

접선유입식과 축상유입식 사이클론의 집진효율 비교

이중섭*, 이치우#

Comparisons of Dust Collection Efficiency on the Tangential Entry and Axial-vane Type Cyclone

Chung-Seob Yi*, Chi-Woo Lee#

(Received 23 September 2011; received in revised form 20 November 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

This study is about comparison of tangential entry type cyclone dust collector with axial vane type cyclone dust collector. Cut diameter and dust collection efficiency of both collector was compared by theory and experiment. Cut diameter was calculated by an quasi-empirical formula by Lapple and Shepherd. Measurement of cut diameter was conducted by particle counter through dust generator. As the result, cut diameter obtained by experiment was a little larger than that by theory. But the error is within $0.5\mu\text{m}$ in both type of collector, so it could be confirmed that theoretical value and experimental value were almost identical. And, as flow rate increased, dust collection efficiency was increased. Also axial vane type showed higher dust collection efficiency than tangential entry type. Therefore, it can be said that axial vane type cyclone dust collector has higher performance than the other.

Key Words : Tangential Entry type Cyclone(접선유입식 사이클론), Axial-Vane type Cyclone(축상유입식 사이클론), Cut Diameter(절단입경)

1. 서 론

사이클론은 미세한 입자의 제진에 대해서는 효과적이지 못하나 백필터 등의 전처리 장치로 활용할 경우 유입 더스트 농도를 감소시키고 더스트 탈진 주기를 길게 할 수 있기 때문에 백필터의 약점인 여과포의 수명을 연장할 수 있는 등의 장점이 있다.

최근 출구 더스트 농도가 극히 낮은 고성능이 요구

되는 집진장치에 있어서 사이클론과 같은 전처리 집진장치의 효율을 높이는 것 또한 중요한 인자로 인식되고 있다. 따라서 원심력 집진기의 표준화, 설계최적화 및 집진효율 향상을 위해 많은 연구가 선행되었으며 현재에도 지속적으로 연구되고 있다^[1].

집진효율과 더불어 매우 중요한 사이클론 운영 인자는 압력손실을 들 수 있으며, 압력손실의 심각한 증가는 비용 상의 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 축상유입식 사이클론을 병렬 연결하여 사용하는 방법 등이 제시되고 있다. 이러한 축상유입식 사이클론의 경우 에디(Eddy) 발생을 억제하고 동일 사이즈의 접선유입식 사이클론에 비해 낮은

* 경상대학교 BK21(첨단기계)

교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학부

E-mail : leecw@gntech.ac.kr

압력으로 처리 용량을 증가시킬 수 있는 것으로 Zhou 등^[2]에 의해 보고되고 있다.

Song 등^[3]은 축상유입식 사이클론의 볼텍스 파인더(Vortex finder)의 길이 변화에 따른 집진효율에 미치는 영향에 대한 조사에서 길이가 짧아질수록 하향 선회류가 입자를 분리 포집하기에 충분한 선회수를 갖지 못하고 상향 선회류와 서로 혼합되어 사이클론의 효율이 낮아진다고 보고하였다.

Kim 등^[4]은 Realizable k-ε 난류모델을 도입하여 축류형 사이클론 집진기에 대한 유동해석 나선형 유도깃의 형상에 따라 압력강하와 먼지배출에 영향을 미치는 것을 확인하였고, Ju 등^[5]은 하이드로 사이클론 내부에서 발생하는 난류유동에 대한 수치해석을 통해 더스트 사이즈와 효율과의 관계를 실험을 통해 검증하여 수치해석을 통해 분리효율을 예측하였고, Barth의 경험식과 비교하여 수치해석을 통한 검증방법이 유효함을 주장하였다.

Young 등^[6]은 사이클론 내 유동특성과 미세입자 집진효율에 대하여 수치해석과 실험을 통해 비교하여 미세입자를 효과적으로 포집하기 위한 사이클론 수치해석 방법을 제시하였고, Cho 등^[7]은 사이클론 오일분리 장치에서 형상변화에 따른 유동특성과 오일분리 성능에 관해 수치해석을 통해 분리성능을 예측하였고, 콘 형상과 출구형상 등 원심력을 증가시킬 수 있는 형상에 관한 연구를 수행하였다. 또한 기초 연구에서 더스트를 효과적으로 제거하기 위해 베인각도, 베인개수 그리고 볼텍스 파인더(finder) 길이에 따라 절단입경에 대한 연구를 수행하였다^[8].

본 연구는 접선유입식과 축상유입식 사이클론에 대한 더스트 입자제거와 효율에 관해 이론과 실험을 통해 비교하고자 한다.

2. 사이클론 절단입경

2.1 접선유입식 사이클론

100% 집진효율을 얻을 수 있는 최소 입자의 크기를 한계입경이라고 하며 이는 가스의 밀도, 유입구의 폭과 비례관계가 있으며, 유효 회전수, 유입가스의 속도, 입자와 가스의 밀도차이와는 반비례 관계가 있다.

실제, 집진효율은 이와 같은 변수들에 의존한다.

Lapple (1951)에 의해서 개발된 준경험식은 50% 집진효율을 갖는 입자의 직경을 절단입경(cut diameter)이라 정의하고 이를 계산하였다^[9].

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, d_{pc} 는 50%의 집진효율을 갖는 입자의 직경, μ 는 가스의 점도(kg/m-s), W 는 유입구 폭[m], N_e 는 유효 회전수, ρ_p 는 입자밀도 [kg/m³], ρ_g 는 가스밀도 (kg/m³)를 나타낸다.

위의 식을 이용하여 절단입경을 구하기 위해선 기체의 외부 선회류(outer)에서 회전수, N_e 를 계산해야 하는데 이는 식 (2)를 통하여 간단히 구할 수 있다.

$$N_e = \frac{1}{H} \left[L_b + \frac{L_c}{2} \right] \quad (2)$$

여기서, H 는 유입구 높이 (m), L_b 는 사이클론 몸통 길이 (m), L_c 은 사이클론 원추의 수직길이 (m)를 나타낸다.

2.2 축상유입식 사이클론

입자에 작용하는 스톱스 항력은 입자에 일하는 원심력과 동일하다는 전제에서 식 (3)이 유도되며, 원심 침강속도는 식 (3)에 의해 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$3\pi\mu x \frac{dr}{dt} = \frac{\pi}{6} x^3 \rho_p \frac{u^2}{r} \quad (3)$$

여기서, μ 는 가스의 점도(kg/m-s), d 는 분진입자 직경(m)을 나타내며 ρ_p 는 분진입자 밀도(kg/m³), u 는 선회속도(m/s)를 나타낸다.

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\rho_p d^2}{18\mu} \frac{u^2}{r} (= w_s \frac{u^2}{gr}) \quad (4)$$

여기서, w_s 는 입자의 중력 침강속도(m/s)를 나타낸다.

분리에 가장 큰 핸디캡을 얻을 수 있는 입자는, 보스

의 반경 위치에서 유입되는 더스트이다. 이 입자가 가변 원심 침강 속도 dr/dt 로 $r=0$ 에서 $r=r_1$ 의 외통벽에 도달하는 시간은, 위의 식을 적분하여 구할 수 있다. 즉, 이 더스트 입자의 크기를 한계 입자경을 d_p 라 하면 식 (5)와 같고 이를 정리하면 식 (6)이 된다.

$$\int_{r_0}^{r_1} \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2 u^2} r dr = \int_0^{t_s} dt = t_s \quad (5)$$

$$\frac{9\mu}{\rho_s d_p^2 u^2} (r_1^2 - r_0^2) = t_s \quad (6)$$

한편 축분 속도 v 를 갖고 선회류가 길이 H_s 의 분리실을 관류하는데 요하는 시간이 t 라고 하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$t = \frac{H_s}{v} = \frac{H_s A_c}{Q} = \frac{H_s A_c}{Q} = \frac{H_s}{v_0} \left\{ 1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

더스트가 기류에서 분리되기 위해서는 $t \geq t_s$ 가 되어야 하므로, 그 극한을 생각하여 식 (6)과 (7)은 등치하여 식 (8)이 구해진다.

$$d_p^2 = \frac{9\mu r_1^2 v_0}{\rho_p u^2 H_s} \quad (8)$$

여기에 선회속도 u 의 정의에 따라 식 (9)를 대입하면 식 (10)이 유도된다.

$$u^2 = \frac{v_0^2}{\left\{ 1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \right\}^2 \tan^2 \beta_2'} \quad (9)$$

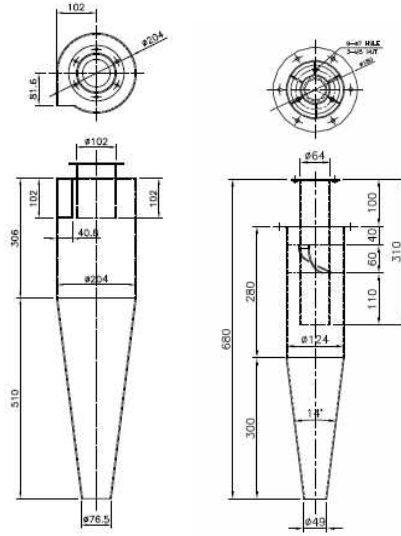
$$d_p = 3 \frac{r_1}{\sqrt{H_s}} \left\{ 1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \right\} \tan \beta_2' \times \sqrt{\frac{\mu}{\rho_p v_0}} \quad (10)$$

따라서, 절단입경은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\tan \beta_2'$ 의 값은 유동해석을 통해 구한 다음 절단입경을 최종적으로 예측하고자 한다.

$$d_{pc} = 3 \frac{r_1}{\sqrt{2H_s}} \left\{ 1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \right\} \tan \beta_2' \times \sqrt{\frac{\mu}{\rho_p v_0}} \quad (11)$$

3. 사이클론 실험모델 및 집진실험

본 연구에서 사용된 실험모델은 Fig. 1과 같이 접선유입식과 축상유입식 사이클론 집진기에 대한 성능을 비교하였다. 실험모델은 동일한 유량으로 흡입할 경우에 대하여 더스트를 처리할 수 있는 용량을 기준으로 설계 및 제작하여 서로 다른 형식의 사이클론에 대한 집진성능과 효율을 비교하고자 한다.



(a) tangential entry (b) axial-vane
Fig. 1 Comparison of cyclone type

본 연구에서 사용된 실험장치는 크게 분진 발생장치, 축상유입식 사이클론 및 파티클 카운트 (Lighthouse, Handheld 3016) 시스템으로 구성되며, Fig. 2는 실험 장치 개략도를 묘사한 것이다.

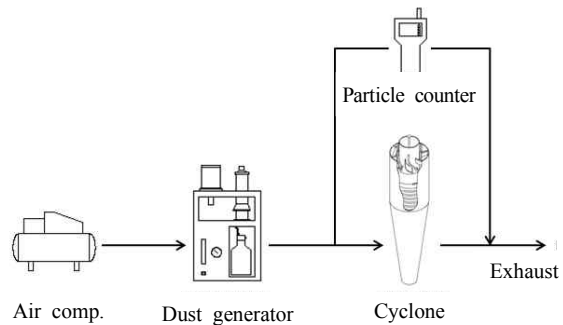


Fig. 2 Schematic diagram of particle count system

실험에 사용된 파티클 카운터는 0.3, 0.5, 1, 3, 5 그리고 10 μm 의 입자 측정이 가능하다. 측정 장비를 사용하여 유입구 및 출구덕트 내의 입경별 입자수를 측정하고 아래 식 (12)를 사용하여 집진효율을 계산하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \quad (12)$$

여기서, η : 집진효율(%)

C_i : 유입구 더스트 농도(g/m^3)

C_o : 출구 더스트 농도(g/m^3)

계산된 집진효율로부터 식 (13)을 이용하여 50% 집진 효율을 갖는 입자의 직경 즉, 절단입경을 계산하였다.

$$\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pj})^2} \quad (13)$$

여기서, η_j = j번째 크기영역의 집진효율

d_{pj} = j번째 크기영역의 직경

4. 실험결과 및 분석

4.1 접선유입식 사이클론 절단입경

Fig. 3은 실험을 통해 얻은 절단입경 값과 상기 언급한 Shepherd와 Lapple 준경험식을 통해 얻은 절단입경 값 사이의 관계 및 압력변화에 대해 나타내었다. 실험 결과 식 (13)을 통해 절단입경을 계산했을 때 3.8, 3.3 및 2.9 μm 로 절단입경이 감소하였으며, 이는 준경험식을 통해 얻은 값과 0.5 μm 범위에서 차이가 났고, 압력의 경우 준경험식으로 예측한 값과 실제 측정된 값이 거의 일치하는 경향을 보여 설계시에 준경험식을 통한 예측 작업이 반드시 필요함을 알 수 있다. 그러나 효율 등을 예측하기 위해서는 분진의 밀도, 가스의 점도 등과 같은 각각의 조건을 정확하게 대입해야만 더욱 신뢰성 있는 시뮬레이션이 가능할 것으로 판단된다.

제작된 사이클론에서 10 m^3/min 으로 유량을 증가시켰을 때 압력손실이 200 mmAq 이상으로 증가하여 실제로 현장에 적용하기에는 차압에 의한 에너지 손실이 우려되어 적절하지 못할 것으로 판단된다. 이때의 입구유속이 약 25.8 m/s 정도이고, 7.5 m^3/min 일 경우

19.4 m/s 이므로 접선유입식 사이클론의 적정유속은 최대 20 m/s 근처일 것으로 판단되어 알려진 선행연구자들의 결과와 잘 부합되는 경향을 보인다.

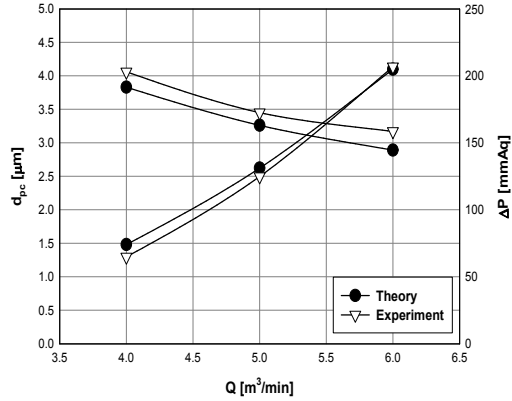


Fig. 3 Comparisons of cut diameter and pressure difference in the tangential entry type

4.2 축상유입식 사이클론 절단입경

Fig. 4는 실험을 통해 얻은 절단입경 값과 상기 언급한 기초 이론식을 통해 얻은 절단입경 및 압력손실에 대해 나타내고 있다. 실험결과 절단입경이 유량이 증가함에 따라 3.4, 2.7 및 2.2 μm 로 감소하였으며, 이는 기초 이론식을 통해 얻은 값과 0.5 μm 범위 이내에서 차이가 발생하였다. 또한 압력의 경우 접선유입식과 마찬가지로 예측한 값과 실제 측정된 값이 거의 일치하는 경향을 보였다.

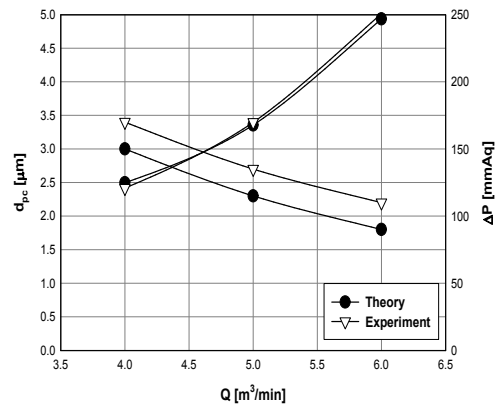


Fig. 4 Comparisons of cut diameter and pressure difference in the axial-vane type

축상유입식의 경우 비슷한 조건의 접선유입식과 비교했을 때 집진효율이 상대적으로 매우 우수함을 확인할 수 있었고, 압력손실의 경우 다소 높은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 압력손실의 심각한 증가는 운영비용을 높이는 결과를 초래하므로 축상유입식 사이클론의 운전범위를 입구유속 기준 8~10m/s 내외로 조절하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

4.3 사이클론 효율비교

접선유입식 사이클론의 성능을 측정하기 위해 인버터를 사용하여 유량을 4~6m³/min으로 변화시키면서 입자크기에 따른 집진효율을 계산하였다.

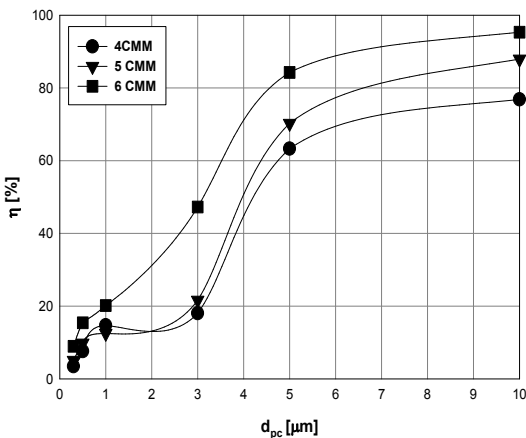


Fig. 5 Distributions of dust collection efficiency in the tangential entry type

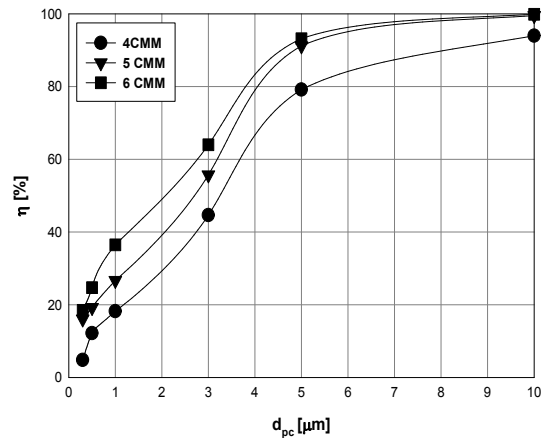


Fig. 6 Distributions of dust collection efficiency in the axial-vane type

Table 1은 접선유입식 사이클론의 입자 개수 변화를 나타내고 있다. 절단입경이 작을수록 입구대비 출구로 빠져나오는 양이 증가하여 입자제거가 불리하였고, 절단입경이 클수록 입자가 제거되는 양이 증가하여 출구로 빠져나오는 입자 개수가 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 출구에서의 흡입유량이 증가할수록 입자제거가 유리하였다.

입구와 출구에서의 입자개수를 통해 접선유입식 사이클론에 대한 집진효율을 나타내면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 절단입경 5μm 이상에서는 집진효율이 높아지는 것을 알 수 있었고, 3μm 이하에서는 집진효율이 급격하게 감소함을 확인할 수 있었다. 특히, 1μm 이하에서는 유량이 증가하여도 집진효율이 낮게

Table 1 Particle counts of tangential entry type

d _{pc} (μm)		0.3	0.5	1	3	5	10
Outlet	Inlet	822,693,428	723,645,231	522,349,762	179,258,311	39,832,172	10,631,246
	4CMM	794,310,504	668,503,464	445,459,877	146,884,260	10,639,173	2,463,259
	5CMM	780,736,063	652,438,540	457,003,806	140,484,738	11,842,104	1,284,254
	6CMM	748,980,096	612,059,136	416,939,580	94,558,759	6,269,583	495,416

Table 2 Particle counts of axial-vane type

d _{pc} (μm)		0.3	0.5	1	3	5	10
Outlet	Inlet	821,572,340	718,960,820	522,965,610	178,100,376	42,174,580	10,324,770
	4CMM	782,136,868	631,319,496	427,628,979	98,578,558	8,793,400	623,616
	5CMM	689,593,876	580,715,006	383,379,986	78,877,183	3,713,926	52,030
	6CMM	669,827,929	541,305,601	332,135,459	64,116,135	2,884,741	12,390

나타남을 알 수 있었다. 반면, 절단입경이 클 경우 집진효율은 우수하기 때문에 입자가 큰 더스트 제거에 적합할 것으로 판단된다. Table 2는 축상유입식 사이클론의 입자 개수 변화를 나타내고 있다. Table 1과 마찬가지로 기본특성은 유량이 증가할수록 출구에서의 입자 개수가 감소하여 사이클론 내에서 집진성능이 향상됨을 알 수 있었고, 절단입경이 클수록 집진성능이 급격하게 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 입구와 출구에서의 입자개수를 통해 축상유입식 사이클론에 대한 집진효율을 나타내면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

축상유입식은 접선유입식에 비해 전반적으로 집진효율이 우수한 것을 확인할 수 있었다. 특히, 절단입경 $3\mu\text{m}$ 이하에서 접선유입식에 비해 평균적으로 약 50%의 집진효율이 증가하였고, 그 이하에서도 약 40% 이상의 집진효율이 증가하였다. 반면 절단입경이 큰 $5\mu\text{m}$ 이상에서는 집진효율이 약 10% 정도 증가하는데서 그쳤다. 그러나 $10\mu\text{m}$ 이상에서는 유량이 가장 낮은 4CMM(Cubic Meter Per Minute)에서 94%, 그 이상에는 99%의 집진효율을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 접선유입식과 비교할 때 절단입경 사이즈와 관계없이 집진효율이 모두 높게 나타나 축상유입식이 집진성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

접선유입식과 축상유입식 사이클론 집진기에 대한 절단입경 예측을 이론식을 통해 예측하고 실험을 통해 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 이론식을 통해 예측한 절단입경 사이즈를 실험을 통해 검증한 결과 접선유입식과 축상유입식에서 약 $0.5\mu\text{m}$ 범위 이내에서 예측한 값이 다소 낮게 나타났다. 또한 압력손실의 경우 이론으로 예측한 값과 실험값이 거의 일치하여 이론식을 통한 집진기 설계가 충분함을 확인하였다.
2. 절단입경에 대한 실험결과 접선유입식의 경우 유량이 4CMM(Cubic Meter Per Minute)일 경우 약 $4\mu\text{m}$ 부근인 반면 축상유입식의 경우 $3.5\mu\text{m}$ 부근으로 약 $0.5\mu\text{m}$ 정도 향상되었고, 6CMM(Cubic Meter Per Minute)일 경우 약 $1\mu\text{m}$ 정도 절단입경이 줄어

들어 집진성능이 우수함을 확인하였다.

3. 집진효율에 대한 실험결과 접선유입식의 경우 $3\mu\text{m}$ 이내에서 효율이 낮은 반면 축상유입식의 경우 약 50% 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 동일한 처리용량에서 축상유입식이 집진성능이 우수함을 확인하였다.

참고문헌

1. Copper. C. D. and Alley F. C., "Air Pollution Control: A Design Approach", Waveland Press, New York, pp. 138-150, 1994.
2. Zhou. L. X. and Soo. S. L., "Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator", Powder Technology, Vol. 63, pp. 45-53, 1990.
3. Song. E. Y., Park. J. Y., Jang. D. S., "A Numerical Study for the Performance Analysis of Axial - Vane Type Cyclone Dust Collector", KSWM, Vol. 11, No. 1, pp. 17-28, 1994.
4. Kim. J. S., Lee. T. U., Kang. T. H., Kim. I. K., Kim. Y. S., "A CFD Analysis on Axial Inlet Cyclone using Realizable $k-\epsilon$ Turbulence Model", Conference Proceedings of KSME Spring Annual Meeting, pp. 1327-1332, 2006.
5. Ju. J. I., Choi. Y. S., Lee. Y. K., Kim. T. H. and Kim. S. Y., "Numerical Study of Turbulent Flow in a Hydrocyclone", Journal of Flow Machinery, Vol. 6, No. 2, pp. 34-40, 2003.
6. Young. J. K., Kim. C. N. and Jo. Y. M., "A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency for Fine Particles in a Cyclone", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 144-153, 2008.
7. Cho. Y. S., Lee. S. W., Woo. K. S., Yoon. Y. B., Park. Y. J., Lee. D. Y., Kim. H. C. and Na. B. C., "A Numerical Analysis of Flow Characteristics and Oil Separation Performance for Cyclone Oil separator designs", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 5, pp. 22-28, 2008.
8. Shin. H. J., Lee. Y. W., Park. J. H., Kim. J. H., Lee. C. W. and Jang. S. C., "A Numerical Study on the

Performance Analysis for Design Optimization of Axial-Vane Type Cyclone", Proceedings of the KSMTE Spring Annual Meeting, pp. 537-538, 2011.

9. Lapple. C. E. and Shepherd. C. B., "Flow pattern and pressure drop in dust cyclone separator", Ind. & Eng. Chem., Vol. 31 No. 8, pp. 972-984, 1939.