

입구형상에 따른 소형 사이클론의 성능 실험

김민하[†]·허광수*·설승윤**

Experiment of small cyclone performance depending on the inlet type

Kim Min-Ha, Hur Gwang-Su, and Seol Seoung-Yun

Key Words: Cyclone(사이클론), Collection Efficiency(집진율), Grade Efficiency Curve (등급효율곡선), Pressure Loss(압력손실), Helical Inlet(헬리컬 입구)

Abstract

The performance of small cyclone is analysed by an experiment for the purpose of developing a bag-less vacuum cleaner. For the high collection efficiency and low pressure loss cyclone, the effect of cyclone inlet feature must be well understood. Four types of the helical inlet are considered to compare with the normal tangential inlet, and also various inlet velocities are used to each inlet type. Based on the reference dimension, each type of inlet shows the changes of the grade efficiency and pressure loss which determine the cyclone quality. The results show that the helical inlet has the smaller cut-size but bigger pressure loss than the tangential inlet. And the degree of opening area influences factors of cyclone performance. As the inlet velocity is increased, the cut-size becomes smaller and the pressure loss becomes bigger of each cyclone. Further studies are required to understand the optimized helical inlet of cyclone .

기호설명	x 입자 직경, m
	η 집진효율, %
	ρ 밀도, kg/m ³
	<u>Subscript</u>
a 사이클론 입구 높이, m	c 콘(corn) 부분
b 사이클론 입구 폭, m	CS 검사면(Control Surface)
D 사이클론 본체 직경, m	d 입자 출구(dust outlet)
Eu Euler number	f 투입분진
f 확률분포	in 입구(inlet)
F 누적분포	p 입자(particle)
g 등급분리효율	50 50% cut-size
H 높이, m	θ 원주방향
ΔP 압력손실, Pa	r 반경방향
S 보텍스-파인더(vortex-finder) 길이, m	x 보텍스-파인더(vortex finder)
V 속도, m/s	

† 전남대학교 기계시스템공학부 대학원

E-mail : dintian3@yahoo.co.kr

TEL : (062)530-0225 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 기계시스템공학부 대학원

** 전남대학교 기계시스템공학부 부교수

1. 서 론

사이클론 분리기는 원심력을 이용하여 기체 중 입자를 분리하는 기기로서 산업계에서 널리 이용되고 있다.

사이클론 성능에 대한 수학적 모델링이 다수 이

루어져 왔고 이를 이용하여 최적화 기법을 가미한 연구가 이루어지고 있다^[1]. 또한 전산유체역학의 발전과 함께 CFD 프로그램을 이용한 연구와 LDA를 이용한 사이클론 내부 유동양상의 연구가 진행되어지고 있다^[2-5].

현재에는 가정용 진공청소기에 사이클론을 적용하여 먼지에 의한 필터 또는 먼지봉투 막힘 (clogging) 현상을 근본적으로 해소하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다^[6]. 최근에는 사이클론 몸체를 회전시키거나 전기장을 이용하여 사이클론의 효율을 높이기 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다^[7,8].

최적 사이클론 구현은 최대 집진 효율을 가지면서 최소 압력손실을 가지는 것이다. 하지만 압력손실과 집진 효율은 서로 상반되는 특징으로서 효율을 높이면 압력손실이 커지고 압력손실을 줄이면 집진 효율이 저하하는 특징을 가지고 있다.

사이클론은 몸체 직경, 보텍스-파인더의 직경, 몸체 길이, 입구속도 및 형상 등 성능을 결정하는 다양한 설계 변수를 가지고 있다. 특히 보텍스-파인더의 직경은 사이클론의 성능에 가장 큰 영향을 끼친다^[9]. 또한 입구형상은 사이클론 내부의 유동을 결정하고 집진효율과 압력손실에 중요한 부분이다^[10].

본 연구에서는 접선방향의 입구형상을 가지는 역류, 실린더-콘(reverse-flow cylinder-on-cone) 형태의 사이클론에서 다양한 입구 형상을 적용하여 성능을 비교하였다.

2. 사이클론 성능 실험

2.1 집진효율과 압력손실

2.1.1 집진효율

사이클론의 분리 성능은 보통 집진효율(overall collection efficiency, η)로 나타낸다. 집진효율은 사이클론의 고유성능인 등급효율(grade efficiency, $g(x)$)과 공급분진의 입경분포에 영향을 받는다. 등급분리효율은 보통 50% 분리입경(Cut size, x_{50})으로 대표되며, 컷사이즈를 알 경우 이론적으로 식(1)에 의해 구해진다. 등급분리효율을 구하는 모델식은 여러 가지가 존재하지만 본 논문에서는 가장 잘 알려진 Barth식을 이용하였다.

$$g(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{50}}{x}\right)^m} \quad (1)$$

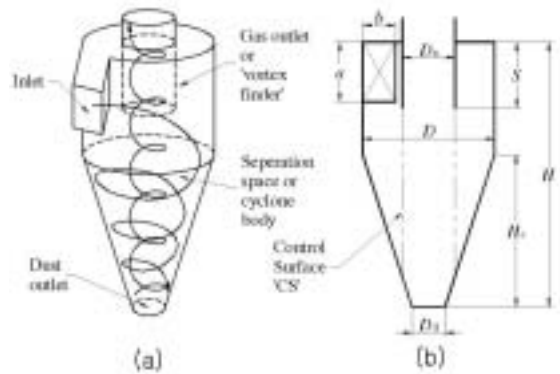


Fig. 1 Sketches of a reverse-flow, cylinder-on-cone cyclone.

또한 컷사이즈를 구하는 식은 여러 가지 모델식이 있으나 크게 보아 평형궤도(equilibrium-orbit) 모델과 비행시간(time-of-flight) 모델 두 가지로 대별된다. 식(2)는 평형궤도 모델에서의 컷사이즈를 보여준다.

$$x_{50} = \sqrt{\frac{9\mu V_{rCS} D_x}{\rho_p V_{\theta CS}^2}} \quad (2)$$

위 식에서 μ 는 공기의 점도, D_x 는 보텍스-파인더의 직경, ρ_p 는 입자의 밀도이고 V_{rCS} 는 검사표면에서의 반경방향속도, $V_{\theta CS}$ 는 검사면에서의 회전속도를 나타낸다.

공급분진의 입경에 따른 누적분포함수(Cumulative distribution function, $F(x)$)와 사이클론의 등급분리효율에 의하여 집진율은 식(3)에 의해 예측 가능하다.

$$\eta = \int_0^\infty g(x) dF_f(x) = \int_0^\infty g(x) f_f(x) dx \quad (3)$$

2.1.2 압력손실

청소기용 사이클론의 경우 압력손실은 흡입력과 직접적인 연관이 있다. 압력손실이 큰 사이클론의 경우 청소기의 전반적인 흡입력을 감소시킬 수 있다.

사이클론의 압력손실에 대한 모델식도 다양하다. 순수한 경험식으로 Shepherd and Lapple식은 다음과 같다.

$$Eu_{in} = \frac{\Delta P}{\rho V_{in}^2/2} = \frac{16ab}{D_x^2} \quad (4)$$

위 식에 의하면 보텍스-파인더 직경과 입구에서의 속도가 압력손실에 지대한 영향을 미친다. 즉 예를 들면 D_x 가 1/2로 작아지면 압력손실은 4배 증가한다. 또한 여타 유체 기계에서와 마찬가지로 압력손실은 속도의 제곱에 비례한다. 식 (4)는 간단하고

압력손실의 가장 중요한 요소인 보텍스-파인더 직경과 입구속도의 영향을 반영하고 있지만 다른 기하학적 형상이나 유체역학적 이론을 반영하지 못하고 있다. 특히 통 내부 마찰손실에 대한 고려가 부족하다.

먼지 집진통의 크기에 의한 압력손실은 거의 미미하지만, 집진통이 클 경우 압력손실이 조금 감소하는 경향이 있다^[11].

Table 1 Dimensions of Cyclone

	dimension (mm)	Ratio
D	34	1.00
D_x	17	0.50
S	17	0.50
H	135	3.97
H_c	85	2.50
a	17	0.50
b	7	0.21
D_a	13	0.38

2.2 사이클론 실험

2.1.1 실험모델

Fig. 1(a)는 일반적인 사이클론의 형태를 나타내고 있다. 입구(inlet) 부분으로 분진을 포함한 공기가 접선방향으로 들어가면 사이클론 통에서 회전운동에 의해 무거운 입자를 분리하여 분진은 먼지출구(dust outlet)로 나가고 깨끗한 공기는 보텍스-파인더(vortex finder)를 통해 위 부분 출구로 나간다. 사이클론의 각 부분 치수를 Fig. 1(b)에서 보여주고 있다.

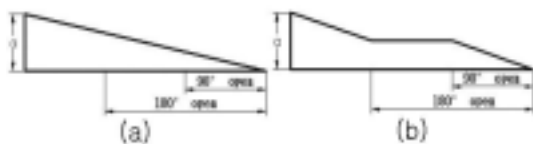


Fig. 2 Sketches of each inlet type and opening degree.

본 연구에서 고찰하고자 하는 사이클론 치수는 Stairmand High Efficiency 모델^[12]의 치수에서 비례적으로 취한 값들로서 Table 1과 같다. 또한 일반적인 사이클론의 입구형상 즉, 접선방향으로 유입되는 형상뿐만 아니라 헬리컬(Helical)형상의 입구를 가진 사이클론의 성능도 비교하였다. Fig. 2(a)는 단면적

이 균일하게 줄어드는 헬리컬 형상을 나타내고, Fig. 2(b)는 변형된 형태로서 일정한 단면이 유지되는 구조를 주어 유동을 안정화시키는 구간을 주었다. 또한 각각의 구조에 따라 90°~180°로 유입구의 면적을 변화시켜 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Various types of cyclone due to each inlet shape

Inlet Feature		Degree
Stairmand HE	Tangential	
A	Constant Decreasing	180°
B	Constant Decreasing	90°
C	Constant Guide	180°
D	Constant Guide	90°

2.1.2 실험장치 및 방법

Fig. 3은 사이클론 성능 평가를 위한 실험 장치이다. 성능 평가에 사용된 표준분진은 제작된 사이클론의 입구에서 스크류피더에 의하여 공급되며, 송풍기에 의해 발생한 흡입력에 의하여 유동을 따라 이동하여 원심력에 의해 집진통으로 집진 된다. 송풍기에 의한 흡입유량은 노즐($\phi 18$)에서 마이크로 마노미터(Micro-manometer, FCO-12)를 이용하여 제어하였다. 실제 사용되는 청소기의 풍량을 적용하기 위하여 마이크로 마노미터를 이용하여 풍량 0.1~0.3 CMM으로 조절하였고, 사이클론의 입·출구에서 압력손실을 측정하였다.

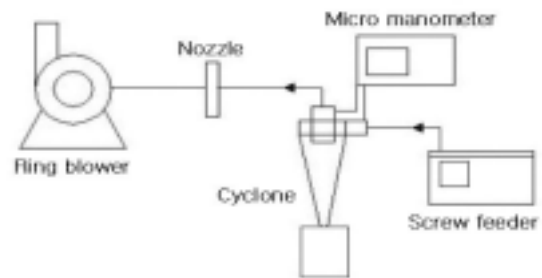


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental set-up.

사이클론의 집진율은 먼지통에 집진된 먼지의 일부를 채취하여 입경분석기(Malvern master-sizer 2000)를 이용하여 포집분진의 입경분포를 측정하였다. Malvern 입경분석기는 입자의 광 산란 원리를 이용한 측정 장치로서, 측정가능한 입자의 크기는

0.02~2000 μm 이다.

실험에 사용한 표준분진은 11종 분진(0.25~17.5 μm)으로 형상은 거의 구형이고 비중은 1.9~2.1 g/cm^3 , MMD는 약 2.3 μm 이다. Fig. 4는 11종 분진의 확률분포와 누적분포를 보여준다. 또한 Stairmand HE 모델에서 집진된 입자분포의 실험데이터와 보정한 데이터를 동시에 나타내었다. 사이클론 실험에 사용한 입구 속도는 20, 23, 26 m/s 로 각각의 사이클론에서 동일하게 유지하였으며, 스크류피더를 이용하여 4 g 의 분진을 1 rpm 으로 투입하여 실험하였다.

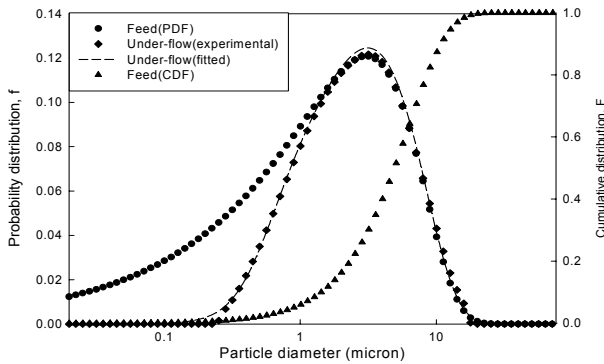


Fig. 4 Particle diameter distribution of feed and under-flow.

3. 실험결과

3.1 등급분리효율과 컷사이즈

사이클론 실험에서 등급효율곡선을 나타내면 0.4~0.5 μm 부분에서 효율이 증가하는 꼬리(tail)가 발생한다. 이는 공급된 입자가 미세한 먼지일 경우 불충분한 확산에 의한 것으로 예측된다.^[12] 또한 고효율 소형사이클론의 경우 거의 모든 입자에서 등급분리효율이 50%이상이므로 컷사이즈를 정의하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 공급된 입자분포와

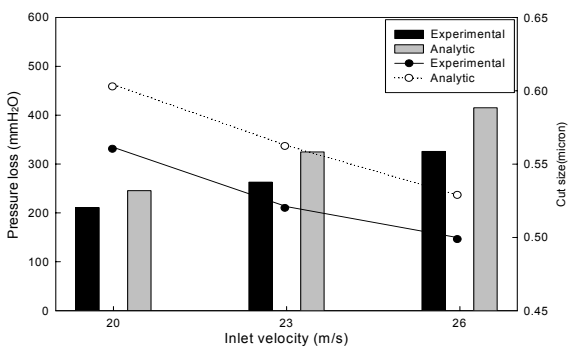
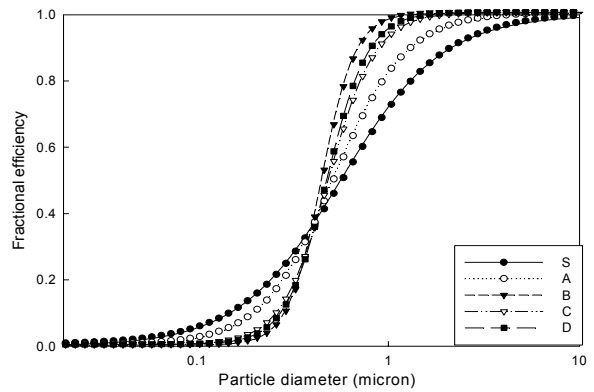


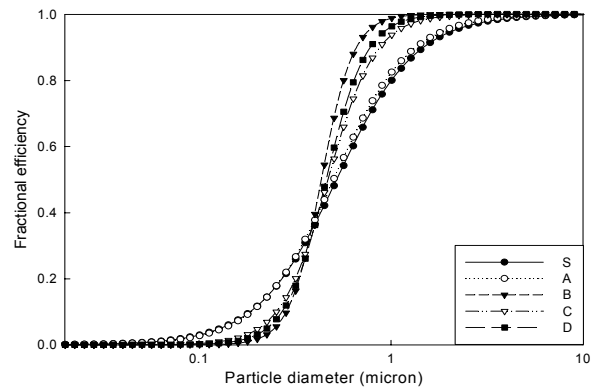
Fig. 5 Comparison of cut-size and pressure loss of Stairmand HE model.

포집된 입자분포의 데이터를 식 (1)을 이용, 최소자승법(least square method)으로 보정 하여 등급효율곡선을 그리고 컷사이즈를 정의하였다. 이렇게 얻어진 컷사이즈와 압력손실을 이론식을 이용하여 얻은 값과 속도에 따라 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실험에 의한 컷사이즈와 압력손실이 이론식에 의한 결과보다 작게 나왔다. 그러나 컷사이즈의 경우 결과 값의 차이가 작고, 속도가 증가할수록 실험과 이론식에 의한 컷사이즈는 감소하고 압력손실은 증가하는 경향성은 일치함을 볼 수 있다.

Fig. 6은 각각의 입구형상에 따른 사이클론의 등급분리효율곡선을 속도에 따라 나타낸 결과이다. 각각의 사이클론의 경우 컷사이즈는 Fig. 5에서 B, D, C, A, S의 순서로 작아짐을 볼 수 있었다. 90°를 유입구로 둔 형상에서는 일정한 단면적을 유지하는 헬리컬 형상이 단면유지구간을 둔 형상보다 컷사이즈가 작음을 알 수 있었고, 180°를 유입구로 둔 형상에서는 단면유지 구간을 가진 형상의 컷사이즈가



(a)



(b)

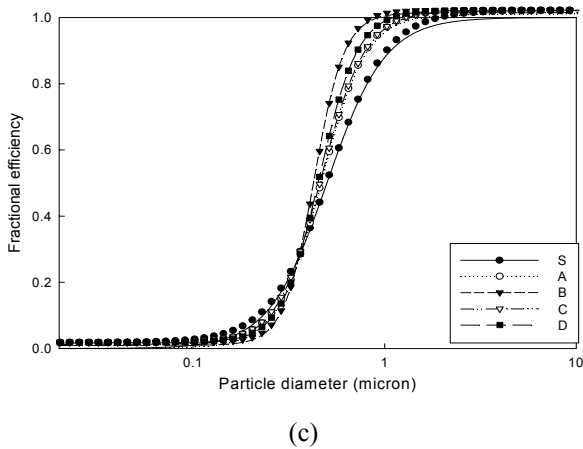


Fig. 6 Grade efficiency curve of each cyclone with various inlet velocity (a)20, (b)23, (c)26m/s.

작음을 알 수 있었다. 이는 사이클론 내부에서 접선 방향 속도와 축방향 속도가 사이클론의 효율과 밀접한 관계가 있음을 예측할 수 있다. 즉, 접선방향 속도가 지배적인 Stairmand HE모델의 경우 축방향 속도가 적기 때문에 헬리컬 형상의 입구보다 효율이 떨어짐을 알 수 있다.

또한 Fig. 6 (a), (b), (c)에서 등급효율곡선의 기울기는 컷사이즈가 적을수록 커진다. 즉, 사이클론의 효율이 높을수록 식 (1)에서의 지수 m 이 커진다는 것을 알 수 있고, 집진성능이 좋을수록 사이클론이 조밀한 입자 포집간격을 가짐을 예측할 수 있다. 예를 들면, 같은 컷사이즈를 가지는 사이클론의 경우 기울기가 큰 사이클론이 집진효율이 크다. 결국 사이클론에서 집진성능이 컷사이즈 뿐만 아니라 m 에 의해서도 결정될 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 7은 Starimand 모델에서의 속도에 따른 등급

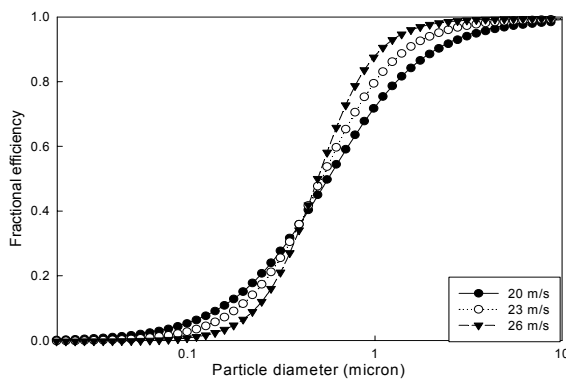


Fig. 7 Grade efficiency curve of Stairmand model with various inlet velocity.

분리효율을 나타내었다. 다른 모델의 경우에는 작았지만 속도가 증가할수록 Stairmand 모델의 등급효율곡선의 기울기가 커짐을 알 수 있다. 이는 식 (1)의 m 은 사이클론의 종류뿐만 아니라 속도에 의해서도 변화하고, 사이클론의 집진성능의 결정하는 요소임을 예측할 수 있다.

3.2 압력손실

Fig. 8은 사이클론의 종류와 속도에 따른 압력손실과 컷사이즈를 비교하였다. 본 실험에서는 보텍스 파인더의 직경 및 다른 설계변수들은 고정하고 각각의 사이클론에 대하여 속도를 변화시켜 실험하였다. 이 경우 모든 사이클론에서 속도가 증가할수록 압력손실이 증가함을 알 수 있다. 또한 컷사이즈가 작은 경우 즉, 집진효율이 좋은 사이클론일수록 높은 압력손실을 가짐을 알 수 있다. 특히 B모델의 경우 좁은 유입구 형상의 영향으로 입구속도 20m/s에서의 컷사이즈가 $0.46\mu\text{m}$ 로 가장 작았으나, 일반적인 형상의 사이클론의 압력손실이 210mmH₂O의 약 4배인 870mmH₂O의 압력손실을 가짐을 알 수 있었다. 반면에 A, C의 모델의 압력손실은 입구속도 20m/s에서 각각 330, 360mmH₂O로 청소기용 사이클론에 적용 가능한 압력손실을 가지고 Stairmand HE모델의 $0.56\mu\text{m}$ 보다 작은 0.5, $0.48\mu\text{m}$ 의 컷사이즈를 가짐을 알 수 있다.

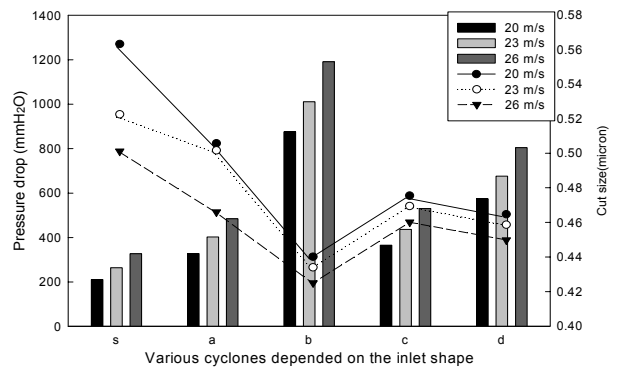


Fig. 8 Comparison of pressure drop and cut-size of each cyclone with various inlet velocity.

4. 결론

사이클론의 집진성능을 결정하는 중요한 변수 중에 하나인 컷사이즈와 압력손실을 Stairmand HE모델에서 실험결과와 이론식에 의한 결과를 속도에 따라 비교하였다. 또한 접선방향의 입구구조를 가진

기본 Stairmand HE모델에서 기준 치수를 고정하고 헬리컬 형상의 입구와 유입구의 면적에 따라 5가지의 입구형상을 고려하여 실험하였다. 이 중 컷사이즈는 일정한 단면을 유지하면서 유입구가 90°열린 B모델이 가장 작았고, 압력손실은 가장 크게 나타났다. 또한 Stairmand HE모델은 압력손실은 가장 큰 반면, 컷사이즈는 가장 크게 나타나 집진효율이 다른 모델에 비하여 다소 떨어짐을 알 수 있었다. 기존의 헬리컬 형상에서 180°의 유입구 형상을 가진 A모델과 일정한 단면 유지구간을 두어 180°의 유입구 형상의 C모델의 경우 압력손실 측면에서는 A모델이 우수하였지만, 컷사이즈는 C모델이 작음을 알 수 있었다.

사이클론의 집진성능을 나타내는 등급효율곡선은 컷사이즈와 m 의 함수로 표현할 수 있다. 만약 컷사이즈가 일정하다면 사이클론의 집진효율은 m 에 의하여 결정 될 수 있고, m 은 사이클론의 종류뿐만 아니라 기본 사이클론의 경우 유입구의 속도에 의해서도 변화하며 집진성능을 결정할 수 있는 변수가 될 수 있다. 그러나 m 에 대한 이론적인 연구와 실험적인 근거가 부족하여 향후 연구가 필요한 전망이다.

후 기

본 연구는 삼성광주전자 청소기 개발팀의 협조로 이루어졌으며 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) G. Ravi, Santosh K. Gupta, and M.B. Ray, 2000, "Multiobjective Optimization of Cyclone Separators Using Genetic Algorithm", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 39, pp. 4272-4286.
- (2) M.D. Slack, R.O. Prasad, A. Bakker, and F. Boysan, 2000, "Advances in Cyclone Modeling using Unstructured Grids", *FLUENT Technical Notes, Trans IchemE*, Vol. 78, Part A.
- (3) Madhumita B. Ray, Chi Tien, Alex C. Hoffmann, and M.I.L. Beumer, "Numerical Simulation of the Swirl Flow Pattern and Grade Efficiencies in Gas-Solid Separators", *Proc. Asia-Pacific Conf. on Sustainable Energy and Environmental Technology*, pp. 290-297.
- (4) A.J. Hoekstra, J.J. Derksen, and H.E.Q. Van Den Akker, "An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones", *Chemical Eng. Science*, Vol. 54, 1999, pp. 2055-2065.
- (5) W. Peng, A.C. Hoffmann, P.J.A.J. Boot, A. Udding, H.W.A. Dries, A. Ekker, J. Kater, 2002, "Flow pattern in reverse-flow centrifugal separators", *Powder Technology*, Vol 127, pp. 212-222
- (6) Dong-Jin Kwack, 2000, *A study on Optimal Design of Cyclone System for a Vacuum Cleaner*, Busan National University, Busan, pp. 35-65
- (7) K.S. Lim, H.S. Kim, K.W. Lee, 2004, "Comparative performances of conventional cyclones and a double cyclone with and without an electric field", *Aerosol Science*, Vol 35, pp. 103-116
- (8) Bangxian Wu, Shi Liu, Haigang Wang, 2002, "A study on advanced concept for fine particle separation", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 26, pp. 723-730
- (9) Seol Seoung-Yun, Hur Gwang-su, Kim Min-ha, 2003, Analysis of Collection efficiency and Pressure drop for a small cyclone, *KSME*, pp. 99-104.
- (10) John Abrahamson, Roger Jones, Andy Lau, Simon Reveley, 2002, "Influence of entry duct bends on the performance of return-flow cyclone dust collectors", *Power Technology*, Vol 123, pp. 126-137
- (11) Jheong Gyeong-rak, Byon Youn-seop, Kim Seong-jong, Jang Gyeong-hwan 1986, *On the collection efficiency and pressure drop of the cyclone*, Chonnam University, Gwangju, pp. 107-115
- (12) A.C. Hoffmann and L.E. Stein, 2002, *Gas Cyclones and Swirl Tubes*, Springer, New York, pp. 85-86