

고효율 사이클론의 집진효율에 관한 연구

정진도[†] · 이상권* · M. Bohnet**

A Study of High Particle Collection Efficiency of Cyclone

Jin-Do Chung, Sang-Gwon Lee and M. Bohnet

Key Words: Cyclone(사이클론), Grade efficiency(등급집진효율), Pressure drop(압력손실)

Abstract

For a reasonable analysis of grade efficiency of cyclone separator, in-line measurements of particle size and particle concentration are needed. The purpose of this study is to define the correlation of measurement data and to measure grade efficiency and pressure drop. The authors adapted that the grade efficiency could be calculated directly from the counted particle numbers. The problem of collection efficiency calculation was different from counting rate of aerosol counters under the same conditions. It is important factor to use the rate of the particle counters to obtain reliable results.

Therefore, the authors should use and calculate compensation factor considering sensitivity of aerosol counters, gas velocity and concentration affect higher 30% than originally measured grade efficiency. As the pressure drop and grade efficiency increase, as flow rate increase and then also pressure drop and grade efficiency increase.

기호설명

$c(d_p)$	입자농도
$\dot{n}(d_p)$	입자개수 비율
\dot{V}_m	체적유량
$\eta(d_p)$	효율
$n(d_p)$	입자개수
Δt_m	측정시간
A_m	측정면적
w_m	가스측정속도

1. 서론

사이클론 집진기(이하 “사이클론”으로 표기)는 구조가 간단하고 설치원가 및 운전비가 저렴하기 때문에 관성력을 이용하여 분진을 처리하는 가장 대표적인 장치이다. 현재 사이클론은 보건 위생 분야에서 호흡에 의해 인체에 흡입이 가능한 Submicrometer 크기의 입자를 집진 하는 본체직경 10mm 이하에서부터, 각종 산업공정에서 배출되는 오염가스로부터 입자상 물질을 집진 하는 7~8m 크기로 다양하게 적용되고 있다.^{1,2,3)} 사이클론은 미세 입자의 집진 에는 효과적이지 못하며, 중간입자 또는 큰 입자의 경우에 효과적인 집진이 가능하므로 전기집진기 또는 여과포 집진 장치의 수명향상을 위한 전처리용으로 사용되고 있다. 그러나, 최근에는 사이클론 내부의 유동 구조 변경, 전기효과 및 필터를 이용하여 미세 입자의 집진 에서도 고효율 화에 관한 연구가 지속

[†] 호서대학교 환경공학과

E-mail : jdchung@office.hoseo.ac.kr

TEL : (041)540-5743 FAX : (041)540-5748

* 호서대학교 대학원 환경공학과

** Technical Univ. of Braunschweig

적으로 수행되고 있다.^{4,5,6)}

입자의 투입량이 일정하게 고른 분포 상태를 만들기 위하여 분진의 일정한 투입이 필요하며 사이클론 집진 효율에서 기기 오차를 줄이기 위하여 입·출구 동시 입자 측정시 두 기기의 민감도 (Sensitivity) 측정이 필요하다. 독일의 M. Bohnet 은 집진기의 정확한 효율을 측정하기 위하여 입자측정기의 감도 비교 실험을 하여 효율의 향상요인을 규명하였으나, 국내에서는 아직까지 입자 측정기의 감도를 보정하여 효율을 산출한 곳은 없다. 따라서, 본 연구의 목적은 입·출구 입자 측정시 측정기기에서 얻은 집진 효율의 신뢰성을 높이기 위하여 최적 분진투입량과 분진량에 따른 입·출구 측정기기의 감도 분석 그리고 입구 부분 유속과 출구 부분 유속의 보정을 통하여, 사이클론의 입경별 집진 효율 측정시 측정된 데이터의 신뢰성과 재현성을 향상시키고자 한다. 사이클론의 집진 효율 및 압력손실 특성을 정량적으로 규명하여, 실제 산업장치에 적용할 수 있는 사이클론을 설계하는데 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 기체 유입부, 압력조절밸브, 분진 공급장치, 입구 입자 측정기, 사이클론 집진 장치 본체, 출구 입자 측정기, 데이터 처리기로 되어 있다. 측정된 유량, 압력 그리고 온도는 측정되는 동시에 자동적으로 컴퓨터에 저장된다. 실험에 사용한 분진은 Quartz (SiO_2)를 사용하였다. 입도 분석기로 입자를 측정된 결과, 입자의 분포는 약 $0.1 \sim 11 \mu\text{m}$ 로 구성되어 있으며, 절단 입경은 $2.95 \mu\text{m}$ 이다. 일정한 농도와 크기의 분진을 투입하기 위하여 분진 공급 장치를 사용하였다. 입자의 측정은 예비 실험으로 두 측정기기를 동일한 위치에 위치시킨 후 번갈아가며 두 기기의 감도 분석을 실시하였다. 예비 실험이 끝난 후 Fig. 1처럼 입구 부분과 출구 부분에 동일한 분석장치를 설치하여 사이클론의 등급집진 효율을 실시간으로 측정하였다. 등급측정장치는 입자의 입경별로 개수를 측정함으로써, 입자의 등급별 효율을 측정할 수 있다.

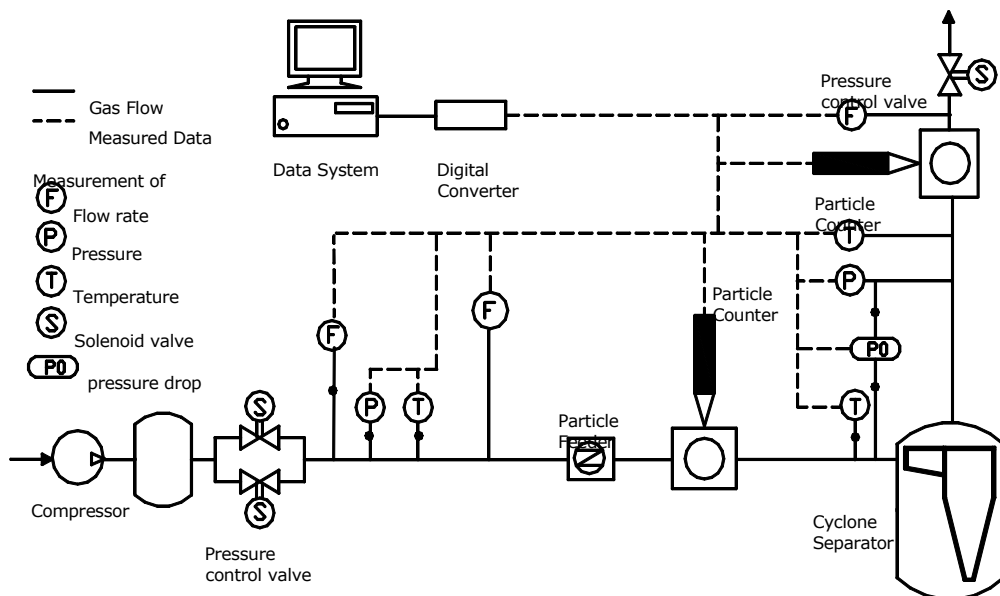


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 사이클론 본체

Fig. 2는 실험에 사용된 사이클론의 치수를 나타낸 도식도이다.

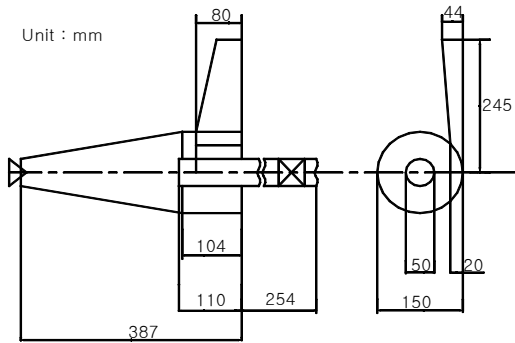


Fig. 2 Configuration of cyclone

본 연구에 사용된 사이클론의 특징은 입구 부분의 변형으로 선회(Swirl)를 강하게 생성시키는 고효율 사이클론^{7,8)}이다.

2.3 실험방법

PCS-Inlet와 PCS-Outlet의 측정 감도에 따른 사이클론의 효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 동일한 조건과 위치에서 두 입자측정기기의 감도를 측정하였다. 사이클론의 입구 부분에 PCS-Inlet와 PCS-Outlet의 측정기를 위치시켜, 동일 조건에서 두 기기를 바꿔가며 반복 실험을 하였다. 입자의 투입량을 변수를 주어 PCS-Inlet와 PCS-Outlet의 감도를 측정 비교하였다.

또한, 입구 부분과 출구 부분의 유속의 차이에 의한 측정기기의 측정 감도에 대한 영향도 고려해야 하므로, 입·출구 측정 위치에서의 유속을 측정하였다. 유속의 측정은 측정기기를 설치하기 전에 예비 실험으로 실행되었으며, 관 내부에 미세압력계(micromanometer)를 사용하여 덕트 내 유속을 측정하였다. 유량은 20~100m³/h의 변화를 주어 각각의 유속을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입도감도 분석

유입농도에 따른 입·출구 입자측정기기의 감도(Sensitivity)를 비교하기 위하여 동일한 위치에서

각 농도에 따른 반복실험을 하였다. 유입농도는 80, 85, 90mm/h (154 mg/mm)로 변수를 주었으며, 각 변수에 따라 PCS-Inlet와 PCS-Outlet을 동일한 위치에서 두 기기를 바꿔가며 측정하였다. 측정 결과 유입농도가 85mm/h 일 때, 입·출구 입자측정기기가 최적의 감도를 나타내는 것으로 확인되었다.

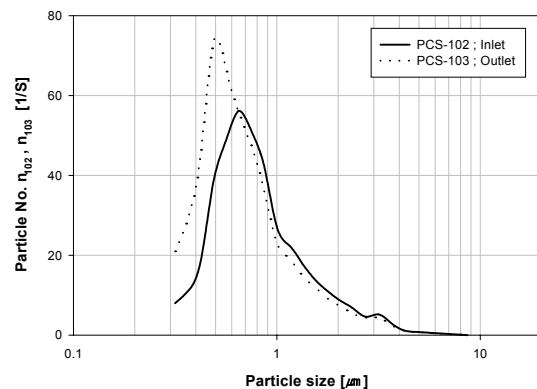


Fig. 3 Measurement curve as a variation of particle counting rate for rate PCS-Inlet and PCS-Outlet.

Fig. 3은 입자의 투입량이 85mm/h (154mg/mm)일 때, 입자 투입율에 따른 PCS-Inlet와 PCS-Outlet의 감도(Sensitivity)를 나타낸 그래프이다. 입자의 크기가 큰 부분에서는 거의 같은 감도를 보이고 있지만, 미세 입자로 갈수록 감도의 차이가 커지고 있다. 0.65 μ m 이하에서는 PCS-Outlet이, 이상에서는 PCS-Inlet가 더 좋은 감도를 나타내고 있다. 이 이유는 미세 입자들 간에 재산란이 일어나고, 재산란이 일어날 때 발생하는 미세한 빛을 PCS-Inlet보다 PCS-Outlet이 더 좋은 감도를 나타내는 것이라고 생각된다.

Fig. 4는 5 μ m 이하 부분의 입자의 감도를 PCS-Inlet와 PCS-Outlet과의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fitted curve factor가 약 1.12로 입구 입자측정기기의 감도가 더 좋은 것으로 결과가 나왔다. 따라서, 집진 효율 계산시 약 1.12만큼의 출구 입자측정기기의 보정이 필요함을 알았다.

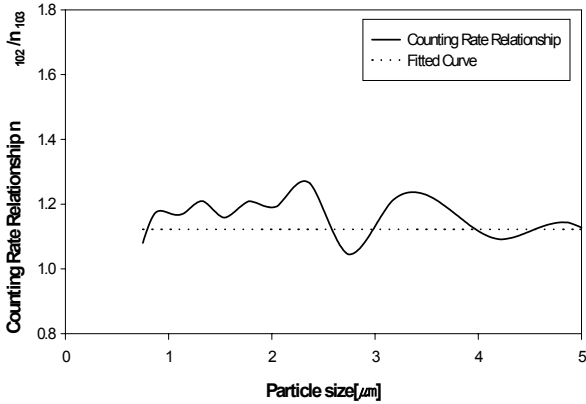


Fig. 4 Calibration curve as a variation of particle counting rate for PCS-Inlet and PCS-Outlet.

3.2 속도보정

Fig. 5는 유량의 변화에 따른 입·출구 측정기 설치시 속도 측정값을 나타낸 그림이다. 유량의 변화는 20~100m³/h이며, 유량의 증가에 따라 속도가 일정하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고, 출구 부분의 속도가 입구 부분의 속도보다 빠른 것을 볼 수 있는데, 그 이유는 일반적으로 사이클론의 유출구에서 압력으로 존재하던 에너지가 속도 에너지로 바뀌게 되어 출구 속도는 빨라지게 되며¹⁰⁾, 사이클론 입·출구의 단면적 차이도 영향을 미치기 때문이다.

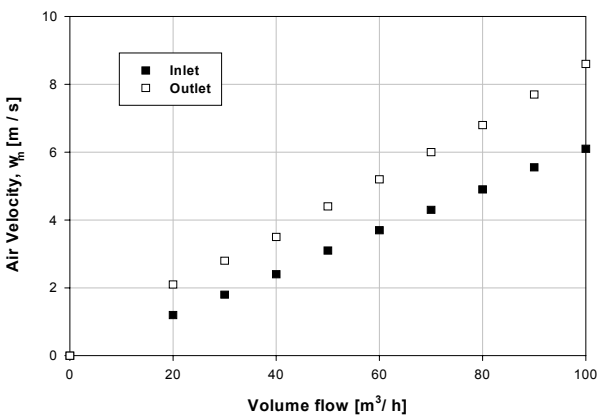


Fig. 5 Measured air velocity in dependence of the volume flow under the 20°C

Fig. 6은 입구부분과 출구부분의 가스 속도상관

관계를 나타낸 그림이다. 유량이 60 m³/h 이상일 때, 유량의 상관관계가 일정해지는 경향을 볼 수 있다. 출구 부분의 속도가 약 28% 정도 빠른 것을 알 수 있다. 따라서, 효율 계산시 측정기기 설치 위치에서의 속도 차이에 의한 영향을 줄이기 위하여, 입구 부분의 속도와 출구 부분의 속도 차이인 $W_{m,Inlet} / W_{m,Outlet} = 0.72$ 를 고려해 주어야 한다.

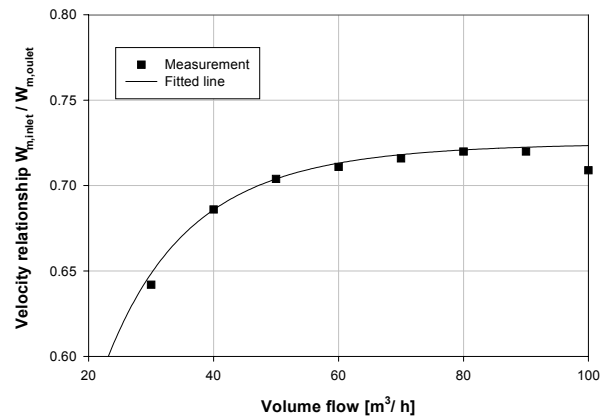


Fig. 6 Relationship of air velocity in dependence of the volume flow under the 20°C.

3.3 등급(Grade)집진효율 보정

사이클론의 집진 효율을 계산하기 위하여 PCS-Inlet와 PCS-Outlet을 사용하여 개수 측정을 하고 식(1)에 의해 입경별 집진 효율을 계산하였다.

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{C_{Outlet}(d_p)}{C_{Inlet}(d_p)} \quad (1)$$

식 (1)에서, C(d_p)는 입자의 농도로서 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$C(d_p) = \frac{\dot{n}(d_p)}{\dot{V}_m} = \frac{n(d_p)}{A_m w_m \Delta t_m} \quad (2)$$

(1)식에 (2)식을 대입하면, 아래와 같은 (3)식이 유도되어진다.

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{n_{out}(d_p)}{n_{in}(d_p)} \frac{\Delta t_{m,in}}{\Delta t_{m,out}} \frac{A_{m,in}}{A_{m,out}} \frac{w_{m,in}}{w_{m,out}} \quad (3)$$

(3)식은 측정시간, 입자의 측정 면적, 가스의 속도를 보정해 준 식이다. 그러나, 실험에서 측정시간과 입자측정 면적은 같으므로 식 (4)가 유도된다. 측정시간은 각 1min, 입자 측정 면적은

$A_{m,Inlet} = A_{m,Outlet} = 240\mu m \times 140\mu m$ 로 같다. 따라서, 식 (4)로 간략화 된 식을 유도하였다.

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{n_{Outlet}(d_p)}{n_{Inlet}(d_p)} \frac{W_{m,inlet}}{W_{m,outlet}} \quad (4)$$

(4)식에서, 입·출구 속도 차이에 의한 속도 Factor $W_{m,inlet}/W_{m,outlet} = 0.72$ 를 보정하여 주었다.

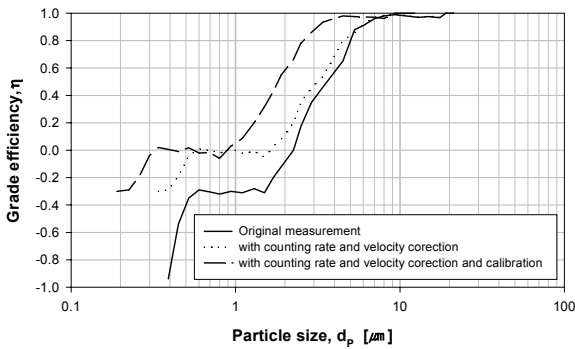


Fig. 7 Influence of different corrections on the separation degree

Fig. 7은 PCS-Inlet와 PCS-Outlet의 감도 차이와 입·출구 속도 차이를 보정을 하였을 때의, 효율의 변화를 볼 수 있는 그래프이다. 실선은 측정된 데이터 값이며, 점선은 PCS-Inlet와 PCS-Outlet의 상관관계와 속도 상관관계를 고려한 값이며, 쇄선은 최종적으로 효율 측정에 있어 영향을 미치는 요인을 보정을 한 값으로 실제 계산시 이용하는 값이다.

측정된 값에 비하여 보정을 하였을 때, 미세 입자로 갈수록 더 큰 폭의 효율 향상을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구를 통하여 집진 효율 계산시 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3.4 등급(Grade)집진효율

일반적으로 고효율 사이클론의 가장 큰 문제점은 압력손실이다. 일반적으로 압력손실은 아래의 (5)식으로 구할 수 있다.⁹⁾

$$\Delta P = K \cdot \frac{\rho V_i^2}{2} \cdot \frac{ab}{D_e^2} \quad (5)$$

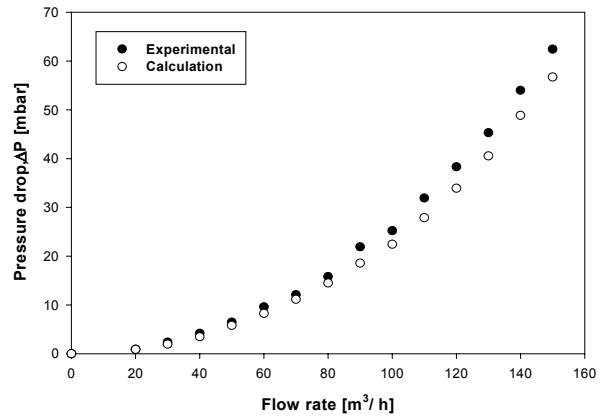


Fig. 8. Pressure drop as a variation of flow rate in cyclone.

Fig. 8은 사이클론의 압력손실을 나타낸 그래프이다. 유량이 증가할수록 압력손실 또한 증가함을 알 수 있다. 그 이유는 식 (5)에서 보면 압력손실은 입구유속의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 따라서 유량이 증가할수록 가스의 속도가 증가하므로 압력손실은 증가하게 된다. Fig. 9는 유량이 60 m³/h 일때의 입자의 입경별 효율을 나타낸 것이다. 입구 부분과 출구 부분의 입경별 개수를 측정함으로써 사이클론의 등급별 효율을 볼 수 있다.

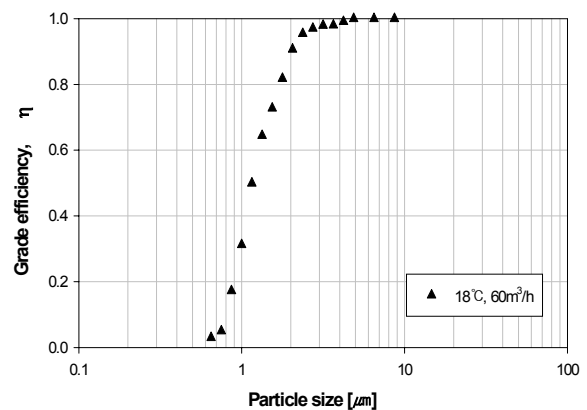


Fig. 9. Measured grade efficiency under the 60m³/h.

Fig. 10은 유량이 80 m³/h 일때의 입자의 입경별 효율을 나타낸 것이다.

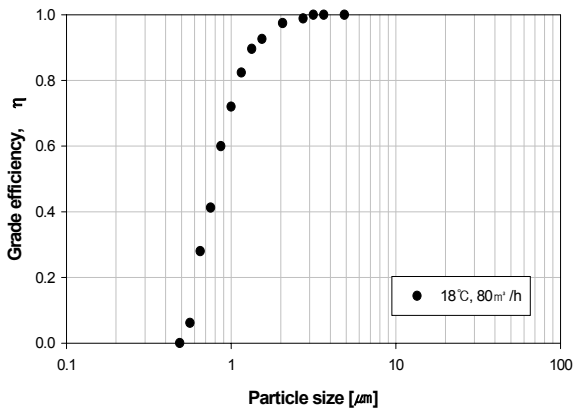


Fig. 10. Measured grade efficiency under the 80m³/h.

두 경우 모두 투입된 입자의 절단 입경인 약 3 μm에서 100%에 가까운 효율을 보이고 있다.

4. 결론

본 연구는 고효율 사이클론의 등급 집진 효율과 압력손실을 정량규명하고 효율 계산에 있어, 입·출구 동시 입자 측정에 의한 입자 감도 분석 결과와 분진 투입량 그리고 측정기기 위치에서의 속도에 따른 사이클론 효율 계산에 미치는 영향을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 두 입자측정기기의 감도 차이인 12.2%의 값과, 입·출구 부분의 속도 차이인 속도 보정값 0.72를 고려해줬을 때, 실제 측정값보다 약 30% 효율이 좋아짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 유량을 증가시켰을 때 압력손실은 입구 속도의 제곱에 비례하는 것을 볼 수 있었으며, 입·출구 면적비가 커질수록 압력손실이 커진다. 이론 계산 시와 비슷한 결과 값을 확인할 수 있었다.
- 3) 유량이 증가할수록 사이클론의 집진 효율이 증가하는 것으로 볼 수 있었다. 절단 입경이 약 0.8~1.7 μm로 고효율 사이클론임을 확인할 수 있었다.

본 실험에 사용된 사이클론의 효율은 일반 사이클론에 비해 약 5 μm 이하의 미세 입자까지도 포

집할 수 있는 고효율 사이클론임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원으로 한·독 국제 공동연구로 수행되었으며, 도움을 주신 분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 김용진, 1993, "사이클론 집진 장치 연구 동향", 공기조화 냉동 공학회, Vol. 22, No. 6
- (2) Mothe, H. and Löffler, F., 1988, "Prediction of particle removal in cyclone separators", Int. Chem. Eng., Vol. 28, pp. 231-240
- (3) 정진도, 최영태, 지평삼, 1994, "순환유동층 연소기에서 사이클론 설계를 위한 해석", Energy R&D, Vol. 16, No. 3, pp. 23-34
- (4) Copper, C. D. and Alley, F. C., 1994, "Air pollution control : A Design Approach", Waveland Press, INC. pp.131-153
- (5) Leith, D and Licht, W., 1981, "The collection efficiency of cyclone type particle collectors - A new theoretical approach", AIChE Symp. Series, Vol. 68, No. 126, pp. 196-206
- (6) 허병기, 박순동, 서형준, 1986, "사이클론의 부분 집진 효율 예측에 관한 연구", 대한환경공학회지, Vol. 8, No. 2, pp. 9-15
- (7) Morweiser, M., 1998, "Einfluß von Druck und Temperatur auf Trenngrad und Druckverlust von Aerozyklonen", Shaker Verlag
- (8) Bohnet, M., 1994, "Cyclone separators for fine particles and difficult operating conditions", KONA, Powder and particle No. 12, pp. 69-76
- (9) Lapple, C. E. and Shepherd, C. B., 1939, "Flow pattern and pressure drop in dust cyclone separator", Ind. & Eng. Chem., Vol. 31, No. 8, pp.
- (10) 전영남, 엄태인, 1996, "사이클론 집진기의 수치해석적 연구", 한국대기보전학회지, Vol. 12, No. 1, pp. 43-53