

연속적인 곡선으로 정의 되는 볼록한 형상의 사이클론에 대한 연구

허광수[†]·설승윤*·리진철**

A Study of Convex Cyclone with Continuous Curve

Heo Kwang-Su, Seol Seoung-Yun, Li Zhen-Zhe

Key Words: Cyclone(사이클론), Pressure Loss(압력손실), Collection Efficiency(집진효율)

Abstract

A cyclone design concept named Convex cyclone was developed to reduce pressure losses. Contrary to conventional cylinder-on-con type cyclone, inner wall of Convex cyclone are defined with a continuous curve and it has convex shape body. The discontinuity of inner diameter variation rate of cylinder-on-con type cyclone cause additional pressure loss. Continuous wall of Convex cyclone prevent additional pressure loss. In order to verify Convex cyclone design concept, we make a comparative experiments between Stairmand HE and Convex cyclone. Experimental Convex cyclone designed based on Stairmand HE model, and inner wall are defined with circular arch. The experimental result clearly shows that Convex cyclone can achieve maximum 50% pressure loss reduction with a few percent of collection efficiency drop. In addition, the experimental results indicated the existence of optimum convexity, minimum pressure loss, of cyclone wall.

기호설명

- a : 사이클론 유입구 높이(m)
- b : 사이클론 유입구 폭(m)
- A_{in} : 사이클론 유입구 면적(m²)
- D : 사이클론 직경(m)
- D_c : 사이클론 원추 상단 직경(m)
- D_d : 사이클론 먼지출구 직경(m)
- D_x : 사이클론 유출구 직경(m)
- H : 사이클론 높이(m)
- H_c : 사이클론 원추부 높이(m)
- E_u : 무차원 압력손실 (dimensionless)
- ρ_a : 공기 밀도(kg/m³)

1. 서론

사이클론 집진기는 공기 중에 포함된 입자를 분리하기 위해 산업계 전반에서 널리 사용된다. 사이클론은 복잡한 3차원 회전 유동을 형성하므로 사이클론 내의 집진 과정과 압력손실 발생을 완전히 이해하기는 어려운 것이 현실이다. 사이클론의 압력 손실을 예측하기 위한 실험과 이론적 연구가 많은 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁷⁾.

집진효율을 상승시키고 압력 손실을 저감하기 위해 사이클론의 구조를 개선하고자 하는 많은 연구가 수행되어 왔다⁽⁸⁻¹⁹⁾. DeOtte에 의해 접선방향 유입구 대신 다수의 포트를 이용하는 구조가 제안되었으며, 유입구를 포함한 사이클론 구조 개선에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다⁽⁸⁻¹⁶⁾. 다수의 사이클론을 직/병렬로 배치하여 집진효율과 압력 손실을 개선하고자 하는 연구 역시 수행되었다⁽¹⁷⁻¹⁹⁾.

† 전남대학교, 기계공학과
E-mail : kwangsu.heo@gmail.com
TEL : (062)530-0225 FAX : (02)530-1689

* 전남대학교, 기계시스템 공학부

** 전남대학교, 기계공학과

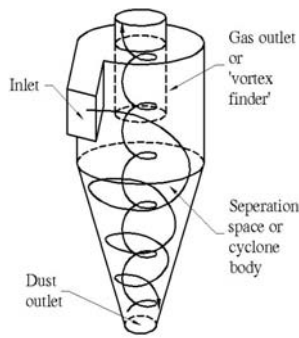


Fig. 1 Sketches of a reverse-flow, cylinder-on-cone cyclone

일반적인 사이클론은 Fig. 1과 같이 원통과 원추로 구성되며, 접선방향 유입구를 가진다. 원통부위는 접선방향 유입구를 통해 형성된 회전유동을 안정시킨다. 원추 부위는 회전유동을 강화하며, 내부 유동방향의 반전을 유도한다.

유체의 흐름에 있어 불연속적이거나 급격한 유로의 변화는 추가적인 압력 손실을 유발한다. 그러므로 현재 사이클론에서 일반적으로 사용되는 형태는 원통과 원추의 연결부위에서 추가적인 압력손실을 유발하는 구조이다. 사이클론에 있어 이러한 실린더-콘 형태가 널리 사용되는 이유는 이러한 구조가 유체역학적으로 최적이지가 아니고 제작이 용이하기 때문으로 파악된다. 그러므로 압력손실을 최소화하기 위해서는 사이클론의 벽면이 하나의 곡선으로 정의되어야 한다.

본 연구에서는 사이클론 내경의 변화율이 연속이 되도록 하나의 곡선으로 외벽이 정의된 사이클론을 설계하였다.

2. 사이클론 설계

곡선의 정의 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 설계 변수를 줄이기 위해 사이클론 상단의 직경 D 와 하단의 먼지출구 D_d 를 잇는 원호로 정의 하였다. 식(1)의 곡선을 완전히 정의하기 위해서는 추가적인 조건이 필요하다.

$$F_w \equiv (x - C_1)^2 + (y - C_2)^2 - C_3^2 \quad (1)$$

at $x = 0$: $y = D_d$
at $x = H$: $y = D$
at $x = H_c$: $y = D_c$

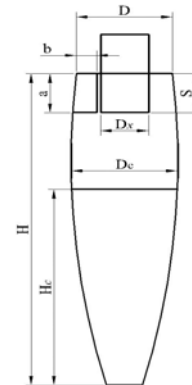


Fig. 2 Designation of Convex cyclone

이 조건은 사이클론 벽면의 만곡도에 관계되는 것으로 일반적인 사이클론의 원추의 상단에 해당하는 위치의 직경을 지시하는 방법을 사용하였다. 이렇게 설계된 사이클론은 Fig. 2와 같이 중단이 불룩한 형상을 가지게 된다. 본 논문에서는 이렇게 설계된 사이클론을 Convex 사이클론이라 칭하겠다. Convex 사이클론과 기존 실린더-콘 형상의 사이클론과의 비교 실험을 위해 Stairmand HE 사이클론에 위의 설계를 적용하였다. Table 1은 Stairmand HE 사이클론의 각 부위 치수이다.

Table 1 Dimensions of Stairmand HE Cyclone

	Dimension (mm)	Ratio
a	16	0.50
b	13.5	0.21
D	32	1.00
D_x	16	0.50
D_d	12	0.38
H	256	3.97
H_c	161	2.50
S	16	0.5

Table 2 Convex Cyclone design data

	D/D_c	Inlet area (mm ²)	Wall radius (mm)	Volume (mm ³)
Stairmand HE	1	432.0	-	567272
Convex1	1.1	475.2	730.0	741387
Convex2	1.2	500.4	563.7	862133
Convex3	1.3	525.7	460.5	993679
Convex4	1.4	551.3	390.6	1136200

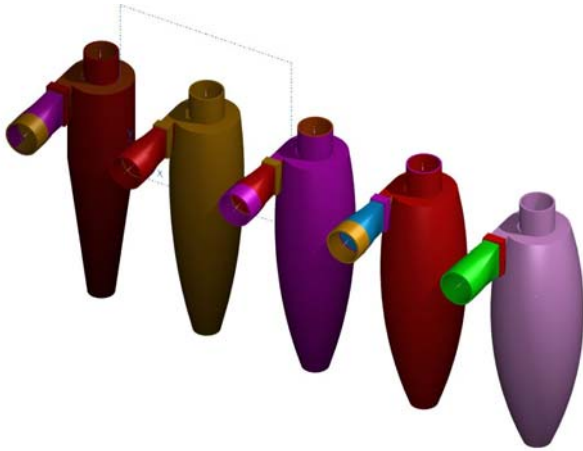


Fig. 3 Schematic diagrams of designed cyclone bodies

비교실험은 Stairmand HE모델과 콘 상단의 직경을 1.1배에서 1.4배까지 증가시킨 네 개의 Convex 사이클론에 대해 수행하였다. 각각의 모델은 ABS수지를 CNC 가공하여 제작 하였다. Fig.3은 제작된 사이클론 모델들을 보여준다.

3. 실험 장치 구성

Fig. 4은 사이클론 성능 평가를 위한 실험 장치이다. 집진 성능 평가에 사용된 JIS 8 표준 분진은 사이클론의 입구에서 공급되며, 송풍기에 의해 발생한 흡입력에 의하여 유동을 따라 이동하여 원심력에 의해 집진통으로 집진된다. 송풍기에 의한 흡입유량은 노즐($\phi 18\text{mm}$)의 차압을 측정하여 송풍기 모터를 인버터 제어하여 조절한다. 사이클론의 압력 손실은 입/출구의 압력차를 마이크로 마노미터(Micro-manometer, FCO-12)를 이용하여 측정하였다.

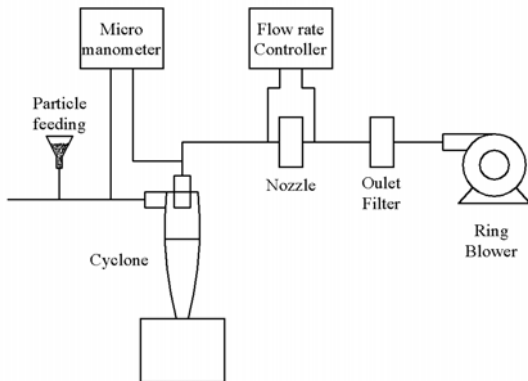


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental set-up

Table 3 Convex Cyclone design data

Material	Median diameter (μm)	Particle density (g/cm^3)	Chemical composition (% , mass)
KANTO	6.6 ~ 8.6	2.9 ~ 3.1	SiO ₂ 34 ~ 40
			Al ₂ O ₃ 26 ~ 32
			MgO 0 ~ 7
			Fe ₂ O ₃ 17 ~ 23
			CaO 0 ~ 3
			Ign.loss 0 ~ 4

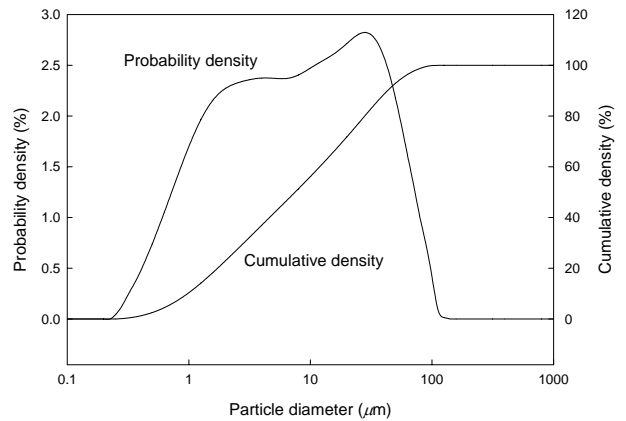


Fig. 5 JIS 8 particle diameter distribution.

집진 성능 평가에 사용된 JIS 8 표준 분진은 6.6 ~ 8.6 μm 의 평균입경과 2.9~3.1 g/cm^3 의 밀도를 가지는 분진으로서 화학적 조성 및 입경분석기 (Malvern master-sizer 2000)를 이용하여 측정된 입경 분포를 Table 3과 Fig. 5에 각기 나타내었다.

집진 효율측정은 5g의 JIS 8 표준 분진을 5분에 걸쳐 투입하며 진행하였다. 효율 측정 방법은 먼지투입 전/후의 사이클과 먼지통 무게를 0.01g의 정밀도를 가지는 전자저울로 측정하여 비교하는 방법으로 수행되었다.

4. 실험

Fig. 6은 각 사이클론의 유량에 따른 압력 손실 측정 결과를 보여준다. 실험을 위해 제작된 사이클론 모델들은 Table 2에 보이는 바와 같이 각기 다른 입구 면적 및 체적을 가진다. 그러므로 동일한 입구 속도에서의 압력손실 비교는 무의미하다. 이 실험에서는 유량을 0.5 ~ 1.1 m^3/min 으로 변화시키며 압력손실과 집진효율을 측정하였다.

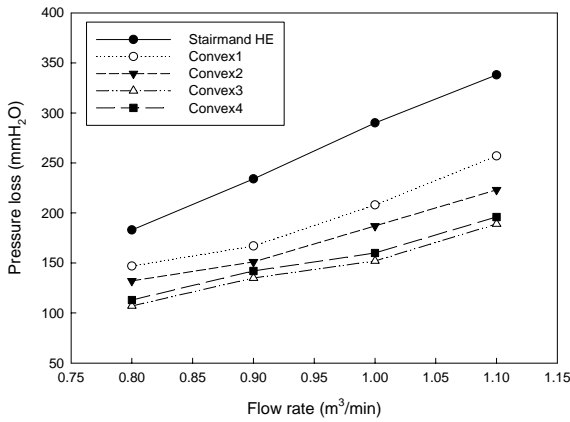


Fig. 6 Pressure loss comparison of Stairmand HE cyclone with Convex cyclones

Stairmand HE 모델의 경우 1.0m³/min 유량일 때 입구 속도는 38.58m/s이며 Core 유동 모델에 의해 구한 최대회전 속도는 74.67m/s이다. Stairmand HE 모델의 압력 손실은 0.5m³/min에서 82mmH₂O의 압력 손실을 보였으며, 유량의 제공에 비례하여 1.1m³/min에서 338 mmH₂O까지 증가한다. Convex 모델들 역시 Stairmand HE 모델과 유사하게 압력 손실이 유량의 제공에 비례하여 증가한다.

동일한 유량에 대해 Convex 사이클론의 설계 방법을 적용한 모델이 표준적인 Stairmand HE 사이클론에 비해 매우 적은 압력손실을 보인다. 원추 상단의 직경 D_c 을 Stairmand HE 모델의 1.1 배로 증가 시킨 Convex1모델의 경우 Stairmand HE에 비해 평균 73%의 압력 손실만을 보였다. 압력손실은 Convex 사이클론의 만곡도가 증가할수록 감소하여 Convex2과 Convex3모델은 각기 Stairmand HE 모델에 비해 65.5%와 54%의 압력 손실을 보인다. Convex4 모델은 Convex3 모델의 54%에 비하여 상대적으로 높은 57%의 압력 손실을 보인다. 이는 압력손실을 최소화하는 만곡률의 최적값이 존재함을 의미한다.

사이클론 집진기의 운전비용의 대부분은 압력 손실에 기인한다. 그러므로 사이클론의 압력 손실을 최대 절반 수준으로 감소시키는 Convex 사이클론의 설계방법은 운전비용을 크게 절감하는 수단이 될 수 있다.

Fig. 7은 입구 면적의 변화에 따른 압력손실의 영향을 배제하기 위해 식 (2)와 같이 입구 유속으로 무차원화된 압력 손실을 나타낸 것이다.

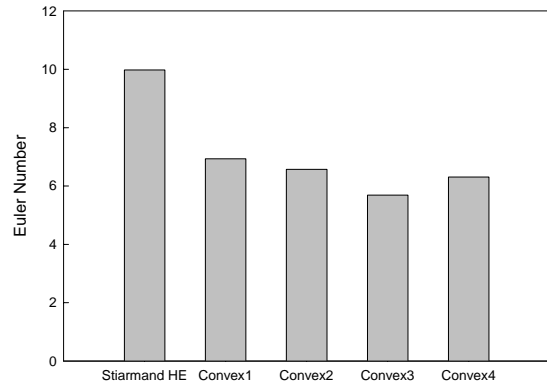


Fig. 7 Euler number (Dimension Pressure loss) of each cyclone

각 사이클론 모델들은 각기 다른 입구 면적을 가진다. 상대적으로 큰 입구 면적을 가지는 Convex 사이클론은 Stairmand HE 모델에 비해 입구 면적이 크며, 만곡률이 큰 모델일수록 입구 면적이 증가한다.

유량이 동일한 경우 입구 면적의 증가하면 입구 속도는 감소한다. 그러므로 Fig. 6의 압력손실 측정값은 입구 속도 감소에 따른 압력 손실 감소의 영향이 포함되어 있다. 식(2)와 같이 입구속도를 이용한 무차원화 함으로서 입구 면적의 영향을 배제하고 사이클론 벽면 형상의 영향만을 살펴볼 수 있다.

$$E_u = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho_a \left(\frac{Q}{A_{in}} \right)^2} \quad (2)$$

사이클론의 압력손실은 유량의 제공에 비례하여 증가한다. 때문에 압력손실을 유량 또는 입구 유속의 제공으로 무차원화 한 압력 손실 즉 Euler 수는 유량에 무관하게 일정한 값을 가진다. Euler 수는 각 사이클론 고유의 압력손실을 나타내는 수치로서 서로 다른 형상을 가지는 사이클론간의 압력손실 비교 시 사용된다. 실제 측정된 압력 손실을 이용하여 계산된 Euler 수는 측정 오차에 의해 약간의 편차를 가지게 되므로 Fig. 6에는 평균값을 표시하였다.

Fig. 7을 통해 Stairmand HE 모델과 Convex 사이클론간의 압력 손실 변화를 분명하게 파악할 수 있다. Stairmand HE 모델의 Euler 수는 9.97이며, Convex1~4

사이클론은 각기 6.93, 6.57, 5.69, 6.3이다. Convex 사이클론은 Stairmand HE 모델에 비해 매우 적은 Euler 수를 보인다. Convex 사이클론의 Euler 수는 만곡률이 증가함에 따라 점차로 감소하여 Convex3에서 최소값을 보인 후 Convex4에서는 다시 증가하는 경향을 보였다. 즉 압력 손실이 최소가 되는 만곡률이 존재한다. Convex1 모델은 Stairmand HE 모델 대비 69.5%의 압력 손실을 보이며, Convex2~4 모델은 각기 65.9%, 57.1%, 63.2%의 압력 손실을 보인다.

가장 적은 압력 손실을 보이는 Convex3 모델은 상단과 먼지출구의 직경이 Stairmand HE 모델과 동일하며, 반지름이 상단 직경의 7.2배인 원호로 벽면이 구성된 사이클론으로 Stairmand HE 모델에 비해 47.1%의 압력 손실 저감 효과를 가진다.

이 실험에서는 Convex 사이클론의 설계 변수를 줄이기 위해 원호를 이용하여 사이클론 벽면을 설계하였다. 사이클론 벽면 설계에 이용 가능한 곡선은 여러 가지이며 원호는 이중 일부이다. 그러므로 최적의 사이클론 형상을 얻기 위해서는 원호 이외의 다양한 곡선을 이용한 사이클론에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

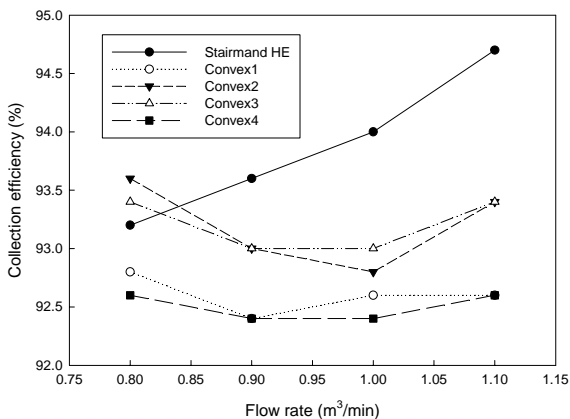


Fig. 8 Collection efficiency comparison of Stairmand HE cyclone with Convex cyclones

Fig. 8은 각 모델의 집진효율을 나타낸 것이다. Stairmand HE 모델이 가장 높은 집진 효율을 보이며, Convex 모델 사이에는 큰 차이가 보이지 않는다. 널리 알려진 사이클론 이론에 의하면 집진 효율 입구 속도 즉 유량에 비례하여 증가하여야 한다. Stairmand HE 모델은 일반적인 집진 효율이론과 부합되게 유량에 따라 집진효율이 증가한다. 그러나 Convex 사이클론의 경우 집진효율

이 유량에 거의 무관한 것으로 보인다. 이는 두 가지 원인에 의한 것으로 추정된다.

Convex 사이클론은 벽면이 vortex core로부터 멀어짐에 따라 일반적인 사이클론에 비해 낮은 벽면 속도를 보인다. 이로 인해 투입된 분진이 사이클론 내벽에 퇴적되는 현상이 발생하며, 퇴적층의 두께가 두꺼워지면 일시에 떨어져 나간다.

전산유체역학을 이용한 해석을 통해 Convex 사이클론의 만곡률이 증가할수록 회전 유동의 불안정성이 증가하는 것이 관찰되었다.

Convex 사이클론의 집진효율이 유량에 크게 영향을 받지 않는 것처럼 보이는 것은 벽면속도 감소에 따른 분진의 퇴적과 만곡률 증가에 따른 회전 유동의 불안정성에 기인하는 것으로 보인다.

5. 결론

원통과 원추로 구성되는 일반적인 사이클론과 달리 내경이 하나의 곡선으로 정의되는 중단이 불룩한 Convex 사이클론에 대한 연구를 수행하였다. Stairmand HE 사이클론과 이를 기반으로 Convex 설계개념을 적용한 모델에 대한 비교 실험을 수행하였다. 비교 실험에 사용된 Convex1~4 사이클론은 Stairmand HE 사이클론과 상단 및 먼지출구의 직경이 동일하며, 원추 상단의 직경이 Stairmand HE에 비해 각각 1.1~1.4 배가 되도록 제작되었다.

실험 결과 Convex 사이클론은 Stairmand HE에 비해 매우 적은 압력 손실 값을 보였다. Convex 1 모델은 Stairmand HE 모델에 비해 74%의 압력 손실을 가지며, Convex2와 4는 각기 65.5%, 57% 이다. Convex3 모델은 1.3배의 원추부 직경을 가지며, 벽면이 반지름이 7.2D가 되도록 설계되었으며 가장 적은 54%의 압력 손실을 보였다. 이상의 압력 손실 측정 결과를 통해 Convex 설계 개념이 압력 손실 저감에 매우 효과적이며, 압력 손실을 최소화 하는 최적의 만곡률이 존재함을 보였다.

Convex 사이클론의 집진효율은 표준적인 Stairmand HE 모델에 비해 1~2% 정도 낮은 집진율을 보였다. Convex 사이클론의 경우 집진효율이 유량에 거의 무관한 것으로 보인다. 이는 벽면속도 감소에 따른 분진의 퇴적과 만곡률 증가에 따른 회전 유동의 불안정성에 기인하는 것으로 보이며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Bath, W., 1956, Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen. Brennstoff-Wärme-kraft 8, Heft 1:1-9
- (2) Muschelknautz, E, Brunner K., 1967, Untersuchungen an Zyklonen. Chem.-ing.-Techn. 39, nr.9:531-538
- (3) Lwwellen. WS, 1971, A review of confined vortex flow. NASA CR-1772, pp.13-18
- (4) Smith. J.L. Jr., 1962, An analysis of the vortex flow in the cyclone separator. Journal of Basic Engineering. Trans. Of ASME, Dec issue:609-618
- (5) Slack. Md, Prasad. Ro, Bakker. Aand Boysan. F, 2000, Advances in cyclone modeling using unstructured grid, Trans IChemE 78, part A:1098-1104
- (6) Peng. E, Hoffmann AC, Boot. P, Udding A, Dries, HWA and Kater JJ, 2002, Flow pattern in reverse-flow centrifugal separators, Powder Technology 127:212- 222
- (7) Barth, W. (1956). Berechnung and Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund Neuerer Untersuchungen. Brennst. Wärme Krufft, 8, 1~9.
- (8) Coker, A. K. (1993). Understand cyclone design. Chemical Engineering Progress, 89(12), 51~55.
- (8) DeOtte Jr., R. E. (1990). A model for the prediction of the collection efficiency characteristics of a small, cylindrical aerosol sampling cyclone. Aerosol Science and Technology, 12, 1055~1066.
- (9) Dietz, P. W. (1981). Collection efficiency of cyclone separators. A.I.Ch.E. Journal, 27, 888.
- (10) Dirgo, J., & Leith, D. (1985). Cyclone collection efficiency: Comparison of experimental results with theoretical predictions. Aerosol Science and Technology, 4, 401~415.
- (11) Grane, R. L., Barbaris, L. N., & Behrouzi, P. (1992). Particulate behavior in cyclone separators with secondary gas extraction. Journal of Aerosol Science, 23(Suppl. 1), S765~S768.
- (13) Kim, J. C., & Lee, K. W. (1990). Experimental study of particle collection by small cyclones. Aerosol Science and Technology, 12, 1003~1015.
- (14) Kim, M. C., & Lee, K. W. (2000). Design modification of virtual impactor for enhancing particle concentration performance. Aerosol Science and Technology, 32, 233~242.
- (15) Lapple, C. E. (1950). Gravity and centrifugal separation. Industrial Hygiene Quarterly, 11, 40.
- (16) Liden, G., & Gudmundsson, A. (1997). Semi-empirical modeling to generalize the dependence of cyclone collection efficiency on operating conditions and cyclone design. Journal of Aerosol Science, 28(5), 853~874.
- (17) Moore, M. E., & McFarland, A. R. (1990). Design of Stairmand-type sampling cyclones. American Industrial Hygiene Association Journal, 51(3), 151~159.
- (18) Smith, W. B., & Wilson, R. R. (1979). A five-stage cyclone system for in situ sampling. American Chemical Society, 13(11), 1387~1392.
- (19) Wang, L. Z., & Ye, L. (1999). Reducing pressure drop in cyclones by a stick. Aerosol Science and Technology, 31(2~3), 187~193.
- (20) Zhu, Y., & Lee, K. W. (1999). Experimental study on small cyclones operating at high flow rates. Journal of Aerosol Science, 30(10), 1303~1325.