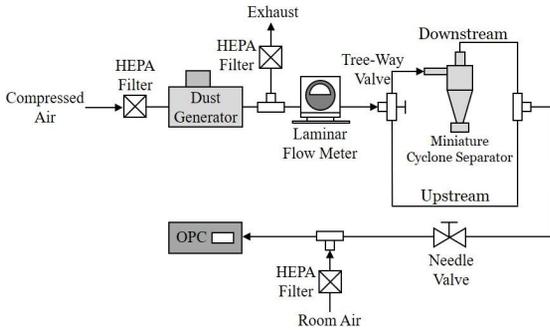


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

Aerosol Generator에서 발생하는 에어로졸 중에서 일부만 사이클론 집진기로 유입되고, 나머지는 HEPA 필터를 거쳐 공기 중으로 배기되었다. Optical Particle Counter (OPC; Model 1.109, GRIMM, Ainring, Bayern, Germany)를 사용하여 에어로졸의 수농도를 측정하였고, three-way 밸브를 사용하여 사이클론 집진기의 상류 또는 하류로부터의 에어로졸을 OPC로 유입되도록 하였다. OPC의 작동 유량이 1.2 LPM으로 사이클론 집진기의 작동 유량보다 크기 때문에, 사이클론 집진기로부터의 유량 이외에 부족한 유량은 HEPA 필터로 여과된 particle-free air를 사용하여 1.2 LPM 조건을 만족시켰다. 실험에 의한 포집효율(η)은 다음의 식을 사용하여 구하였다.

$$\eta = 1 - \frac{C_{downstream}}{C_{upstream}} \quad (1)$$

여기서, $C_{downstream}$ 과 $C_{upstream}$ 은 각각 사이클론 집진기의 하류와 상류에서 측정된 에어로졸의 수농도이다. Arizona Test Dust의 밀도는 2560 kg/m^3 이고 dynamic shape factor는 1.4이므로, 이를 고려하여 OPC로 측정된 입자 크기를 공기역학적 크기로 변환하였다.^[17] 한편, pressure transmitter (AMI310, KIMO, Montpon, Dordogne, France)를 사용하여 사이클론 집진기의 유입구와 출구간의 압력강하를 측정하였다.

4. 결 과

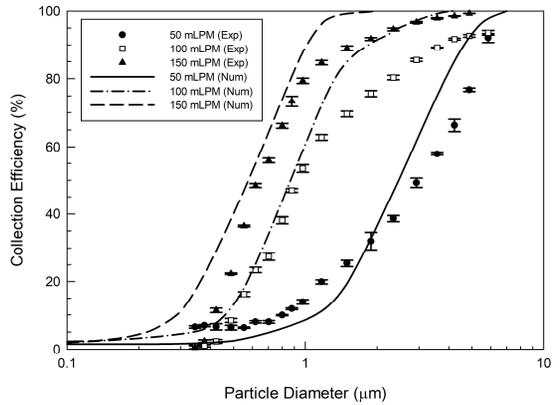


Fig. 5 Comparison of collection efficiency between numerical results and experimental data

Fig. 5는 본 연구에서 개발한 초소형 사이클론 집진기의 유량에 따른 포집효율 나타낸 것이다. 수치해석으로 구한 포집효율과 실험 결과가 매우 유사한 것으로 나타났고, 이로부터 본 연구에서 사용된 수치해석 방법을 통한 설계가 신뢰성이 있는 것으로 확인되었다. 실험 결과로부터 작동 유량이 많아질수록 절단직경이 작아져서, 작동 유량이 50, 100, 150 mLPM일 때 절단직경이 각각 2.9, 0.94, 0.63 μm 인 것으로 나타났다. 특히, 작동 유량이 50 mLPM일 때에는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 샘플링이 가능하고, 100 mLPM의 유량인 조건에서는 1 μm 이하 크기 입자의 샘플링이 가능한 것으로 나타났다.

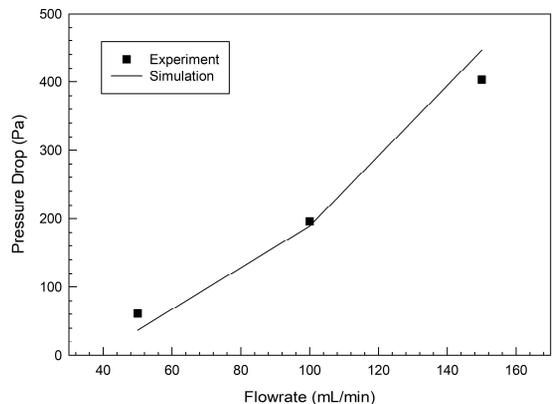
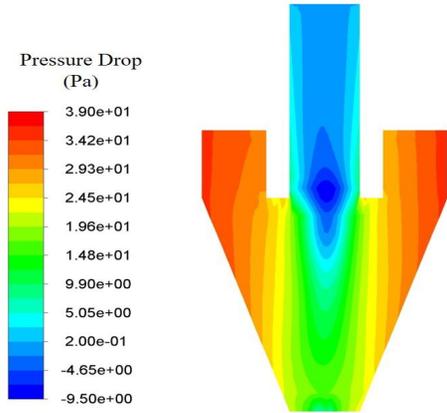
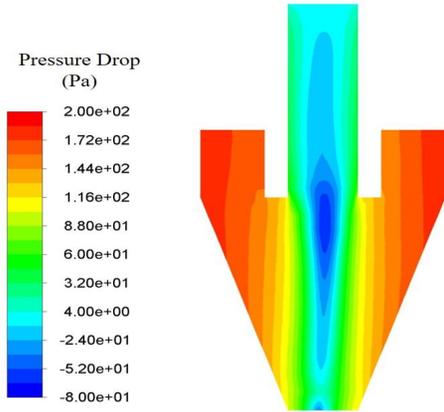


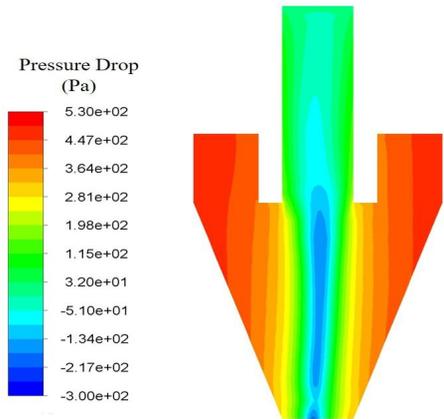
Fig. 6 Comparison of pressure drop between numerical results and experimental data



(a) 50 mLPM



(a) 100 mLPM



(a) 150 mLPM

Fig. 7 Numerical result of pressure distribution according to flow rate

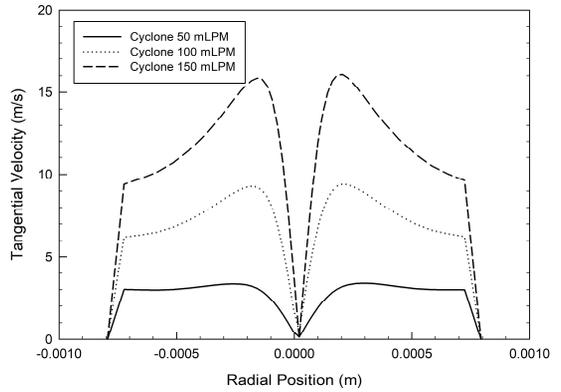


Fig. 8 Tangential velocity distribution of the air flow in the miniature cyclone separator

Fig. 6은 초소형 사이클론 집진기로 유입되는 에어로졸의 유량에 따른 압력강하를 나타낸 그래프이며, 수치해석과 실험 결과가 잘 일치하였다. 작동 유량이 많아질수록 압력강하가 커지는 것으로 나타났다으므로, 이를 참고하여 휴대용 BC 측정기에 사용되는 내부 펌프의 용량을 선정할 수 있다. Fig. 7은 작동 유량 별로 사이클론 집진기 내에서 발생하는 압력분포의 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 모든 유량에 대하여 사이클론 집진기의 중심부에 압력이 낮은 영역이 형성되고 바깥 cylinder와 cone 벽면으로 갈수록 압력이 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 cylinder의 상부에서 접선 방향으로 고속 유입된 에어로졸이 바깥 cylinder와 cone 벽면을 따라 고속으로 회전하면서 사이클론 집진기의 바닥면을 향해 하강한 뒤 가운데 상부에 있는 vortex finder를 통해 빠져나가는 유동이 형성되었기 때문이다.

Fig. 8은 사이클론 집진기의 바닥면으로부터 1.1 mm 높이에 위치한 지점에서 측정된 유동의 접선속도 분포를 나타내는 것이다. 사이클론 집진기로 유입된 에어로졸의 유량이 50 mLPM일 때에는 중심부와 최외각 영역을 제외하고 모든 지점에서 접선속도가 거의 일정하게 형성되었지만, 작동 유량이 커질수록 중심으로부터 0.00016 m 지점에서 접선속도가 최대가 되는 것으로 나타났다. 작동 유량이 50, 100, 150 mLPM인 경우에 있어서 접선속도의 최댓값은 각각 3.4, 9.4, 15.8 m/s로 나타났다. 이처럼 작동 유량이 커질수록 접선속도가 빨라지고, 이

로 인해 입자에 작용하는 원심력이 커져서 더 작은 크기의 입자를 관성에 의해 분리하게 되어 절단직경이 작아지게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 휴대 가능한 BC 측정기용 sampling inlet겸 pre-separator로 사용될 수 있는 초소형 사이클론 집진기를 수치해석을 통해 설계하였고, 이후 실물 제작 및 성능 평가 실험을 진행하여 사이클론 집진기의 포집효율 및 압력강하를 측정하였다. 본 연구에서 개발된 초소형 사이클론 집진기는 작동 유량이 50 mLPM 또는 100 mLPM 인 경우 각각 PM_{2.5}의 초미세먼지 또는 1 µm 이하의 입자만 선택적으로 분리할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서 개발된 초소형 사이클론 집진기는 휴대용 BC 측정기 이외에도 작동 유량이 매우 낮은 다른 에어로졸 측정기용 sampling inlet으로도 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업(그린패트를 측정기술개발사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. UNEP and WMO, Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone, pp. 95-141, 2011.
2. Donkey, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay M. E., Ferris, B. G., Benjamin, G. Ferris, Jr., and Speizer, F. E., "An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities", The New England Journal of Medicine, Vol. 329, pp. 1753-1759, 1993.
3. Clague, A. D. H., Donnet, J. B., Wang, T. K., Peng, J. C. M., "A comparison of diesel engine soot with carbon black", Carbon, Vol. 37, pp. 1553-1565, 1999.
4. Ray, M. B., Luning, P. E., Hoffmann, A. C., Plomp, A., Beumer, M. I. L., "Improving the removal efficiency of industrial-scale cyclones for particles smaller than five micrometre", International Journal of Mineral Processing, Vol. 53, pp. 39-47, 1999.
5. Ahn, Y. C., Jeong, H. K., Shin, H. S., Hwang, Y. J., Kim, G. T., Cheong, S. I., Lee, J. K., Kim, C., "Design and performance evaluation of vacuum cleaners using cyclone technology", Korean Journal of Chemical Engineering, Vol. 23, pp. 925-930, 2006.
6. Kenny, L. C., Gussman, R., Meyer, M., "Development of a sharp-cut cyclone for ambient aerosol monitoring applications", Aerosol Science and Technology, Vol. 32, pp. 491-511, 2000.
7. Kenny, L. C., Gussman, R., "A direct approach to the design of cyclones for aerosol-monitoring applications", Journal of Aerosol Science, Vol. 31, pp. 1407-1420, 2000.
8. Moore, M. E., McFarland, A. R., "Design of Stairmand-type sampling cyclones", American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 51, pp. 151-159, 1990.
9. Moore, M. E., McFarland, A. R., "Performance modeling of single-inlet aerosol sampling cyclones", Environmental science & technology, Vol. 27, pp. 1842-1848, 1993.
10. Haiso, T. C., Chen, D. R., Son, S. Y., "Development of mini-cyclones as the size-selective inlet of miniature particle detectors", Journal of Aerosol Science, Vol. 40, pp. 481-491, 2009.
11. Lapple, C. E., "Gravity and Centrifugal Separation", American Industrial Hygiene Association Quarterly, Vol. 11, No. 1, 40-48, 1950.
12. Barth, W., "Design and layout of the cyclone

- separator on the basis of new investigations”, Brennstoff-Warme-Kraft, Vol. 8, pp. 1-9, 1956.
13. Iozia, D. L., Leith, D., “Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency”, Aerosol Science and Technology, Vol. 10, No. 3, pp. 491-500, 1989.
 14. Iozia, D. L., Leith, D., “The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency”, Aerosol Science and Technology, Vol. 12, No. 3, pp. 598-606, 1990.
 15. Sun, X., Zhang, Z., Chen, D. R., “Numerical modeling of miniature cyclone”, Powder Technology, Vol. 320, pp. 325-339, 2017.
 16. Cortes, C., Gil, A., “Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators”, Progress In Energy And Combusion Science, Vol. 33, pp. 409-452, 2007.
 17. Mohler, O., Benz, S., Saathoff, H., Schnaiter, M., Wagner, R., Schneider, J., and Wagner, S., “The Effect of Organic Coating of the Heterogeneous Ice Nucleation Efficiency of Mineral Dust Aerosols”, Environmental Research Letters, Vol. 3, pp. 1-8, 2008.