



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

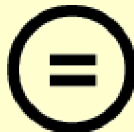
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

벽면 캐비티를 적용한 습식 사이클론의 집진특성



2014年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

權 俊 亨

工學碩士 學位論文

벽면 캐비티를 적용한 습식 사이클론의 집진특성

指導教授 呂 碩 竣

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2014年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

權 俊 亨

權俊亨의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2014年 2月



主 審 工學博士 李 柄 憲

委 員 工學博士 姜 壬 錫

委 員 工學博士 呂 碩 竣



목 차

목 차	I
그림차례	III
표 차례	V
Abstract	VI
 I. 서론	 1
 II. 이론적 배경	 3
1. 사이클론(Cyclone)	3
1.1. 사이클론(Cyclone)의 원리	3
1.1.1. 사이클론(Cyclone)의 성능특성	3
1.2. 사이클론의 종류	8
1.3. 사이클론의 특징	9
2. 세정 집진장치(Wet Scrubber)	10
2.1. 세정 원리	10
2.1.1. 직접차단(Interception)	10
2.1.2. 관성충돌(Inertial impaction)	11
2.1.3. 확산작용(Diffusion)	12
2.1.4. 응집작용	14
2.2. 세정 집진장치 종류	15
2.3. 세정 집진장치의 특징	17
3. 침투도(Penetration)	20
 III. 실험장치 및 방법	 25
1. 실험장치	25
1.1. 벽면 Cavity를 적용한 습식 사이클론	26
1.1.1. Spray hole의 위치	28
1.1.2. Flow current	29
1.2. 분진 공급장치	30
1.3. 흡입 송풍기	30
1.4. 가스 주입장치	30
1.5. Particle Counter 측정기 (GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)	30
1.6. 휴대용 연소가스 측정기(Portable Flue Gas Analyzer, E8500)	31

2. 실험용 분진	32
3. 실험 방법	35
3.1. 압력손실 특성	36
3.2. 집진효율 특성	36
IV. 실험결과 및 고찰	37
1. 압력손실 특성	37
1.1. 압력손실	37
1.1.1. 압력손실 특성	38
2. 입자상 오염물질의 집진효율 특성	40
2.1. 벽면 Cavity를 적용한 사이클론의 집진효율 특성	40
2.1.1. 유입유속에 따른 집진효율 특성	40
2.1.2. 입구농도에 따른 집진효율 특성	43
2.1.3. 분진 종류에 따른 집진효율 특성	44
2.2. 벽면 Cavity를 적용한 습식 사이클론의 집진효율 특성	45
2.2.1. 물 분사량 변화 및 유입유속 증가에 따른 집진효율 특성	45
2.2.2. 물 분사방식에 따른 집진효율 특성	48
2.2.3. 분진종류에 따른 집진효율 특성	49
3. 가스상 오염물질의 제거효율 특성	50
3.1. 유입유속에 따른 SO ₂ 제거효율 특성	50
3.2. 물 분사량에 따른 SO ₂ 제거효율 특성	52
V. 결론	53
참고문헌	55

그림 차례

Fig. 1. Cyclone	3
Fig. 2. Direct interception	10
Fig. 3. Inertial impaction	11
Fig. 4. Diffusion	13
Fig. 5. Log - normal distribution	20
Fig. 6. Target efficiency of diameter of water droplet	23
Fig. 7. Performance cut diameters predictions for typical vertical count-current spray and cross-current spray	24
Fig. 8. Schematic diagram of wet cyclone with wall cavity	25
Fig. 9. Schematic diagram of wet cyclone with wall cavity	26
Fig. 10. Position of spray hole	28
Fig. 11. Flow current of wet cyclone with wall cavity	29
Fig. 12. Particle number distribution (fly ash)	32
Fig. 13. Particle number distribution (steel dust)	33
Fig. 14. Particle mass distribution (fly ash)	33
Fig. 15. Particle mass distribution (steel dust)	34
Fig. 16. Pressure drop with inlet velocity (dry type)	38
Fig. 17. Pressure drop with inlet velocity (wet type, water spray 200 mL/min, vertical spray type)	39
Fig. 18. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 1 g/m ³)	41
Fig. 19. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m ³)	41
Fig. 20. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 5 g/m ³)	42
Fig. 21. Collection efficiency with inlet velocity and concentration (fly ash)	43
Fig. 22. Collection efficiency with inlet velocity and particle type (inlet concentration 3 g/m ³)	44
Fig. 23. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m ³ , water spray 100 mL/min, vertical spray type)	45
Fig. 24. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m ³ , water spray 200 mL/min, vertical spray type)	46

Fig. 25. Collection efficiency with inlet velocity and water spray (fly ash, inlet concentration 3 g/m ³ , vertical spray type)	47
Fig. 26. Collection efficiency with inlet velocity and spray type (fly ash, inlet concentration 3 g/m ³ , water spray 200 mL/min)	48
Fig. 27. Collection efficiency with inlet velocity and water spray (steel dust, inlet concentration 3 g/m ³ , water spray 100 mL/min, vertical spray type)	49
Fig. 28. SO ₂ removal efficiency with inlet velocity (water spray 100 mL/min, vertical spray type, operating time 1min)	50
Fig. 29. SO ₂ removal efficiency with inlet velocity (water spray 200 mL/min, vertical spray type, operating time 1min)	51
Fig. 30. SO ₂ removal efficiency with inlet velocity and water spray (water spray 100, 200 mL/min, vertical spray type, operating time 1min)	52



표 차례

Tabel. 1. Classification of Cyclone	8
Table. 2. Diffusion coefficient according to particle size	13
Table. 3. Classification of scrubber	15
Table. 4. Characteristics of scrubber	17
Table. 5. Characteristics of scrubber	19
Table. 6. Dimension and ratio of wet cyclone with wall cavity	27
Table. 7. Experimental conditions	35



Collection characteristics of wet type cyclone with wall cavity

Jun-Hyeong Kwon

Department of Environmental Engineering Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The cyclone, one of the conventional air pollution prevention facility, has lots of advantages such as the simple structure, easy to remove high inlet concentration and dealing with the particles in high-temperature gas. However, the cyclone is largely used for pre-treatment due to the low dust collection efficiency and it is difficult to eliminate the fine particles.

The cyclone scrubber can handle large-capacity gas and is the excellent performance in dust collection efficiency and provide gas adsorption and dust collection in a single unit. But the cyclone scrubber has the matter as liquid entrainment and large power consumption because of lots of pressure drop. Although this problem can be prevented by installing the demister in the conventional wet scrubber, the demister should be substituted because it could be closed by particle-phase pollutant.

Therefore, we need the development of wet type cyclone which has no demand in demister installation and replacement and can reduce pressure drop, the volume of waste water treatment and power consumption by using less liquid and cutting down liquid-gas ratio.

We designed the wet type cyclone with wall cavity to utilize the advantages to minimize liquid entrainment and re-scattering of particles, introducing the concept of the 'black box of multi-layer multi-stage porous plate system'.

The main purpose of this study is to investigate a system which can provide high collection and long-term efficiency for fine particles without a demister.

The experiment is carried out to analyze the characteristics of pressure drop and collection efficiency for present system with the experimental parameters such as inlet velocity, water quantity, spray type, particle type.

As a result of studies, it was shown that the pressure of the system was 33 mmH₂O (dry type), and 35 mmH₂O (water spray 200 mL/min) at inlet velocity 21 m/s. There was little increase of pressure drop according to spray water, but it was a very small pressure drop compared to the existing cyclone scrubber (over 100 mmH₂O).

The collection efficiencies of fly ash was 96.1% (spray water 100 mL/min), 96.8% (spray water 200 mL/min) at inlet velocity 21 m/s. And the removal efficiencies of SO₂ was 62.5% (water spray 100 mL/min), 75% (water spray 200 mL/min) at inlet velocity 6 m/s.

This system has high collection efficiency and it was able to collect dust and remove gaseous pollutants at the same time without installing a demister at low pressure drop and liquid-gas ratio.



I. 서론

발전 및 산업 시설, 운송시설에서 발생하는 대기오염의 심각성으로 인해 전 세계적으로 대기환경에 대한 관심이 집중되고 있다. 또한 대기오염물질 배출규제가 강화됨에 따라 각 산업체에 설치되어 있는 대기오염 방지시설의 교체 및 보완을 위한 저비용, 고효율 집진장치의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 이에 따른 연구개발이 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다.

여과집진장치는 연소 및 폐기물 소각공정에서 배출되는 분진입자, 유해가스 및 중금속 등을 처리·제거하는데 효과적으로, 집진 성능이 매우 우수하여 실제 산업체에서 광범위하게 적용이 되고 있다(Beitez, 1993; Croom, 1994). 그러나 여과집진장치의 낮은 여과속도에 의한 장치의 대형화와 필터의 막힘 현상에 의한 운전의 불연속 및 유지·관리의 문제는 기술적, 경제적 제고 측면에서 해결해야 할 과제이다. 또한 배출가스 온도에 따라 여재선택에 대한 제한성이 있으며 필터의 폐쇄로 인한 짧은 필터교체주기로 인한 필터교체비용, 미세한 다공성으로 인한 압력손실의 증대와 탈진에 소요되는 동력비용이 크다는 단점이 있다. 전기집진장치는 압력의 현저한 손실 없이 대용량의 배기가스를 처리할 수 있고 구조적으로 매우 단순하여 유지 및 보수가 용이한 장점이 있지만, 비저항이 높은 분진의 입자처리가 힘들고 고효율을 얻기 위해서 많은 집진면적을 필요로 하고 이에 따라 장치규모의 대형화가 요구되는 단점이 있다. 사이클론은 그 구조가 간단하고 높은 유입농도의 입자를 제거하기에 유리하며 고온 가스내의 입자처리가 가능한 장점이 있다. 하지만 집진효율이 낮으며 특히 미세입자의 집진효율이 낮은 것으로 보고되고 있다(Leith and Licht, 1972; Coker, 1993; Chung, 2003). 이러한 이유로 사이클론은 주로 전기집진장치 또는 여과집진장치의 전처리용으로 사용되고 있다(Croom, 1994). 이를 보완하기 위해 미세입자에 대한 집진 효율을 증가시키기 위해 사이클론의 구조 및 형태를 변화시키는 많은 연구가 수행된 바 있다(Jung et al., 2003; Lim et al., 2003; ; Wang et al., 2010; Lee et al., 2012; Qui et al., 2012).

주요 세정집진기로는 벤츄리 스크러버, 사이클론 스크러버, 충전탑, 분무탑 등이 있다. 이 중 벤츄리 스크러버의 장점은 세정 집진기중 가장 효율이 높으며 소형으로 대용량 가스를 처리할 수 있으며, 설치비가 상대적으로 낮다는 것이다. 하지만 벤츄리 스크러버는 압력손실(300 mmH₂O 이상)이 다른 집진기에 비해 매우 크고 동력 소비량이 많다는 것과 세정액이 대량으로 요구되어 운전비가 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 사이클론 스크러버는 집진효율이 우수하고 대용량 가스를 처리할 수 있으며 입자상, 가스상 오염물질을 동시에 처리할 수

있다. 하지만 높은 압력손실이 발생하고 세정액이 대량으로 요구되어 운전비가 많이 소요된다는 단점이 있다. 충전탑은 효율이 우수하고 가스량의 변동에 적응성이 크며 소요수압이 낮아 동력비가 적게 든다. 단점은 충전제가 고가이므로 유지비가 많이 들고, 유입되는 가스유속이 클 경우 flooding 상태가 되어 조작이 불가능하다. 분무탑은 압력손실이 적고 구조가 간단하다. 단점은 미세한 입자 제거에 불리하고 벤츄리 스크러버에 비해 집진효율이 낮다는 것이다. 일반적으로 세정집진기는 다른 집진장치에 비해 처리가스의 온도 및 습도에 큰 제한을 받지 않는다. 또한 이와 같은 세정집진장치는 공통적으로 대기오염물질 처리 시 분사되는 미세액적의 장치외부로 배출 가능성이 크다. 이를 해결하기 위해 장치출구에 demister를 설치하여 액적의 배출을 최소화하도록 한다. 그러나 demister 설치 시 입자상 오염물질과 미세액적에 의해 demister의 공극이 폐쇄되어 주기적으로 demister를 교체해 주어야 한다. 그러므로 본 연구는 demister 설치 및 교체가 필요하지 않고 액가스비를 낮추어 세정액을 적게 사용함으로써 동력 요구량을 낮추며 폐수처리량도 줄일 수 있는 집진장치를 연구·개발하는 것을 주요 목적으로 한다. 이에 사이클론에 벽면 cavity를 적용하여 cavity내로 유입된 분진이 재비산되지 않도록 하고 액적의 배출을 방지하며 젖은 벽면의 면적이 늘어남에 따라 낮은 액가스비로 운전할 수 있게 하고 물 분사 시스템을 도입함으로써 액적과 분진이 충돌·응집하게 하여 집진효율을 상승시키며 가스상 오염물질을 동시 처리할 수 있도록 설계하였다.

따라서 본 연구에서는 벽면 cavity를 적용한 습식 사이클론의 압력손실 및 집진특성을 해석하기 위해 유입유속, 물분사량, 물분사방식의 변화, 분진의 종류 등을 변수로 하여 실험적 연구를 수행하였다.

II. 이론적 배경

1. 사이클론(Cyclone)

1.1. 사이클론(Cyclone)의 원리

사이클론은 원심력을 이용하여 오염물질을 제거하는 장치로 원통형 장치내부에 유체를 입구로 유입시켜 선회류를 형성시키면 처리가스내의 분진은 원심력을 얻어 선회류를 벗어나 사이클론의 본체 내벽에 충돌하여 집진된다. 따라서 사이클론은 가동부가 없는 것이 기계적 특징이라고 할 수 있다.

1.1.1. 사이클론(Cyclone)의 성능 특성

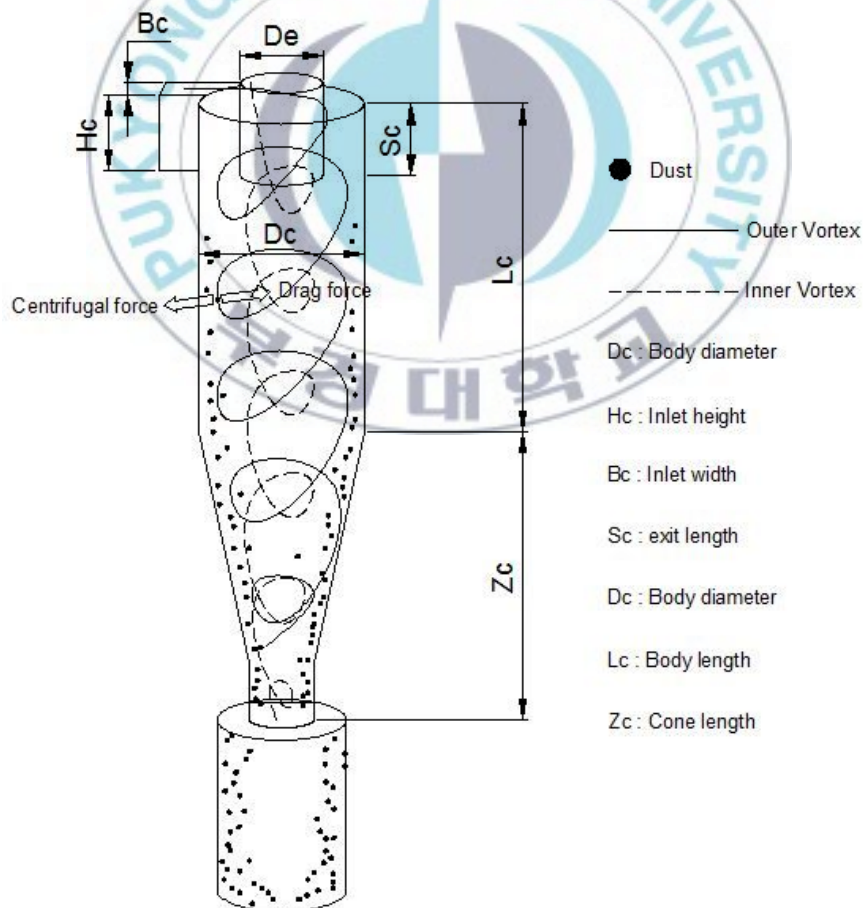


Fig. 1. Cyclone.

Fig. 1은 사이클론의 간단한 구조와 명칭을 나타낸 그림이다. 사이클론의 입구는 처리가스를 원심력 집진기 몸통내로 유입시키며 선회류 형성에 중요한 영향을 미친다. 몸통에서는 선회류의 생성과 병행하여 원심력을 받은 분진은 충돌, 낙하하며 원추부와 연결된다. 원추부는 선회류 전환점을 형성하며 아래쪽으로 좁아지므로 하부로 갈수록 선회류 속도가 빨라져 입경이 작은 분진도 충분한 원심력을 얻을 수 있기 때문에 원추부 방향으로 내려갈수록 미세분진의 포집에 더 효과적이다. 이렇듯 원추부는 침강하는 분진을 분진회적함으로 이동하도록 유도하고 직경이 작아짐으로서 선회류의 접선속도를 높혀 미세분진을 집진하기 위한 역할을 한다. 하지만 실제 cyclone 내부에서 복잡한 2차적인 흐름과 난류가 혼합되어 있기 때문에 이 흐름의 거동을 해석적으로 규명하기는 어렵다. 따라서 원심력집진장치의 특성은 경험식을 주로 이용하고 있다.

입자의 거동에 미치는 주요한 힘으로 원심력과 항력이 있다. 식 (1), (2)는 각각 원심력과 항력을 표현한 식이다. 원심력의 크기가 항력의 크기보다 커질 경우 선회류에서 이탈하여 분진이 집진되게 된다.

$$F_c = \rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} \frac{v_{in}^2}{r} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{\rho_p v_r^2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

식 (3)은 체류시간 t_r 을 나타낸 것이다.

$$t_r = \frac{2\pi R N_t}{V_{in}} \dots\dots\dots (3)$$

이 때, 분진 반경 속도는,

$$V_r = \frac{V_{in}^2 \mathfrak{J}}{R} = \mathfrak{J} \omega^2 R \dots\dots\dots (4)$$

B_c distance를 moving하는데 걸리는 시간은

$$t = \frac{B_c}{V_r} = \frac{B_c R}{V_{in}^2 \mathfrak{J}} \dots\dots\dots (5)$$

100% 포집되는 경우엔 $t=t_r$

$$\frac{B_c R}{V_{in}^2 \mathfrak{J}} = \frac{2\pi R N_t}{V_{in}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\mathfrak{J}_{crit} = \frac{B_c}{2\pi V_{in} N_t} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \dots\dots\dots (7)$$

100% 포집 되었을 때의 입자의 직경 $d_{p\ crit}$ 는

$$d_{p\ crit} = \sqrt{\frac{9B_c \mu}{\rho_p V_{in} N_t \pi}} \dots\dots\dots (8)$$

다음으로 단일 입경에서의 효율에 대해 나타내보면,

$$\eta_i = \frac{x}{B_c} \dots\dots\dots (9)$$

식 (10)의 x 는 분진의 이동거리를 나타낸다.

$$x = V_r t_r = \frac{V_{in}^2 \mathfrak{J}}{R} \frac{2\pi R N_t}{V_{in}} = 2\pi V_{in} \mathfrak{J} N_t \dots\dots\dots (10)$$

식 (10)을 식 (9)에 대입하면 식 (11)의 단일입경 효율식을 얻을 수 있다.

$$\eta_i = \frac{\pi N_t V_{in} \mathfrak{J}}{B_c/2} = \pi N_t S t k \dots\dots\dots (11)$$

$$\eta_t = \sum_i \eta_i m_i \dots\dots\dots (12)$$

m_i : 질량분율

식 (12)는 총 효율을 나타낸 식으로 단일입경효율에 질량분율을 곱한 값의 합으로 나타낼 수 있다.

하지만 다음과 같은 결론은 실제 실험 결과와는 다른 효율과 입경의 곡선을 나타내기 때문에 대략적인 성능특성을 이해하기 위한 식으로만 활용할 수 있다.

이는 초기 유도 과정에서 고려되지 않은 인자가 많기 때문이다. 첫 번째는 층류로 가정되어 있으나 실제로는 난류가 관찰된다는 것인데 이로 인해 입자를 벽으로부터 떨어지게 하거나 침강된 입자를 재비산시킨다. 둘째로 사이클론 인입구의 폭은 입자의 침강을 결정하는 사이클론 내의 공기의 폭이므로 전체 사이클론의 직경과 같이 중요하지도 않고 또한 공기의 폭은 인입구의 폭에 의해 잘 제어되지도 않는다. 마지막으로 전체 사이클론의 구조가 효율에 영향을 미치기 때문이다. 이러한 이유로 사이클론은 경험식에 의해 그 효율을 예측하는데 대표적으로 Leith Licht의 효율예측을 들 수 있다. Leith Licht의 효율예측은 사이클론의 입경별 집진효율은 해당입경의 관성충돌력의 크기와 주어진 사이클론의 기하학적 치수비에 좌우된다는 것과 이는 일종의 지수함수로서 표시된다고 가정하여 효율공식을 유도하였다. 식 (13)은 Leith Licht의 부분집진효율공식이다.

$$\eta_i = 1 - \text{EXP}\{-2(C\psi)\}^{1/2n+2} \dots\dots\dots (13)$$

η_i : 부분집진효율

C : 사이클론의 치수요인 (Cyclone dimension factor)

ψ : 충돌변수 (impaction parameter)

n : 선회류지수 (vortex exponent)

충돌변수 ψ 는 처리가스특성 및 분진특성에 좌우되기 때문에 사이클론에서는 관성충돌변수라 하며, 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\psi = \frac{\rho_p d_p^2 v_i}{18\mu D_c} (n+1) \dots\dots\dots (14)$$

치수요인 C는 실제로 사이클론의 치수와 온도에 좌우되는 함수이다. 식(14)에서 $\rho_p v_i$ 는 분진입자의 관성량이며 이 관성량이 커지면 부분집진효율은 증가한다. 실제로 Leith Liech방정식을 사용하여 집진기의 부분집진효율을 예측하기 위해서는 처리가스내의 분진입도 및 점도 등을 알아야한다.



1.2. 사이클론(Cyclone)의 종류

Table. 1. Classification of Cyclone

	종 류	설 명
구조에 따른 종류	상부유입식	상부에 설치된 입구에서 몸체에 접선방향으로 유입되어 선회류를 형성하며 하부로 진행한다.
	측상유입식	처리가스 유입구가 사이클론의 축과 평행하며, 처리가스는 사이클론의 상부에서 유입되어 입구에 설치되어 있는 나선형 유도길을 따라 선회류가 형성되면서 하부로 유입된 후 하부에서 반전을 일으켜 출구로 배출된다.
	하부유입식	하부에 설치된 입구에서 몸체에 접선방향으로 유입되어 선회류를 형성하면서 상부로 진행한다.
성능에 따른 종류	고효율	몸체의 직경(보통 30cm미만)과 용량이 작고 주로 멀티콘에 단위사이클론으로 사용되고 약 5 μ m이상의 입자를 고효율로 처리할 수 있다.
	중효율	몸체의 직경이 커서 23cm~2m 범위 내에 있는 다른 집진기와 직렬로 연결되어 전처리기로써 흔히 사용된다.

1.3. 사이클론(Cyclone)의 특징

사이클론은 설치비가 저렴하고 제작이 용이하며 운전 및 유지보수비용이 다른 장치들에 비해 적게 소요되며, 높은 집진 효율이 요구되지 않을 때나 농도가 높은 분진을 처리하기에 적합하다. 사이클론의 압력손실은 보통 25~250 mmH₂O의 낮은 수준이어서 동력비가 적게 들어간다. 또한 재질에 따라 고온, 고압의 조건에서도 사용이 가능하다. 하지만 사이클론은 입자의 직경이 10 μm 이하일 경우, 미세입자에 대해서는 집진효율이 크게 낮고 분진의 부하, 유량변동에 따라 집진효율이 민감하게 작용하기도 하기 때문에 주로 전기집진기나 여과 집진기 등과 같은 집진장치의 전처리 장치로 많이 이용되며 외부선회류와 내부선회류가 발생하는데 외부선회류가 너무 빠를 경우 충돌한 후 침강하지 않고 튕겨져 나와 내부선회류에 실려 재비산되는 경우가 있고 내부선회류가 외부선회류보다 그 속도가 빨라 정압이 감소하여 외부선회류로부터 내부선회류로 분진이 이동하여 재비산 되기도 한다.



2. 세정 집진장치 (Wet Scrubber)

2.1. 세정 원리

세정집진장치는 세정액을 분사하거나 함진 가스를 분사시켜 이때 생성된 액적, 액막, 기포 등에 의해서 함진 가스 중의 미립자를 분리 포집 하는 장치이다. 이 세정집진장치에 작용하는 힘은 관성력, 차단, 확산력, 응집력, 중력 등이 이용되고 관성력과 중력은 입경이 클수록 크며, 확산력과 응집력은 입경이 작을수록 큰 집진작용력을 발휘한다.

세정집진장치는 미세한 먼지를 50~500 μm 의 액적과 접촉 또는 분산 시켜서 이들의 액적에 접촉됨으로써 원심력 및 중력으로 함진 가스 중에 먼지를 분리하게 된다. 이때 액적과 먼지의 접촉은 관성충돌, 직접흡수와 확산으로 이루어진다.

2.1.1. 직접 차단 (Interception)

분진입자의 질량(관성력)보다는 분진입자의 크기에 좌우되는데 분진입자가 기류를 따라 액적 주위를 흘러갈 때, 액적의 표면과 분진입자와의 거리가 분진입자 직경의 1/2 정도가 되면 직접 차단이 일어난다.

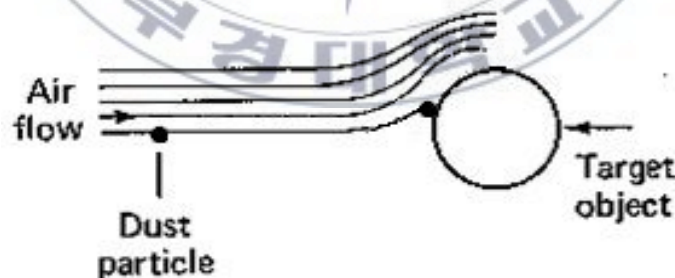


Fig. 2. Direct interception.

2.1.2. 관성충돌 (Inertial impaction)

세정집진에서는 생성된 물방울(droplet), 액막(Liquid film)과 먼지와의 접촉에 의해 분리가 행해지지만 먼지 입경이 1 μm 이상의 경우는 관성충돌이 가장 지배적인 집진작용이다.

세정집진장치에서 실제 액적에 충돌한 먼지입자의 총수와 액적에 충돌 가능한 먼지 입자 총수의 비를 충돌에 의한 집진효율(η_I)이라 하며 다음 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$\eta_I = \frac{\text{먼지타격면적}}{\text{물방울분사면적}} = \left(\frac{d_p}{d_w} \right)^2 \dots\dots\dots (15)$$

따라서 먼지의 입경이 커지면 운동량이 커져 높은 관성력을 나타내 유선으로부터 이탈해 장애물에 충돌(impaction)하기 때문에 액적분사면적 중에 청정면적이 넓어져 타격효율(Target efficiency)은 좋아진다. 반면 입경이 작아지면 관성력이 상대적으로 작아져 유선과 함께 발산됨으로 타격효율이 낮아진다. 그리고 관성충돌인 면에서 본다면 먼지의 입경 및 밀도, 가스와 물방울과의 상대속도는 클수록, 함진 가스의 점도 및 물방울지름이 작을수록 집진효율은 높아진다.

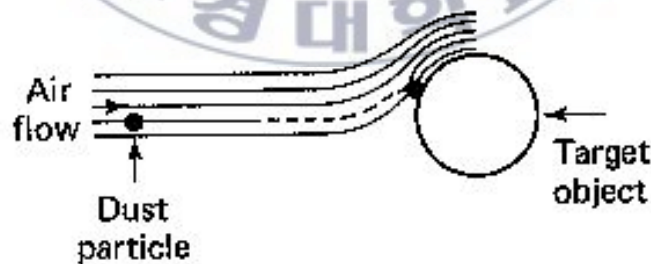


Fig. 3. Inertial impaction.

2.1.3. 확산작용(Diffusion)

함진 가스 중의 먼지입자농도에 차이가 있으면 입자는 고농도영역에서 저농도 영역으로 확산 이동하여 입자농도를 균일화하려고 하는 성질이 있다. 입자가 브라운 운동을 하는 정도가 아주 적게 되면 이 확산작용에 의해 입자는 물방울표면에 접촉 부착하면서 분리된다. 특히 $0.1 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자의 분리 시 이용되는 작용은 확산작용에 의한 부착이 지배적이다.

입경 $0.5 \mu\text{m}$ 이하인 입자는 기체분자와 충돌해 유선과 관계없이 브라운운동을 불규칙하게 하다가 최후에는 액적에 충돌되어 분리된다. 이때 미세입자의 브라운 운동에 의한 집진효율은 PECELET 변수(P_e)로 나타내고 확산에 의한 집진효율(η_d)은 다음식과 같다.

$$P_e = \frac{3 \pi \mu V d_p d_w}{C_f K_b T} \dots\dots\dots (16)$$

$$\eta_d = f\left(\frac{1}{P_e}\right) \dots\dots\dots (17)$$

d_w : 액적지름

d_p : 입자지름

C_f : 커닝햄 계수

K_b : 볼츠만 계수

T : 함진가스의 온도

따라서 함진가스의 온도가 높으면 가스분자의 운동이 격렬해서 물방울과의 충돌횟수가 많아지고 운동이 증가되기 때문에 확산에 의한 먼지 집진율은 온도가 높으면 P_e 는 작아지나 확산 집진율(η_d)은 커지게 된다.

확산에 의한 입자의 부착속도는 입자의 확산계수에 비례하고, 이 계수는 입자지름이 작을수록 크고, 입자의 물방울에 대한 부착량도 많아진다. Table. 2와 같이 입자의 확산계수는 입경이 작을수록 증대되는 것으로 나타난다.

Tabel. 2. Diffusion coefficient according to particle size

Particle size d_p (μm)	Diffusion coefficient D (cm^2/sec)
0.5	6.4×10^{-7}
0.1	6.5×10^{-6}
0.01	4.4×10^{-4}
0.001	4.1×10^{-2}
SO ₂ 분자	11.8×10^{-2}

이 외에도 확산에 의한 부착량은 확산계수 외에 입자농도에 비례하고, 흡진가스의 점도 및 배가스 물방울과 상대속도에 반비례한다. 따라서 먼지의 입경에 따른 물방울과의 부착량이 많아질수록 집진효율도 높아진다.

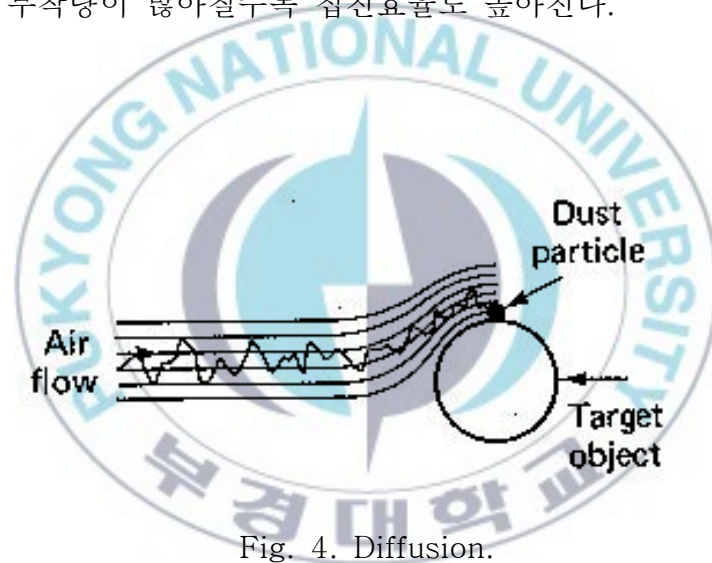


Fig. 4. Diffusion.

2.1.4. 응집작용

함진가스를 세정하면 함진 가스 온도는 거의 이슬점에 도달하기 때문에 먼지 표면은 응축수로 덮여지는 형태로 되어져 응집을 효과적으로 된다. 따라서 세정 집진시 함진 가스 온도를 될 수 있는 대로 낮게 하고, 함진 가스를 중습한 상태에서 처리하면 높은 집진율을 얻기 위한 유효한 수단이 된다. 미세입자는 물방울과 함께 형성되는 유선에 의해 이동하면서 분리되는데 물방울과 미세 입자의 중심과의 거리보다 짧게 되면 입자는 물방울과 직접 충돌하여 집진된다.

유수식에서는 함진 가스 속도가 클수록 얇은 액막이 다량으로 형성되어 체진율도 높아지지만 세정처리가스에 동반되는 미스트양이 많아지므로 출구 측의 함진 가스속도는 될 수 있는 대로 느리게 하거나 출구 측에 demister 즉, 미스트 분리장치를 설치하여 미스트의 배출을 억제하여야 한다.



2.2. 세정 집진장치 종류

Table. 3. Classification of scrubber

	종류	특징	
세정액 접촉 방식	유수식	장치 내에 세정액을 채운 후 배출가스를 유입시키고 이때 세정액의 액적, 액막, 기포와 접촉시키는 방식	
		종류	S impeller 형, 로터형, 분수형, 나선가이드 베인형
	가압수식	세정액을 가압 공급하여 함진가스와 접촉하는 방식	
		종류	벤츄리스크러버, 제트스크러버, 사이클론스크러버, 충전탑, 분무탑
	회전식	송풍기 팬의 회전을 이용하여 공급수를 다량의 액적, 액막, 기포로 만들어 함진가스를 세정하는 방식	
		종류	Theisen Washer, Impulse Scrubber
에너지 공급 형태	가스상 접촉 세정기 (Gas Phase Contacting Scrubber)	처리가스 접촉에 필요한 동력이 처리가스 자체에 공급되는 세정 스크러버, 처리가스를 세정액 표면 또는 단면에 작용하여 세정액이 액적으로 되게 하는 세정집진장치	
		종류	판상 스크러버, 오리피스 스크러버, 벤츄리 스크러버
	액상 접촉 세정기 (Liquid Phase Contacting)	특수 설계된 노즐을 사용하여 고압액체를 분사시켜 액적을 생성시킨 다음 풍력을 이용하여 집진실로 유입시킨 후 처리가스내의 분진과 접촉시켜 제거하는 방식	

Scrubber)	종류	살수탑, 이젝터 벤츄리
액상/기상 접촉 세정기 (Liquid Phase/ Gas Phase Contacting Scrubber)	처리가스와 세정액으로부터 에너지를 얻어 가동되는 방식	
	종류	원심력살수, 이동상 스크러버, 베플살수세정집진기



2.3. 세정 집진장치의 특징

Table. 4. Characteristics of scrubber

종류	제거방식	특징		
분무탑 (살수탑)	탑 내의 살수노즐을 이용하여 함진가스와 향류 접촉시켜 분진을 제거	운전 조건	처리가스 속도 (m/s)	1 ~ 3
			액가스비 (L/m³)	0.5 ~ 1.5
			ΔP (mmH ₂ O)	50 ~ 100
		장점	• ΔP 낮다 • 구조가 간단, 저비용 • 10 μ m 이상의 입자제거에 용이	
단점	• 미세입자 제거에 불리 • 낮은 집진효율			
살수탑 세정기 (Spray Chamber Scrubber)	분진을 함유한 공기가 원통형이나 직사각형 탑을 통과하여 살수 노즐에 의해 생성된 액적과 접촉하여 제거	종류	• 수직향류 살수탑, • 수평 교차류 살수탑	
사이클론 세정기	탑 내를 선회·상승하는 가스에 탑 중심의 스프레이 노즐에서 액적을 분사시켜 분진을 제거	운전 조건	입구유속 (m/s)	15 ~ 35
			액가스비 (L/m³)	0.3 ~ 4
			ΔP (mmH ₂ O)	100 ~ 200
		장점	• 집진효율이 우수 • 대용량 가스의 처리가 가능	
단점	• 사이클론의 직경이 크면 효율이 저하됨 • 높은 수압요구로 높은 동력요구량			
원심력 살수탑	일반 살수탑과 제거 방식이 상이함	• 일반 살수탑을 변형하여 처리가스를 선유입시켜 집진효율을 향상시킴 • 가스 속도가 빨라짐 • 원심력은 액적분리 향상시킴 • 세정액을 더욱 미세하게 만들 수 있음		

벤츄리 스크러버	슬롯부를 만들어 유입된 함진 가스 에 분무수를 병류 또는 십자류 방식 으로 접촉시켜 수 적에 충돌 · 차단 하여 제거	운전 조건	입구유속 (m/s)	60 ~ 90
			먼지농도 (g/m³)	10이하
			액가스비 (L/m³)	0.3 ~ 0.5
			ΔP (mmH ₂ O)	300 ~ 800
		장점	• 미세입자에 대한 집진효율 가장 높음 • 소형으로 대용량 가스 처리 가능 • 설치면적이 적음	
		단점	• ΔP가 높음 • 동력소비량이 크다 • 세정액의 대량요구로 운전비가 많이 든다	
충전탑	탑 내에 충전제를 넣어 함진 gas와 액적과의 접촉면 적을 크게 하며, 세정액과 향류 접 촉시켜 제거	운전 조건	겉보기 이동속도 (m/s)	0.3 ~ 1
			분당가스유량 (m³/min)	300
			액가스비 (L/m³)	2 ~ 3
			ΔP (mmH ₂ O)	100 ~ 250
		장점	• 효율이 우수 • 가스량 변동에 적응성이 높음 • 동력비가 적게 듬	
		단점	• 충전제 고가 → 많은 유지비용 • 흡수액 내 고형물 함유할 경우 장애 발생 가능성 • 가스유속이 클 경우 flooding 상태로 조작 불가능	

Table. 5. Characteristics of scrubber

장점	단점
• 재비산 우려가 없음	• 재질 부식 가능성
• 입자와 가스의 동시 처리 가능	• 동력비 및 압력손실이 큼
• 온도 영향을 적게 받아, 고온 가스 처리 가능	• 폐수처리 문제 발생
• 화재 및 폭발 위험 거의 없음	• 부생물 회수의 어려움



3. 침투도(Penetration)

습식세정기의 설계를 위해 여러 가지 모델이 이용된다. 각 모델은 다양한 기-액 접촉과정을 설명하고 있으며 특정 분진입경에 대한 침투도(Penetration)예측을 기본으로 한다. 침투도 Pt_d 는 처리가스 중 채취되지 않는 특정 분진입경 d_p 의 분율로써 정의된다. 침투도는 집진효율과 관계가 있다.

$$Pt_d = 1 - \eta_d \dots\dots\dots (18)$$

η_d : 직경 d_p 인 분진의 집진효율

이때, 총괄 침투도 Pt_0 는

$$Pt_0 = \sum (Pt_d \cdot M_d) \dots\dots\dots (19)$$

M_d : 특정입경에서 분진의 질량분율

사실상, Pt_0 는 각 입경별 분진의 침투도에 입경별 중량분율을 곱한 총합이다. 계산과정은 산업용 배출시설에서 배출되는 분진의 입경분포를 Fig. 5와 같이 대수정규 분포(log - normal distribution)로 가정하여 단순화 할 수 있다.

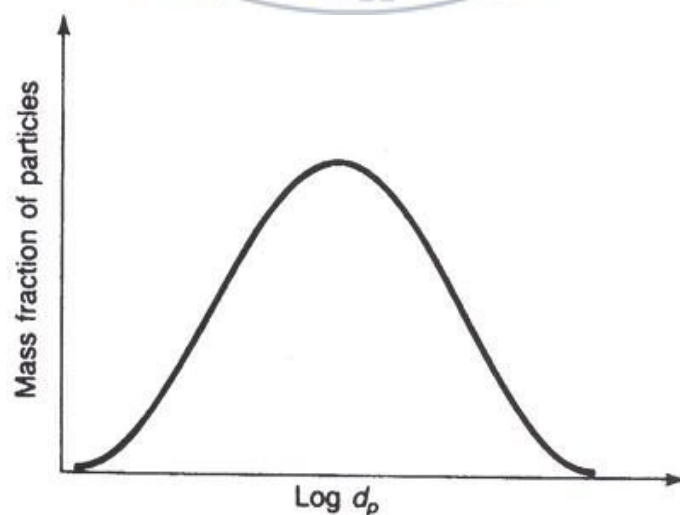


Fig. 5. Log - normal distribution.

다음은 살수장치의 설계계산을 설명하기 위하여 살수탑의 침투모델을 사용할 것이다. 기액접촉방법은 향류(counter current), 동류(co-current) 및 교차류(cross-current) 등으로 분류할 수 있다. 살수탑에서 1차적 분진 집진기전은 살수된 액적과의 관성충돌이다.

Calvert(1977)는 향류수직살수탑(counter current vertical spray chamber)에서 분진의 침투도를 계산하기 위해 아래와 같은 식을 개발하였다.

$$Pt_d = \exp \left[- \frac{3 Q_L V_t Z \eta_d}{4 Q_G r_d (V_t - V_G)} \right] = \exp \left[- \frac{A_d V_t \eta_d}{Q_G} \right] \dots (20)$$

Pt_d : 주어진 입경에 대한 침투도 (0~0.1)

Q_L : 세정액 유량 [m^3/s]

Q_G : 처리가스 유량 [m^3/s]

V_G : 표면가스 속도 [cm/s]

V_t : 처리가스 속도 [cm/s]

A_d : 세정기 내 모든 액적의 단면적 [cm^2]

Z : 기액 접촉영역의 길이 [cm]

η_d : 단일 액적의 집진효율 (0~10)

r_d : 액적의 반경 [cm]

식에서 A_d 는

$$A_d = \frac{3 Q_L Z}{4 r_d (V_t - V_G)} \dots \dots \dots (21)$$

단일 액적의 효율은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\eta_d = \left[\frac{K_p}{(K_p + 0.7)} \right]^2 \dots \dots \dots (22)$$

K_p : 충돌계수

K_p 는 Calvert에 의해 정의되었다.

$$K_p = \frac{C_c \rho_p d_p^2 V_p}{9 \mu d_d} = \frac{d_a^2 V_p \rho_w}{9 \mu d_d} \dots\dots\dots (23)$$

C_c : 「커닝햄」 보정계수 [무차원]

V_p : 입자속도 (액적과의 상대속도) [cm/s]

ρ_p : 입자밀도 [g/cm³]

ρ_w : 물의밀도 [g/cm³]

d_p : 물리적 입자직경 [cm]

d_d : 액적직경 [cm]

d_a : 공기역학적 직경 [cm]

μ : 가스점도 [poise]

수직 향류 살수탑에서 입자의 액적과의 상대속도가 액적의 종말침강속도와 같다. 즉 $V_t = V_p$ 가 된다. 식 (20)은 살수된 액적의 크기가 일정하고 종말속도에 즉시 도달한다는 가정을 기초로 한다. Calvert(1984)는 벽면효과와 부유액적의 손실을 보정하기 위해, 액/가스비(Q_L/Q_G)에 0.2를 곱해야 한다고 제안하였다. 식 (20)을 응용하여 살수탑을 설계할 때, 유입가스 중 처리입자의 입경분포를 알아야 한다. 먼저 처리입자의 입경별로 침투도를 계산하고 다음으로 총괄침투도 Pt_0 를 계산한다. 주어진 입경분포에 대하여, 최고 총괄효율을 얻을 수 있는 최적 운영 변수가 존재한다.

Langmuir와 Blodgett(1946)는 액적의 집진효율 η_d 를 다음과 같은 무차원식으로 발표하였다.

$$\eta_d = \frac{k V_p V_t}{g d_d} \dots\dots\dots (24)$$

k : 실험적 상수

g : 중력가속도 = 980 cm/s²

V_p : 액적에 대한 입자의 상대속도 [cm/s]

V_t : 입자의 종말속도 [cm/s]

d_d : 포집직경 or 액적의 직경 [cm]

식 (24)에 의하면, 액적의 크기가 작아질수록 집진효율은 증가한다. 그러나 Stairmand(1964)는 액적의 크기가 최적상태보다 작아지더라도 액적의 처리효율은 증가하지 않음을 밝힌 바 있다. 아래의 Fig. 6은 밀도 2 g/cm³인 입경별 분진에 대한 집진효율을 액적의 크기함수로 표현한 것이다. 이 자료는 살수탑이 500~1000 μ m범위의 액적크기에서 운영되어야 함을 보여준다. 최적 액적크기는 존재한다. 왜냐하면, 크기가 매우 작은 액적은 처리가스 속도까지 급속히 가속되기 때문에 액적에 대한 입자의 상대속도 V_p 의 값은 감소되고 반면 크기가 매우 큰 액적은 동일 질량에 대해 상대적으로 작은 표면적을 가지기 때문이다.

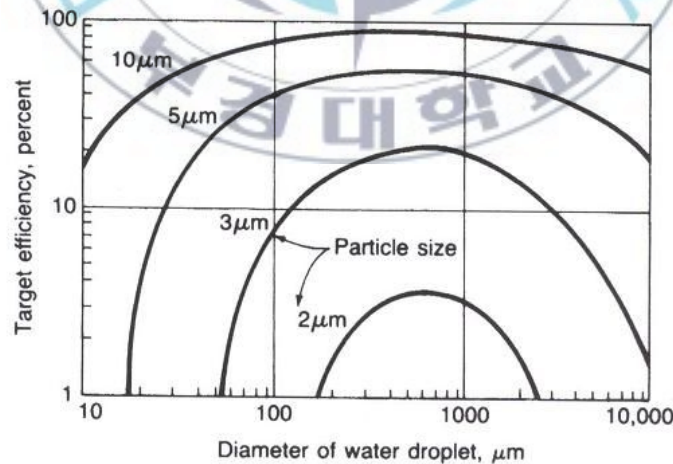


Fig. 6. Target efficiency of diameter of water droplet.

교차류 살수탑의 경우 식 (20)을 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$Pt_d = \exp\left[-\frac{3 Q_L Z \eta_d}{4 Q_G r_d}\right] = \exp\left[-\frac{A_d V_p \eta_d}{Q_G}\right] \dots\dots\dots (25)$$

Calvert(1974)는 식 (20)과 (25)에 대한 해를 아래의 Fig. 7과 같이 도식하였다. Fig. 7에서, 집진효율이 50%인 공기역학적 직경, d_{pc} 는 변수로써 액적의 직경과 액/가스비와 함께 살수탑의 높이로 표현할 수 있다. 살수탑이 기준높이 이하일 때, d_{pc} 가 매우 빠르게 증가하며, 침투도는 100%에 접근한다. Fig. 7은 표준 상태에 근접한 물과 공기에 대해서만 유효하다.

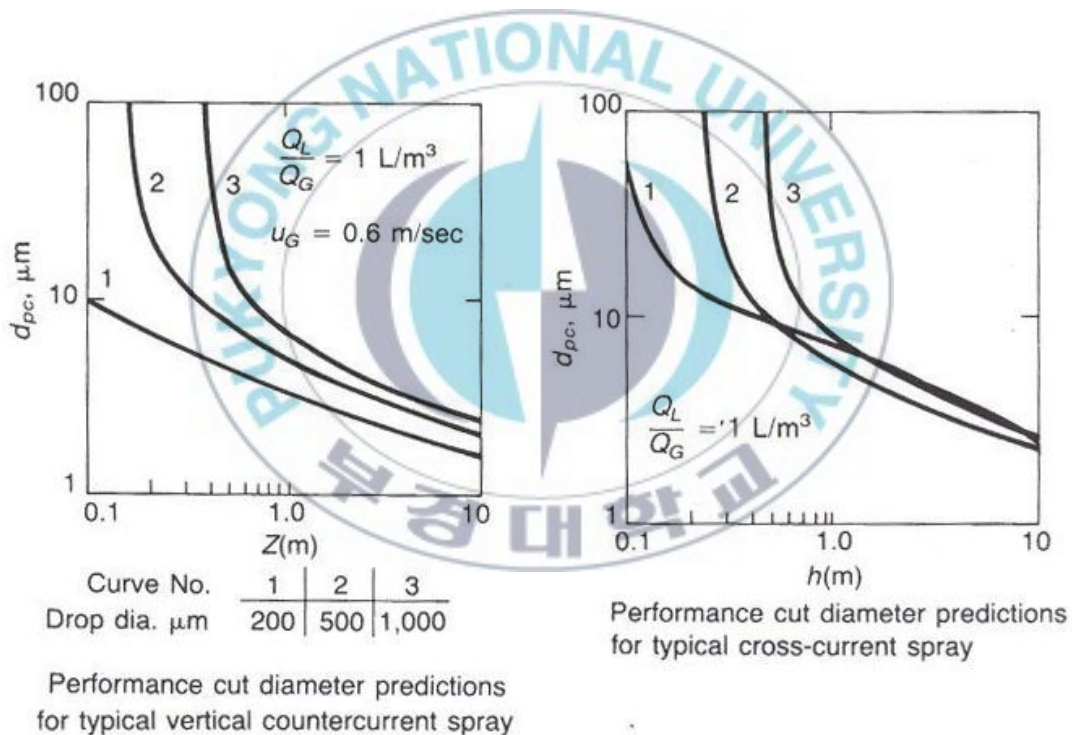


Fig. 7. Performance cut diameters predictions for typical vertical count-current spray and cross-current spray.

Ⅲ. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치 구성을 살펴보면 분진공급장치, 가스 주입장치, water spray, 벽면 cavity를 적용한 습식 사이클론 본체, 유입유속·압력손실 및 집진 효율 등을 측정할 수 있는 계측시스템으로 이루어져 있으며, 유입유속과 압력손실은 각각 Anemometer(model 6162, Kanomax LTD.), Differential Pressure Transmitter(midi LOGGERGL800, GRAPHTEC.)을 사용하여 계측하였으며, 집진효율은 중량법으로 측정하였다.

Fig. 8은 본 집진장치의 전체 시스템에 관한 모식도이다.

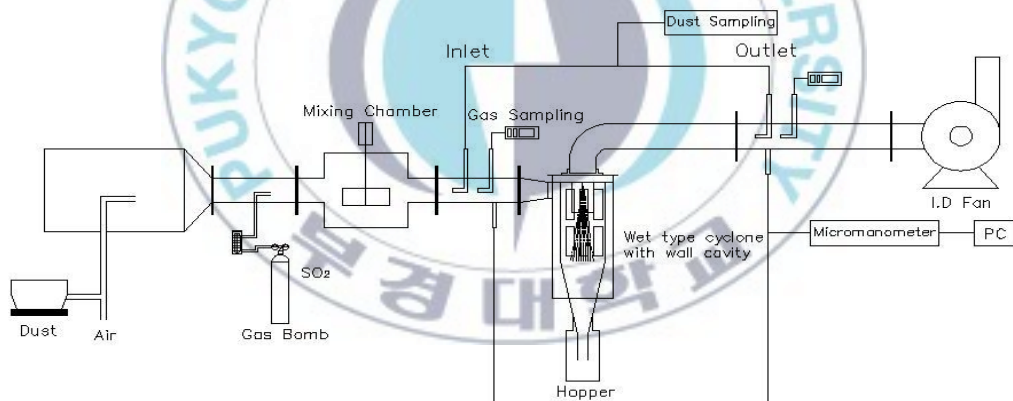


Fig. 8. Schematic diagram of wet cyclone with wall cavity.

1.1. 벽면 Cavity를 적용한 습식 사이클론

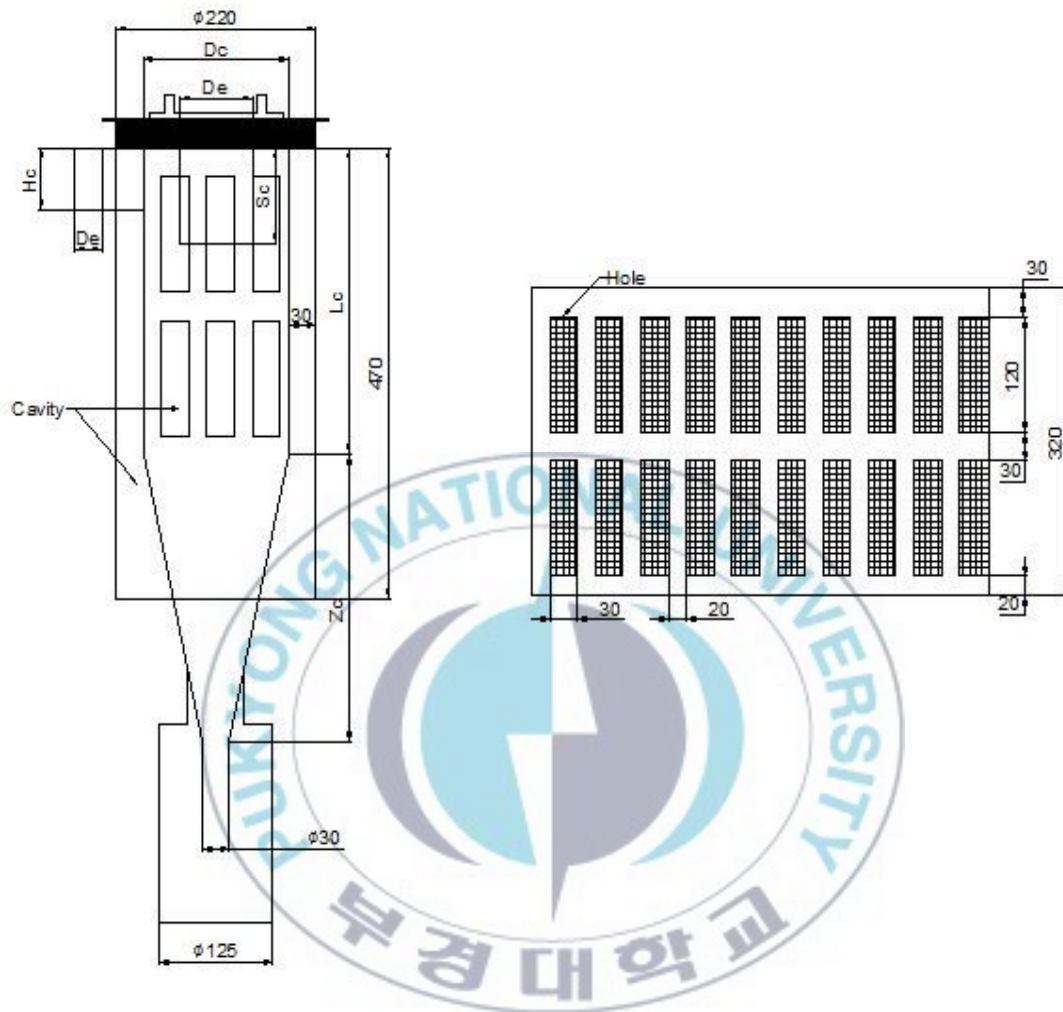


Fig. 9. Schematic diagram of wet cyclone with wall cavity.

Table 6. Dimension and ratio of wet cyclone with wall cavity

	Dimension (mm)	Ratio (/D _c)
D _c	160	1
H _c	65	0.39
B _c	30	0.1875
S _c	100	0.625
D _e	80	0.5
L _c	320	2
Z _c	300	1.875

Fig. 9의 왼쪽은 실험장치 본체인 벽면 Cavity를 적용한 습식사이클론의 모식도이고 오른쪽은 몸통부분의 Cavity의 치수를 설명한 것이다. 기존의 사이클론의 형상과 가장 큰 차이는 벽면에 Cavity를 적용하고 외벽을 둔 것이 가장 큰 차이이다. 이런 차이는 포집된 입자가 몸통과 외벽사이에 갇히게 되고 내부선회류의 음압으로 인한 재비산과 액적의 배출을 최소화할 수 있다. 그리고 아래의 Table. 6은 벽면 cavity를 이용한 습식 사이클론의 치수와 D_c를 기준으로 한 치수비를 나타냈다.

1.1.1. Spray hole의 위치

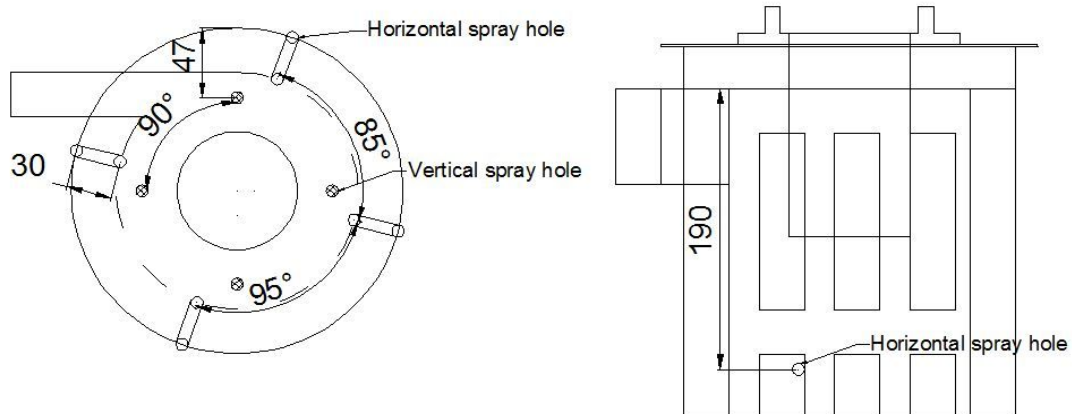


Fig. 10. Position of spray hole.

Fig. 10은 벽면 cavity를 적용한 습식 사이클론에서 물 분사구의 위치를 표현한 것이다. Horizontal spray hole은 벽면 cavity를 통해 분사할 수 있고 분사각이 겹치지 않게 하여 액적과 입자의 접촉면적을 넓게 할 수 있게 위치하였다. 또한 분사구의 높이는 vortex finder의 위치와는 떨어져있으며 낮게 설치하여 접촉시간을 줄이지 않게 위치하였다. Vortex finder와의 위치가 가까울 경우 내부 선회류의 음압으로 인해 분사 즉시 외부로 배출될 수 있기 때문이다. Vertical spray hole의 경우도 서로 마주보게 하여 분사각이 겹치지 않게 하고 vortex finder보다 벽면 cavity를 적용한 벽면에 비교적 가깝게 위치하게 하여 액적의 직접적인 배출의 가능성을 줄일 수 있게 위치하였다.

1.1.2. Flow current

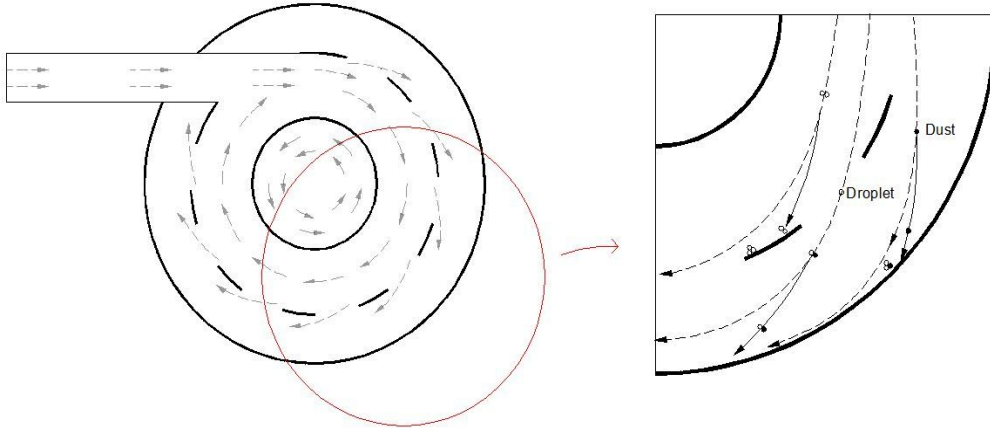


Fig. 11. Flow current of wet cyclone with wall cavity.

Fig. 11에서 입자를 포함한 기류가 벽면 cavity를 적용한 습식사이클론으로 유입되었을 때의 흐름을 간단히 나타낸 것이다. 응집되어 입경이 커진 액적은 cavity가 적용된 벽면을 타고 흐르게 됨으로써 분진이 벽면에 부착되는 부착력을 높이게 되고 중력에 의해 흘러 내려서 hopper에 담기게 된다. 그리고 액적에 의해 응집된 충분한 관성력을 가진 액적과 분진은 cavity를 적용한 벽면에 부딪혀 포집되거나 cavity를 통해 통과하여 외벽에 부딪혀 침강하여 cavity를 적용한 벽면과 외벽사이의 공간에 갇히게 됨으로써 재비산을 방지한다. 또한 이러한 현상은 cavity를 적용한 벽면에 부딪힌 분진이 튕겨져나와 내부선회류에 의해 재비산되는 것을 방지하고 액적의 배출을 막는 역할을 하게 된다. 더불어 젖은 벽면의 면적을 넓혀 부착되어 제거되는 분진량을 증가시킴으로서 집진효율을 향상시킨다.

1.2. 분진 공급장치

일정량의 분진을 집진기 내부로 공급하기 위한 분진 공급장치는 feeding screw와 전압조절장치(power supply)로 이루어져 있다. 분진은 공급장치의 hopper의 하부에 위치한 feeding screw의 일정한 회전에 의하여 hopper의 옆에 부착되어 있는 원형관으로 유입되어지고, 유입되어진 분진은 원형관의 상부에서 압축공기를 상 방향으로 분사시켜 주면 상·하부의 압력구배에 의해 분진이 기류 중으로 분산, 공급되어진다. 전압조절장치를 사용하여 feeding screw의 회전 속도 및 압축공기량을 제어해줌으로써 공급되어지는 분진의 양을 조절하고, 이에 따라 유입농도를 변화시킬 수 있게 제작되었다.

1.3. 흡입 송풍기

실험장치를 통과하는 기류는 실험 장치의 후단에 설치되어 있는 흡입 송풍기(Induced Draft Fan)에 의해 형성되어진다. 흡입 송풍기는 동력 5마력의 turbo-fan으로 기류의 유량 조절은 송풍기에 연결된 인버터(Inverter)에 의해 정확히 조절되어진다.

1.4. 가스 주입장치

가스 주입장치에 사용된 가스는 SO₂ 혼합기체인 표준가스를 사용했고 플레이트의 입·출구덕트에 분석장치(Portable Flue Gas Analyzer)를 배치하여 실시간 가스 농도를 측정하여 제거효율을 구하였다.

1.5. Particle Counter 측정기(GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)

Particle Counter 측정기(GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)는 광산란 측정법을 이용하여 indoor, outdoor에서 공기 중에 떠다니는 분진을 측정하는 장비로, 각각의 입경별로 분진의 개수를 측정하는 Particle Counter로서의 기능과 PM10, PM2.5 등을 측정할 수 있는 농도측정장치로써 기능을 수행한다. 본 기기는 15 Size Channel (0.3, 0.4, 0.5, 0.65, 0.8, 1.0, 1.6, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5, 10, 15, 20 μ m)을 통해 실시간 Particle Counter 측정한다. 본 실험은 이 기기의 Particle Counter로의 기능을 이용하여 사용한 분진의 입경별 분포를 보았다.

1.6. 휴대용 연소가스 측정기(Portable Flue Gas Analyzer, E8500)

가스 측정에 사용된 휴대용 연소가스 측정기(Portable Flue Gas Analyzer, E8500)는 내부 Thermoelectric Chiller 내장, 자동 드레인 펌프 내장, 피토티브로 가스유속 측정되며 표준 측정항목은 O_2 , CO , NO , NO_x 선택측정항목은 NO_2 , SO_2 , H_2S , CO_2 , C_xH_y 가 있으며 본 실험에 사용한 SO_2 의 측정농도 범위는 0~4000 ppm이다. 이 기기를 덕트의 입구와 출구에서 실시간으로 가스 농도를 측정하였다.



2. 실험용 분진

실험에 사용한 분진 중 fly ash는 태안 석탄 화력발전소에서 채취한 것이고 steel dust는 한국 기계 연구원에서 제공받은 것으로 Particle Counter 측정기 (GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)를 사용하여 분진의 입경별 분포를 알아보았다. Particle Counter 측정기 (GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)는 15개의 채널을 이용하여 분진의 수농도를 측정한다. fly ash는 개수기준 평균입경이 $0.626\ \mu\text{m}$, 무게기준 평균입경이 $2.0\ \mu\text{m}$, steel dust의 개수기준 평균입경이 $0.52\ \mu\text{m}$, 무게기준 평균입경이 $1.7\ \mu\text{m}$ 인 분진을 사용하였다.

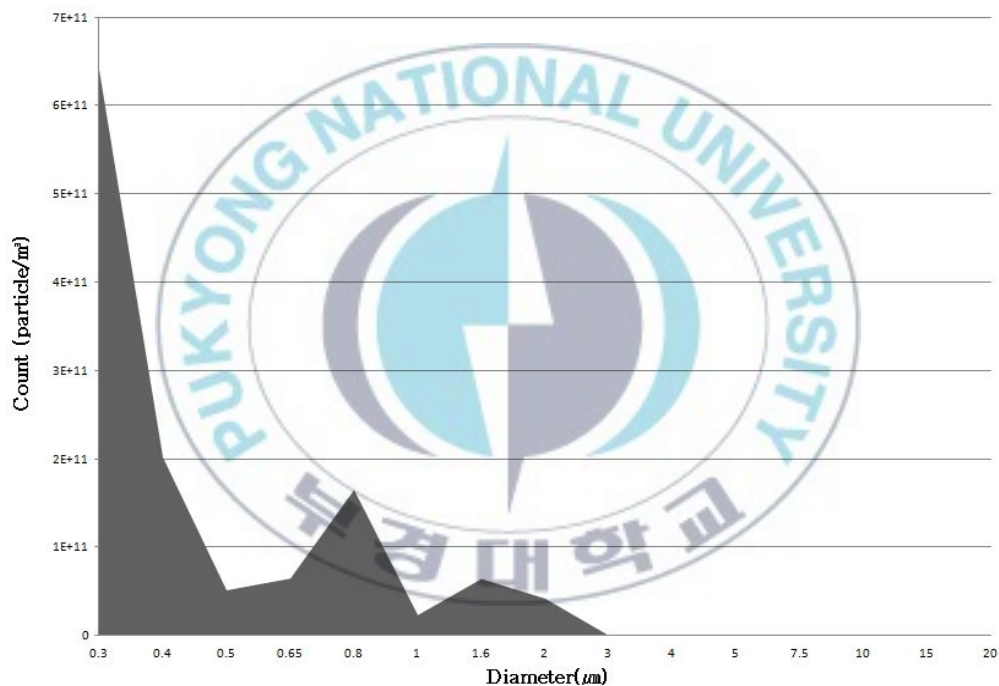


Fig. 12. Particle number distribution (fly ash).

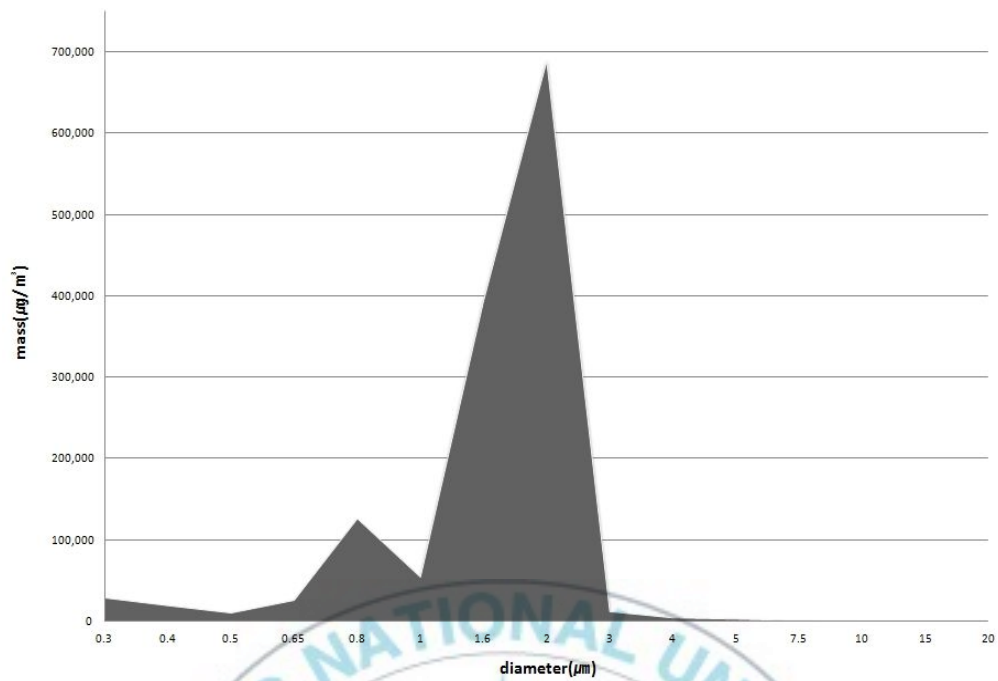


Fig. 13. Particle mass distribution (fly ash).

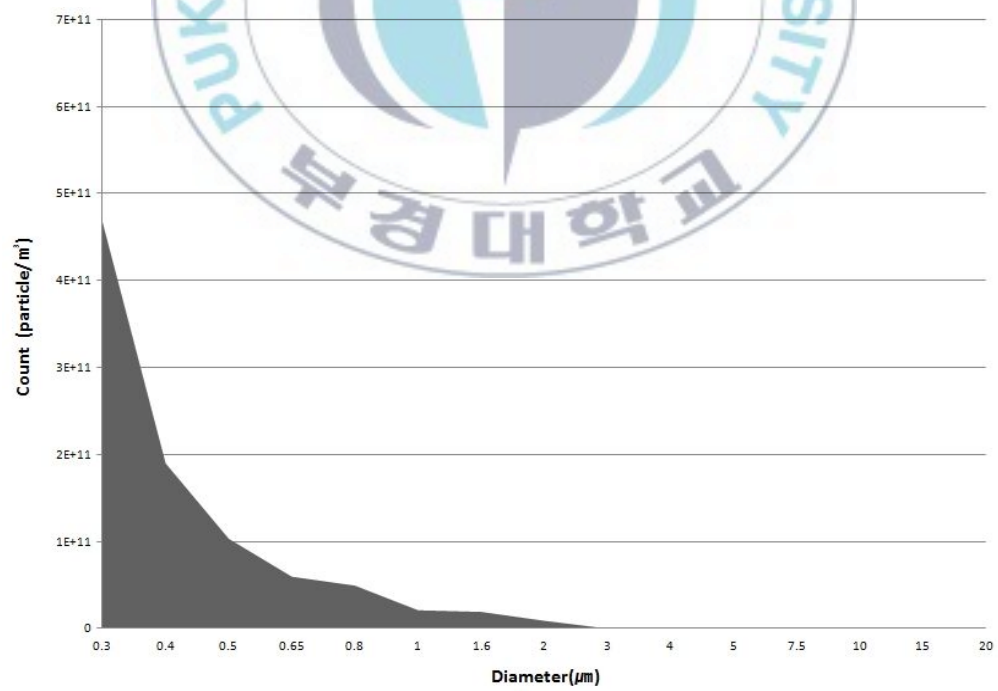


Fig. 14. Particle number distribution (steel dust).

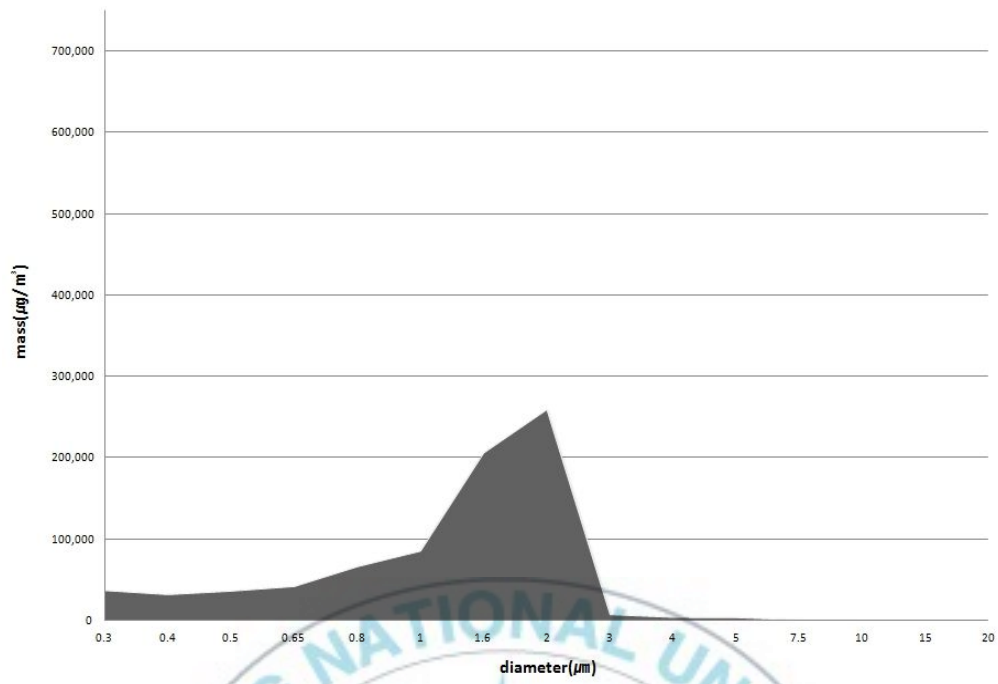


Fig. 15. Particle mass distribution (steel dust).

3. 실험방법

벽면 cavity를 적용한 사이클론의 집진 특성을 알아보기 위해 입자상 오염물질(fly ash, steel dust)와 가스상 오염물질(SO_2)로 구분하여 제거효율을 알아보았다. 사이클론 입구의 크기는 $65\text{mm} \times 30\text{mm}$ 이며, 압력손실은 dry type과 wet type으로 구분하여 각각 유입유속에 따라 측정하였으며, 입자상 오염물질의 집진 효율 또한 dry type과 wet type으로 구분하여 각각 유입유속에 따라 측정하였으며 wet type은 물 분사량(100 mL/min , 200 mL/min)과 물 분사방식(vertical spray type, horizontal spray type)에 따라 구분하여 측정하였다.

가스상 오염물질은 SO_2 가스를 사용하여 측정하였다. SO_2 가스의 농도는 휴대용 연소가스 측정기(E8500)을 사용하여 실시간으로 측정하였으며, Table. 7은 본 실험에 대한 조건을 요약한 것이다.

Table 7. Experimental conditions

Description	Condition
Particle	fly ash, steel dust
Inlet velocity (m/s)	6, 9, 12, 15, 18, 21
Flow rate (m^3/min)	0.7, 1.0, 1.4, 1.8, 2.1, 2.5
Dust inlet concentration (g/m^3)	1, 3, 5
Dust operating hours (min)	4
Gas	SO_2
Gas inlet concentration (ppm)	8
Gas operating hours (min)	1
Liquid gas ratio	0.041~0.285
Spray type	Vertical, Horizontal
Quantity of water spray (mL/min)	100, 200

3.1. 압력손실 특성

압력손실은 벽면 cavity를 적용한 습식 사이클론의 설계요소 중 집진효율과 더불어 중요 인자가 된다. 일반적으로 압력손실은 동력에 비례하기 때문에 집진장치 설계 시, 압력손실은 집진기의 경제성과 관련되어 있다.

본 시스템의 압력손실에 영향을 미치는 주요 실험변수로 유입유속, 물분사량 등이 있다. 집진장치의 압력손실은 집진장치의 입구와 출구 덕트 내의 평균 전압으로 측정하여 그 정압차로 계산된다. 압력손실은 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이들 변수에 따라 압력손실 특성이 변화 될 수 있다.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_a v_i^2 \left(K \frac{H_c B_c}{D_e^2} \right) \dots\dots\dots (26)$$

ρ_a : 가스밀도 (kg/m^3).

ρ_m : 압력계에 사용된 액체밀도 (kg/m^3).

v_i : 유입되는 유체의 속도,

D_e : 출구 직경

3.2. 집진효율 특성

벽면 Cavity를 적용한 습식 사이클론의 집진효율을 측정하기 위해서 중량법을 사용하였다. 사이클론의 입구 전단에 입구 덕트와 후단의 출구 덕트에 각각 프로브를 연결하여 유량조절이 가능한 유량계에 연결하여 사용하였다. 입·출구에 흡입 유량은 일정하게 3.5 L/min으로 고정하였다.

$$\eta_t = \left(1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (27)$$

η_t : 총괄 집진 효율 (%)

m_{in} : 입구 농도(g/m^3)

m_{out} : 출구 농도(g/m^3)

IV. 실험결과 및 고찰

1. 압력손실 특성

1.1. 압력손실

사이클론의 압력손실은 일반적으로 동력에 비례하기 때문에 집진장치 설계 시, 압력손실은 집진기의 경제성과 관련되어 시스템 설계의 중요 인자가 된다. 압력손실은 식 (28)과 같이 표현될 수 있으며, 유입유속(v_i), 출구직경(D_e), 입구의 높이(H_e), 폭(B_e)과 같은 변수에 따라 압력손실 특성이 변화 될 수 있다. 본 시스템의 압력손실에 영향을 미치는 주요 실험변수는 유입유속, 물분사량이 있다.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_a v_i^2 \left(K \frac{H_e B_e}{D_e^2} \right) \dots\dots\dots (28)$$

ρ_a : 가스밀도 (kg/m^3).

ρ_m : 압력계에 사용된 액체밀도 (kg/m^3).

1.1.1. 압력손실 특성

Fig. 16은 벽면 cavity를 적용한 사이클론의 입구유속에 따른 압력손실 변화를 나타낸다. 입구유속 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에서 3, 6, 10, 15, 23, 33 mmH₂O의 압력손실을 보인다. 입구유속이 증가할수록 압력손실이 높게 나타나는데 이는 식 (28)에서 보듯이 다른 변수의 변화가 없을 때 압력손실은 유속의 제곱에 비례함과 관련됨을 알 수 있다.

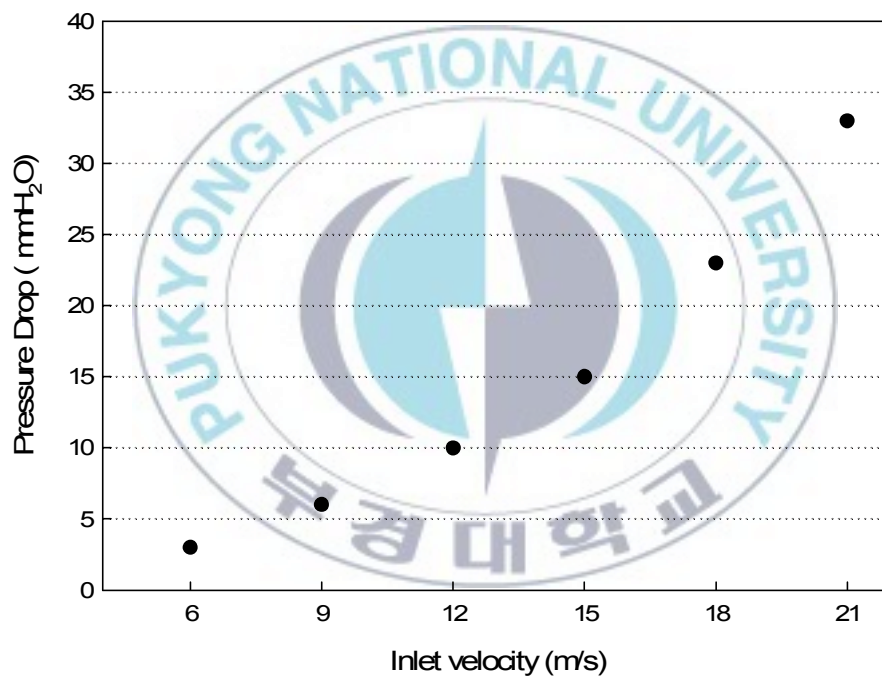


Fig. 16. Pressure drop with inlet velocity (dry type).

Fig. 17은 벽면 cavity를 적용한 사이클론에 물 분사 시스템을 추가하여 물 분사량 200 mL/min의 조건에서 유입유속 증가에 따른 압력손실의 변화를 나타낸다. 유입유속 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s 일 때 압력손실은 3, 7, 11, 16, 25, 35 mmH₂O로 점차 증가함을 알 수 있다. Fig. 16의 dry type과 압력손실을 비교하였을 경우 1~2 mmH₂O정도 압력손실이 증가하였다. 이는 물을 분사함으로써 액적에 의해 압력손실이 증가한 것이다.

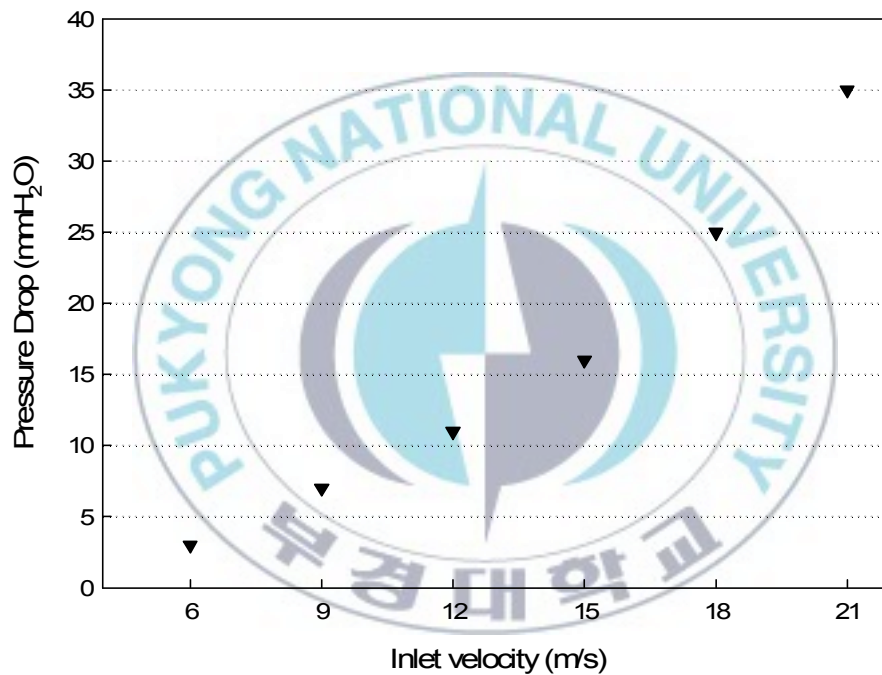


Fig. 17. Pressure drop with inlet velocity
(wet type, water spray 200 mL/min, vertical spray type).

2. 입자상 오염물질의 집진효율 특성

2.1. 벽면 cavity를 적용한 사이클론의 집진효율 특성

입자상 오염물질의 집진효율을 측정하기 위하여 중량법을 사용하였다. 사이클론 전·후단에 프로브와 유량계를 연결하여 사용하였다. 입·출구에 흡입되는 유량은 3.5 L/min으로 일정하게 유지하였다. 분진을 샘플링 후 전자저울을 이용하여 채취된 분진의 입구와 출구필터의 질량 무게차로 집진효율을 측정하였다. 식 (29)는 중량법의 총괄 집진 효율 계산식이다.

$$\eta_t(\%) = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) \times 100 \dots\dots\dots (29)$$

η_t : 총괄 집진효율 (%)

C_{in} : 입구 농도 (g/m³)

C_{out} : 출구 농도 (g/m³)

2.1.1. 입구 유속에 따른 집진효율 특성

Fig. 18, 19, 20은 각각 평균 유입농도 1 g/m³, 3 g/m³, 5 g/m³일 때 유입유속에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 본 시스템에서 평균 유입농도 1 g/m³일 때, 유입유속 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에 대해 각각 49.3, 62.0, 75.0, 80.4, 86.4, 88.9%를 나타냈으며, 같은 조건에서 유입농도 3 g/m³일 때, 54.1, 67.2, 78.7, 83.8, 88.2, 90.4%를 나타냈고, 유입농도 5 g/m³일 때, 56.6, 71.3, 81.2, 86.2, 90.4, 93.4%로 유입유속이 증가함에 따라 집진효율이 증가함을 볼 수 있다. 이는 관성력이 유입유속에 비례하므로 유입유속이 증가함에 따라 집진 효율이 증가한다. 하지만 입구 유속이 증가할수록 효율 증가폭이 작아지는데 이는 입구유속이 증가할수록 절단 입경의 크기가 작아짐에 따라 미세입자의 포집이 증가하는데 이는 중량법으로 측정 시 무게차가 갈수록 작아지기 때문에 그 효율 증가폭이 작아진다.

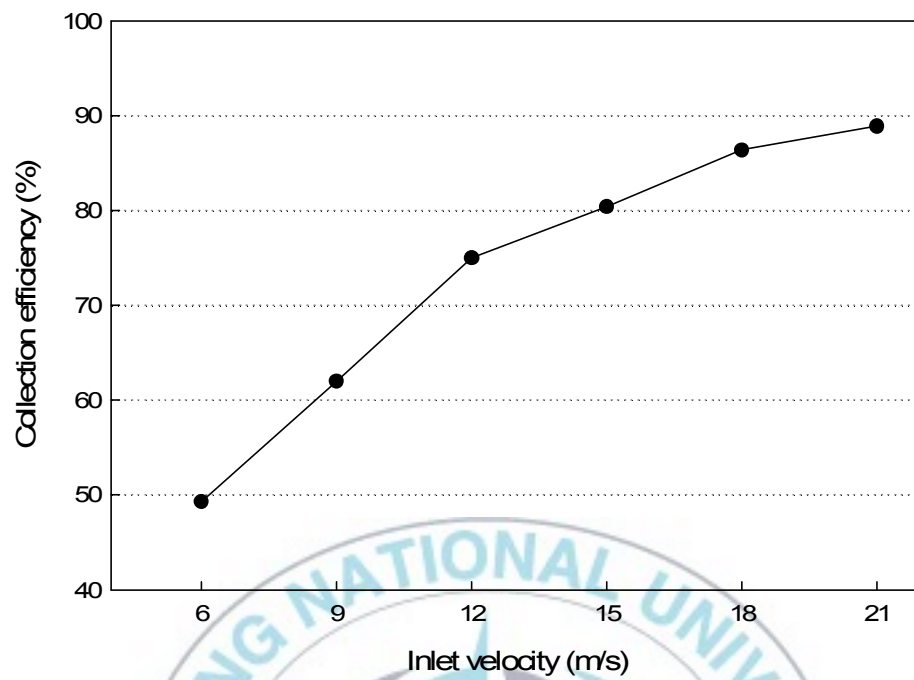


Fig. 18. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 1 g/m³).

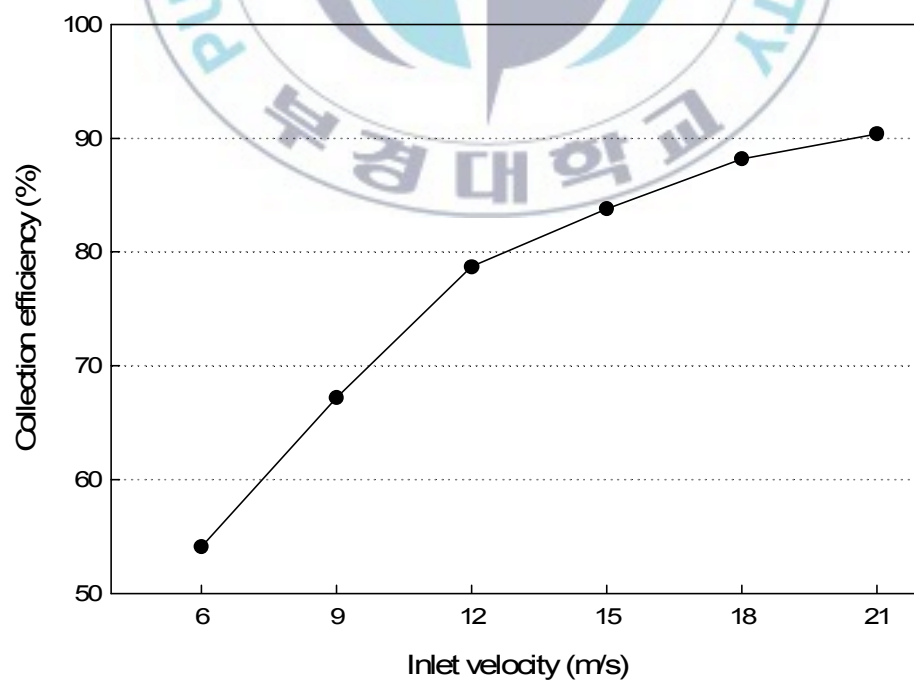


Fig. 19. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m³).

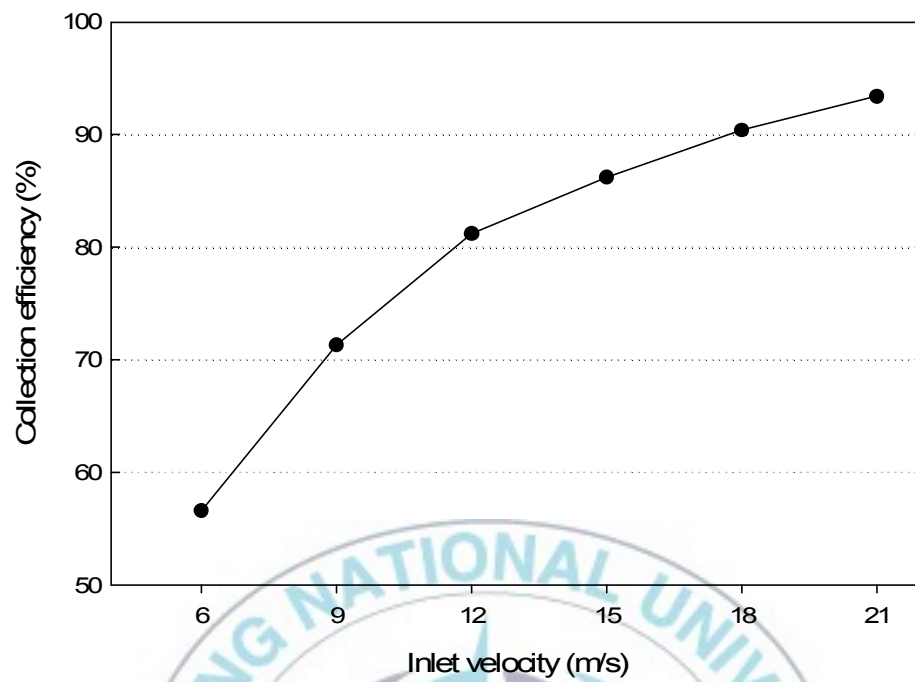


Fig. 20. Collection efficiency with inlet velocity
(fly ash, inlet concentration 5 g/m³).

2.1.2. 입구농도에 따른 집진효율 특성

Fig. 21은 각각 평균 유입농도가 1 g/m^3 , 3 g/m^3 , 5 g/m^3 일 때 유입유속에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 평균 유입농도에 따른 집진효율의 차이를 보면 평균 유입농도가 증가할수록 집진효율이 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 분진의 농도가 증가하면서 입자의 응집이 증가하여 입경이 큰 조대입자가 형성되며, 입자에 작용하는 관성력을 증가시키고 조대입자의 수가 많아지면 조대입자가 원심력을 받아 집진기 벽면으로 이동할 때 미세입자를 흡수하거나 같은 방향으로 견인하여 충돌케 함으로써 집진효율도 그만큼 증가한다.

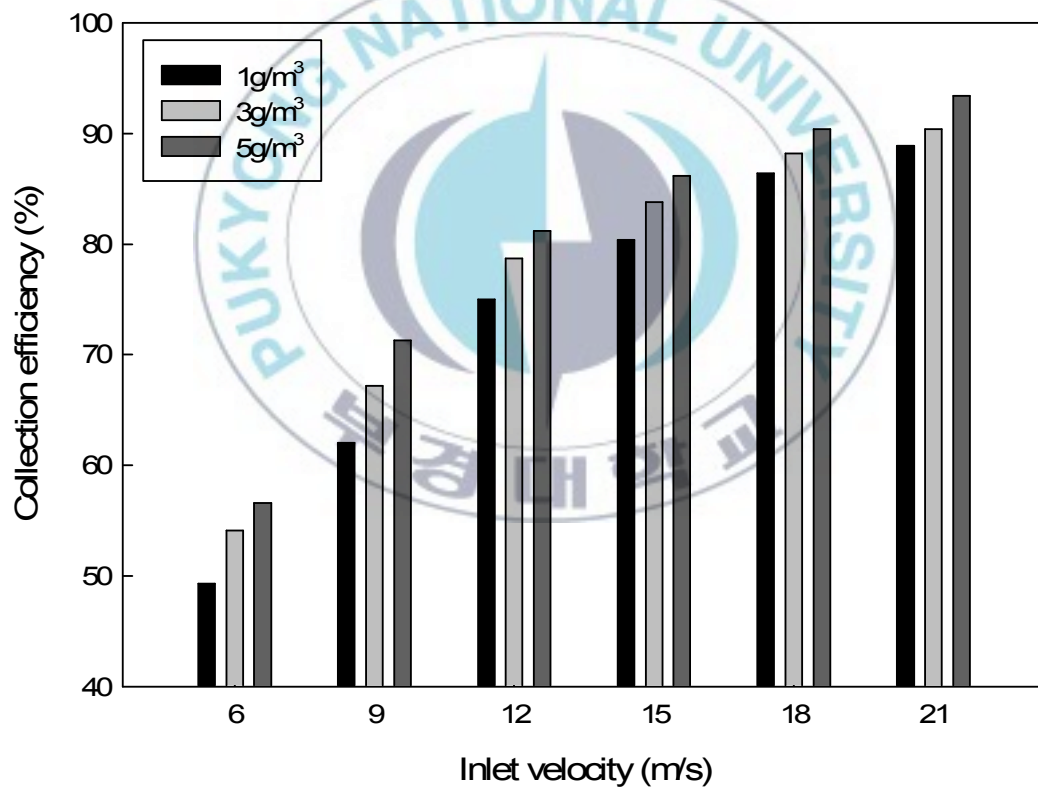


Fig. 21. Collection efficiency with inlet velocity and concentration (fly ash).

2.1.3. 분진 종류에 따른 집진효율 특성

Fig. 22는 분진종류에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 유입유속 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에서 fly ash는 54.1, 67.2, 78.7, 83.8, 88.2, 90.4%, steel dust는 83.5, 88.2, 92.0, 95.7, 97.5, 97.9%로 7.5~29.4%의 효율차이를 보인다. 이는 상대적으로 밀도가 큰 steel dust가 fly ash보다 더 큰 원심력이 작용하여 그 효율이 증가한 것으로 판단된다.

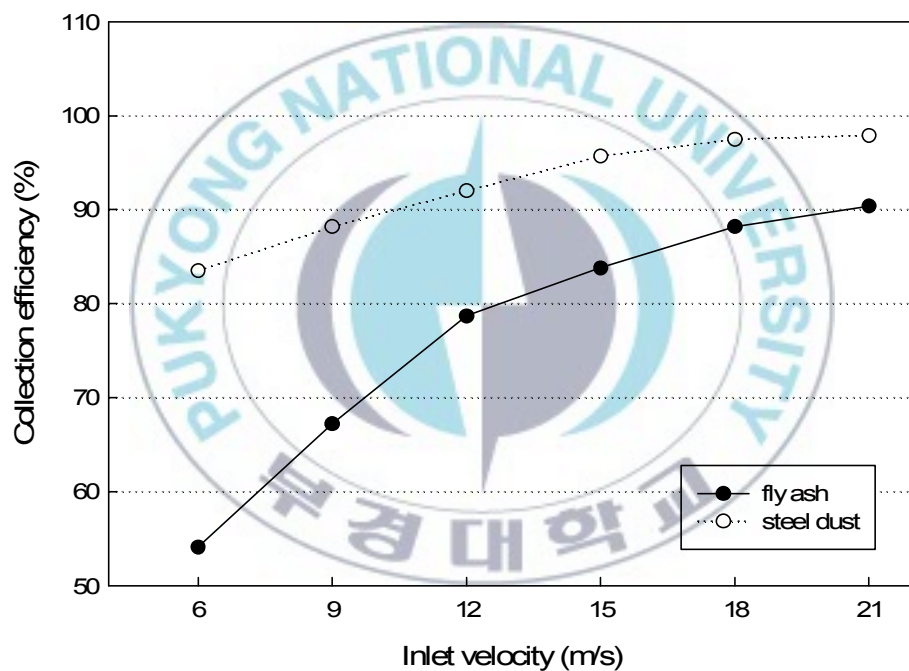


Fig. 22. Collection efficiency with inlet velocity and particle type (inlet concentration 3 g/m³).

2.2. 벽면 Cavity를 적용한 습식 사이클론의 집진효율 특성

2.2.1. 물 분사량 변화 및 유입유속 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 23, 24는 각각 물분사량 100 mL/min, 200 mL/min일 때 유입유속 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 물분사량 100 mL/min, 유입유속이 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s일 때 집진효율은 67.9, 79.1, 84.9, 90.3, 93.4, 96.1%이고 물분사량 200 mL/min일 때 집진효율은 72.0, 83.2, 88.9, 92.4, 95.1, 96.8%로 dry type과 마찬가지로 wet type 또한 유입유속이 증가함에 따라 집진효율이 증가함을 알 수 있다.

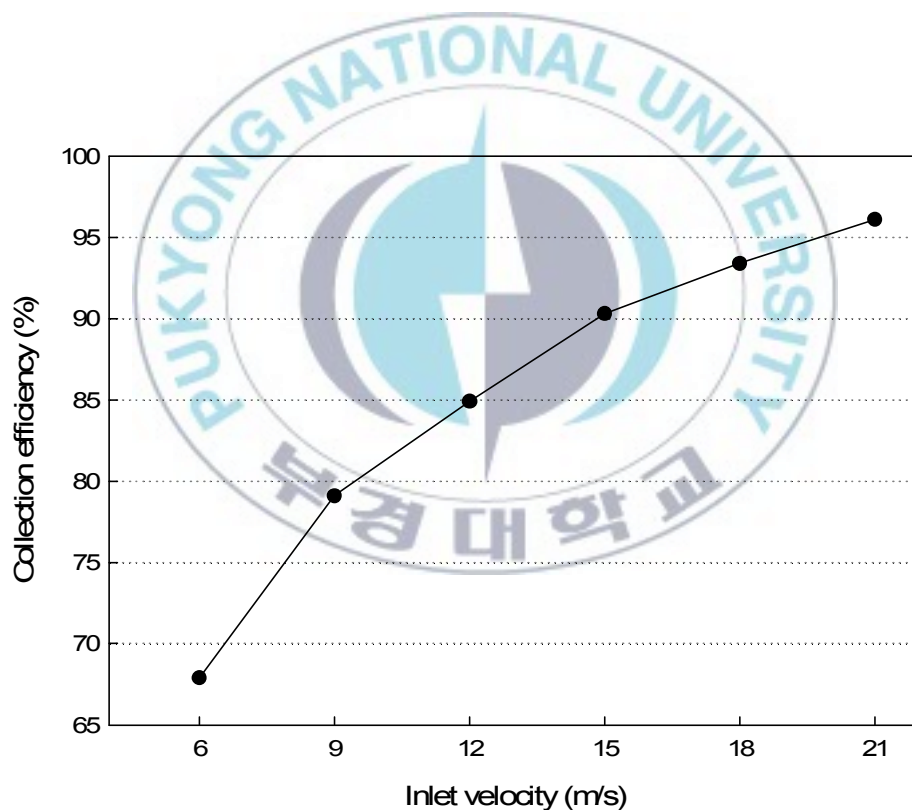


Fig. 23. Collection efficiency with inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3 g/m³, water spray 100 mL/min, vertical spray type).

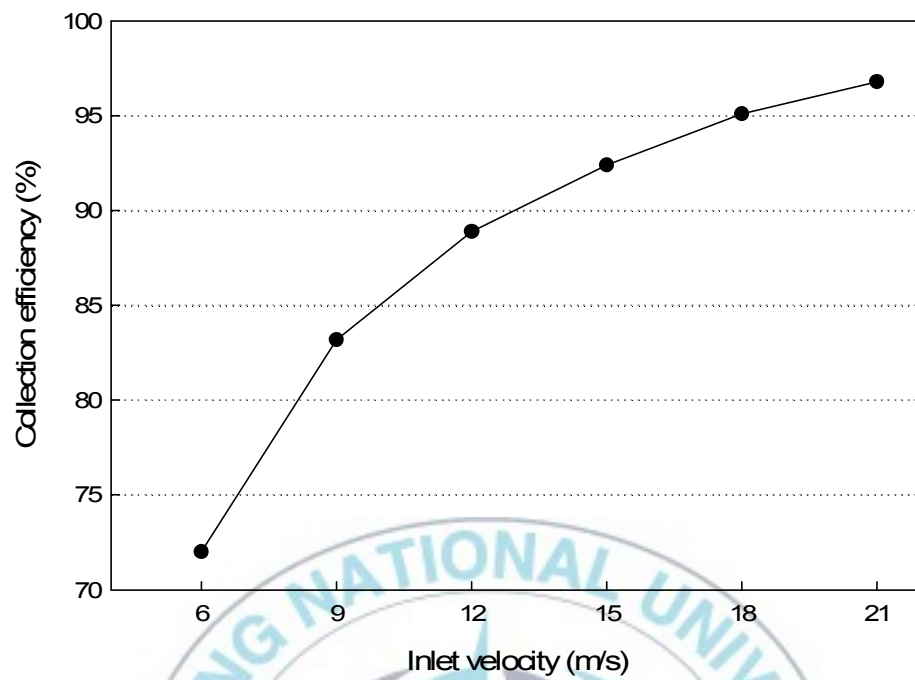


Fig. 24. Collection efficiency inlet velocity
(fly ash, inlet concentration 3 g/m³, water spray 200 mL/min,
vertical spray type).

Fig. 25는 dry type과 물분사량 변화에 따른 효율을 비교하여 나타낸 것이다. dry type과 물분사량 100 mL/min의 경우 유입유속에 따라 5.2~13.8%의 집진 효율의 차이를 보이며 물분사량 100 mL/min과 200 mL/min의 경우 3.0~4.1%의 효율의 차이로 물분사량이 증가함에 따라 집진효율이 증가함을 보인다. 이는 물을 분사함으로써 분진의 부착력이 증가하고 물 분사량이 증가함에 따라 분진의 액적에 의한 응집이 증가되어 조대입자 생성이 증가하고 이러한 조대입자에 작용하는 원심력은 입경이 작은 분진에 비해 증가하기 때문이다.

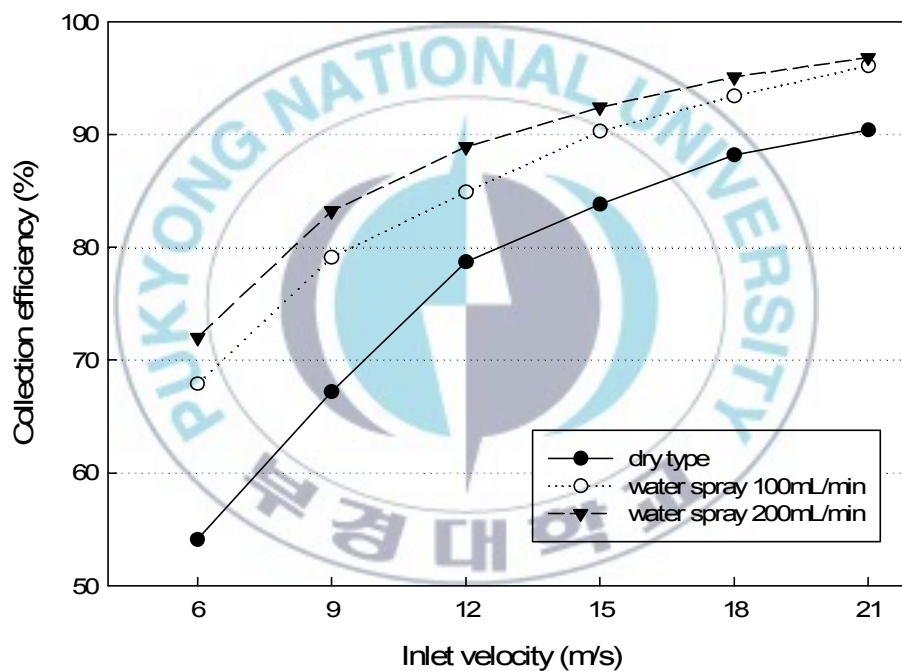


Fig. 25. Collection efficiency with inlet velocity
(fly ash, inlet concentration 3 g/m³, vertical spray type).

2.2.2. 물 분사방식에 따른 집진효율 특성

Fig. 26은 dry type과 물 분사량 200 mL/min, 유입유속 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에서 분사방식의 차이에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 효율은 각 유속에서 horizontal spray type은 68.0, 79.5, 85.6, 89.0, 92.0, 93.8%, vertical spray type은 72.0, 83.2, 88.9, 92.4, 95.1, 96.8%로 vertical spray type의 경우 3~4% 높은 효율을 나타낸다. horizontal spray type의 경우 dry type의 경우보다는 높은 효율을 나타내지만 vertical spray type보다 낮은 효율을 나타내는데 이는 선회류의 파괴로 vertical spray type보다 효율이 낮아지는 것으로 판단된다.

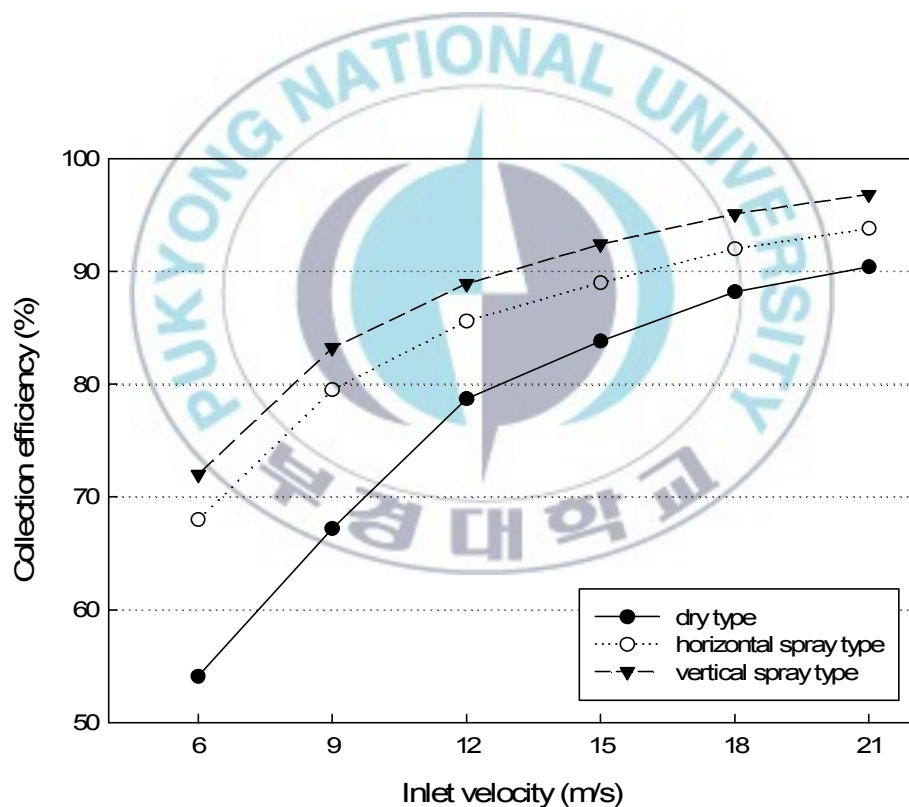


Fig. 26. Collection efficiency with inlet velocity and spray type (fly ash, inlet concentration 3g/m³, water spray 200 mL/min).

2.2.3. 분진종류에 따른 집진효율 특성

Fig. 27은 steel dust의 dry type과 wet type(물 분사량 100 mL/min)의 효율을 비교한 것이다. 유입유속 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에서 dry type은 83.5, 88.2, 92.0, 95.7, 97.5, 97.9%, wet type에서는 85.0, 91.8, 95.5, 97.0, 97.9, 98.4%의 효율로 0.4~1.5%의 효율차이를 나타내었다. fly ash의 dry type과 wet type(물 분사량 100 mL/min)의 효율차이가 5.2~13.8%였던 것에 반해 그 차이가 작음을 알 수 있는데 이는 steel dust의 밀도가 커 원심력의 영향력을 많이 받아 dry type에서 높은 효율을 보이고 있기 때문에 액적에 의한 추가적인 집진효과가 상대적으로 작게 나타난다.

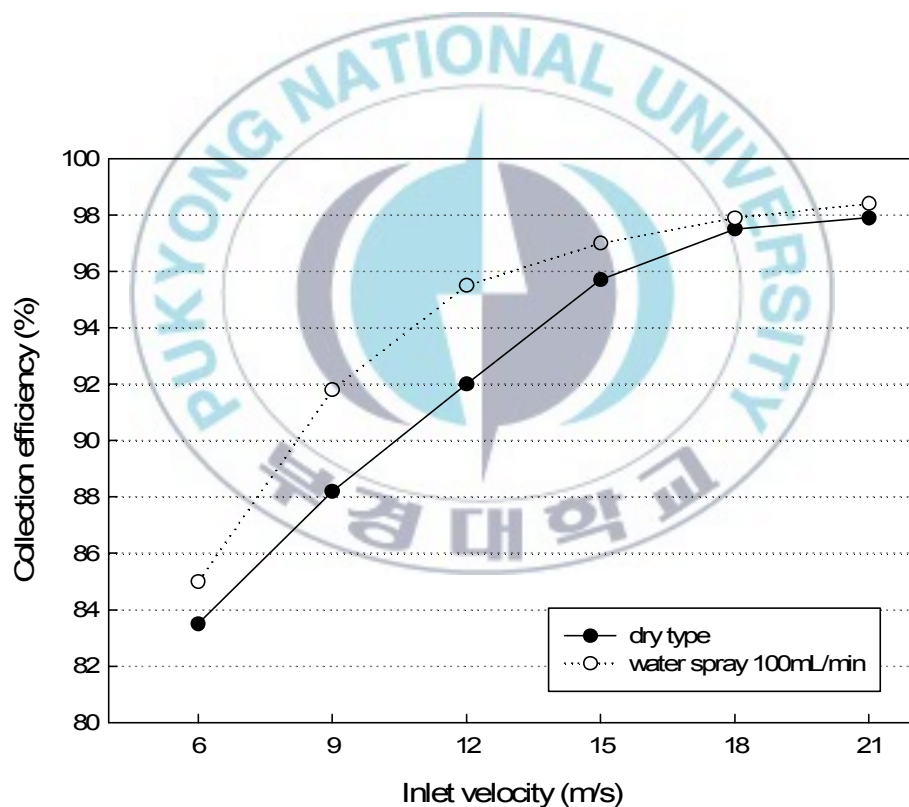


Fig. 27. Collection efficiency with inlet velocity and quantity of water spray (steel dust, inlet concentration 3 g/m³, vertical spray type).

3. 가스상 오염물질의 제거효율 특성

3.1. 유입유속에 따른 SO₂ 제거효율 특성

Fig. 28, 29는 유입유속이 증가함에 따른 SO₂의 제거효율 특성을 나타낸다. 물분사량 100 mL/min, 유입유속 6, 9, 12 m/s일 때 제거효율은 62.5, 25.0, 12.5%, 물분사량 200 mL/min일 때 제거효율은 75.0, 62.5, 50%로 유입유속이 증가함에 따라 SO₂제거효율이 감소함을 알 수 있다. 이는 유입유속이 빨라질수록 체류시간이 감소하여 가스와 액적의 접촉시간이 줄어들기 때문이다.

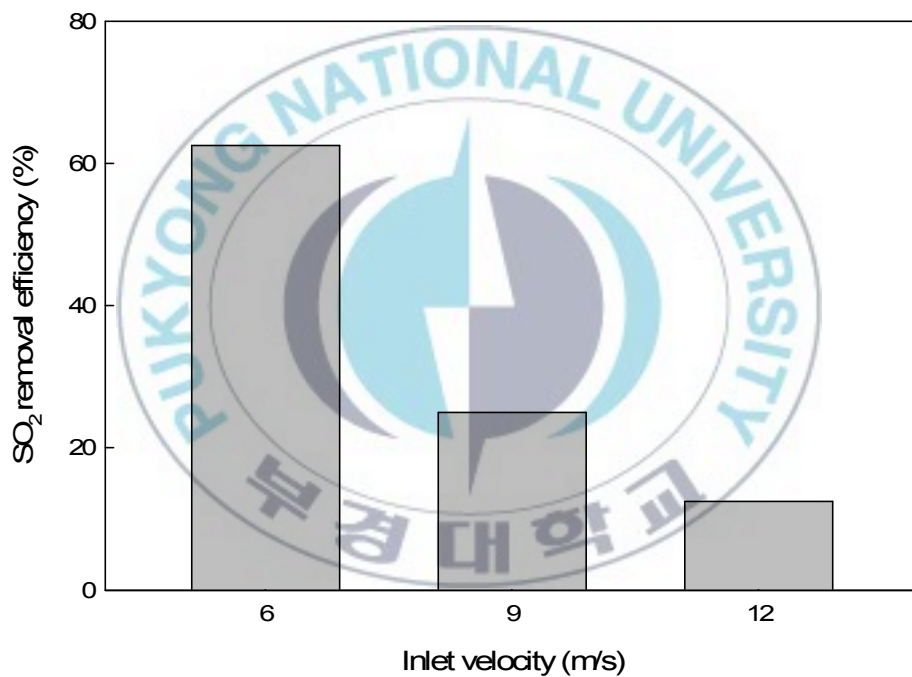


Fig. 28. SO₂ removal efficiency with inlet velocity (water spray 100 mL/min, vertical spray type, operating time 1min).

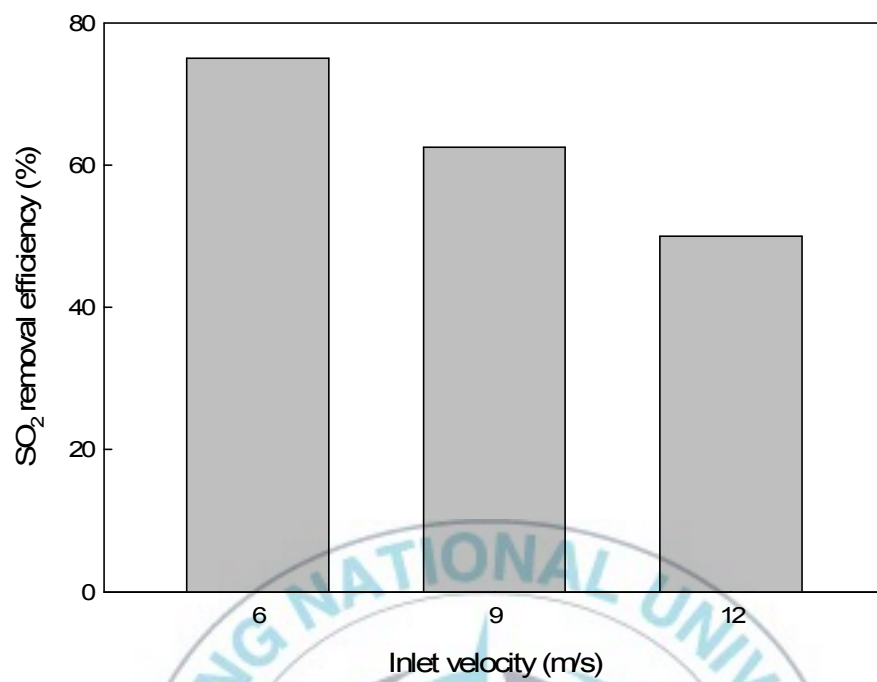


Fig. 29. SO₂ removal efficiency with inlet velocity (water spray 200 mL/min, vertical spray type, operating time 1min).

3.2. 물 분사량에 따른 SO₂ 제거효율 특성

Fig. 30은 물분사량 100 mL/min일 때와 물분사량 200 mL/min일 때의 비교를 나타낸 것이다. 유속 6, 9, 12m/s에서 제거효율의 차가 12.5~32.5%로 물 분사량이 증가함에 따라 SO₂제거효율이 증가함을 볼 수 있다. 이는 물 분사량이 증가함에 따라 액적과 가스의 접촉면적 증가로 인하여 제거효율이 증가하기 때문이다.

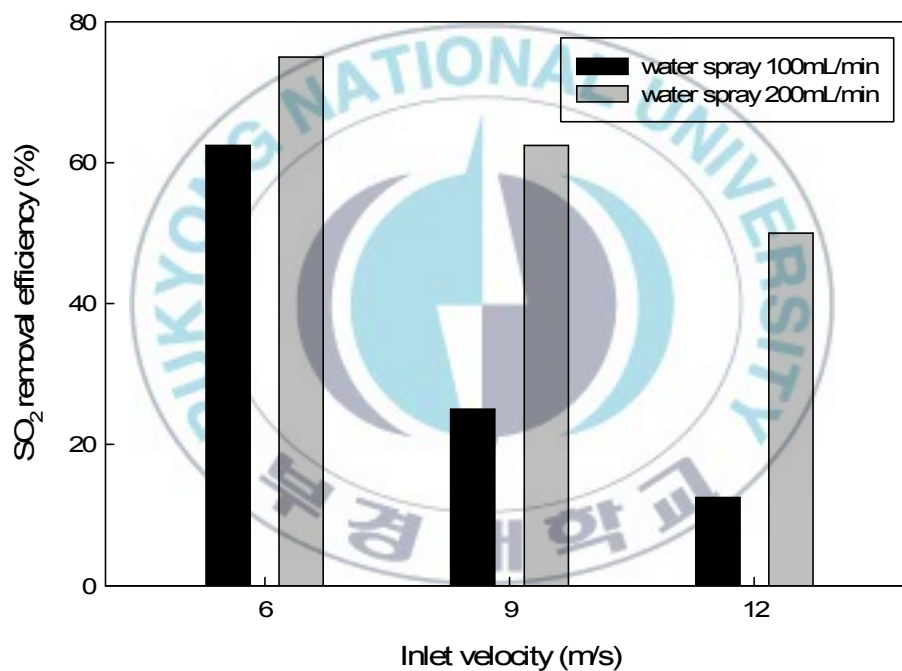


Fig. 30. SO₂ removal efficiency with inlet velocity and quantity of water spray (vertical spray type, operating time 1min).

V. 결론

본 연구에서는 벽면 cavity를 적용한 사이클론에 습식을 부과함으로써 낮은 압력손실과 액가스비로 동력비가 적게 들고 미세분진에 대한 집진효율을 증가시키기 위한 연구를 수행하였다. 이에 따라 오염물질의 제거 효율 특성을 실험하기 위해 분진의 종류, 유입유속, 건식과 습식의 비교, 물 분사량의 차이, 물 분사방식의 차이, 유입농도의 차이 등에 따른 압력손실과 집진효율 특성을 실험하였고, 가스상 오염물질인 SO_2 는 유입유속, 물 분사량의 차이에 따라 제거효율을 실험하였으며, 실험결과에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 압력손실은 유입유속 증가에 따라 증가하며 wet type, 물분사량 200 mL/min, 유입유속 21 m/s에서 최대 35 mmH₂O로 기존의 세정집진기 중 벤츨리 스크러버가 압력손실이 300 mmH₂O이상인 것에 비해 벽면 cavity를 적용한 습식 사이클론은 압력손실을 낮춤으로써 동력비를 절감하는 장점을 지닌다.
2. dry type의 집진효율은 유입유속 6~21 m/s에서 유입농도 1 g/m³일 때 49.3~88.9%, 3 g/m³일 때 54.1~90.4%, 5 g/m³일 때 56.6~93.4%로 유입유속과 유입농도가 증가함에 따라 증가하였다. 이는 유입유속이 증가할수록 원심력이 증가하고 유입농도가 증가함에 따라 조대입자의 생성이 늘어나 집진효율이 증가한다.
3. dry type, 유입유속 6~21 m/s, 유입농도 3 g/m³에서 분진의 종류에 따라 fly ash는 54.1~90.4%, steel dust는 85.0~98.4%의 효율로 steel dust로 실험을 하였을 경우 더 높은 효율을 나타내었다. 이는 steel dust의 밀도가 3.5 g/cm³로 fly ash (2 g/cm³)보다 커 원심력이 크게 작용하기 때문이다.
4. 유입유속 6~21 m/s, 유입농도 3 g/m³에서 dry type과 wet type의 집진효율을 보면 dry type은 54.1~90.4%, wet type은 물 분사량 100 mL/min인 경우 집진효율은 67.9~96.1%, 물 분사량 200 mL/min일 때 72.0~96.8%로 6.4~17.9%의 효율 차이를 보인다. 이는 물을 분사하여 벽면을 적시므로써 분진의 부착력이 증가하고 분진과 액적의 충돌 횟수가 증가하여 집진효율이 증가하기 때문이다.

5. 가스 (SO_2) 제거효율은 유입유속이 낮을수록 그 효율이 높게 나타났으며, 유입유속 6 m/s, 물분사량 200 mL/min에서 75%로 가장 높은 제거효율을 나타내었다. 이는 분진이 원심력에 많이 의존하는 것과 달리 가스는 주요 물질전달 메커니즘이 확산이므로 유입유속의 감소는 SO_2 의 체류시간을 증가시키고 SO_2 와 액적의 접촉시간을 늘리는 효과를 나타내며 따라서 SO_2 의 제거효율이 증가한다.
6. 가스(SO_2) 제거효율은 물 분사량이 증가될수록 증가한다. 유입유속 6 m/s에서 물 분사량 100 mL/min인 경우 62.5%, 물 분사량 200 mL/min인 경우 75%로 물 분사량이 증가하면 제거효율이 12.5% 증가한다. 이는 물 분사량이 증가함에 따라 SO_2 와 액적의 접촉면적의 증가로 인하여 제거효율이 증가하게 된다.
7. 물 분사량 200 mL/min, 유입유속 6~21 m/s, 유입농도 3 g/m³에서 vertical spray type의 효율은 72.0~96.8%, horizontal spray type의 효율은 68.0~93.8%로 vertical spray type에서 3~4% 더 높은 효율을 보인다. 이는 horizontal spray type의 경우 선회류의 파괴로 효율이 감소하는 것으로 판단된다.
8. 본 시스템은 물 분사량 200 mL/min에서 압력손실 35 mmH₂O이하, 액가스비는 0.081~0.285 L/m³로 기존의 세정집진장치와 비교하여 낮은 압력손실과 액가스비로 최대 96.8%의 효율을 나타내고 있으며 액적의 배출을 최소화한 시스템이다.

참고문헌

1. A. K. Coker. (1993). "Understand cyclone design." Chemical Engineering Progress. Dec. 51-55.
2. Beitez J., (1993). "Process engineering and design for air pollution control." PTR Prentice Hall, 331, 414
3. B. H. Cho, J. H. Kim. (1990). "Air pollution prevention technology." Dong Hwa Technology, pp. 107~144, 260-286.
4. C. L. Kim, S. A. Kwon, S. J. Lee, C. B. Ko. (2013). "Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone." Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 29(2), pp. 163-170.
5. Chung, J.W., Y.H. Lee, H.D. Lee, J.H. Park, G.I. Jun, and M.H. Cho (2003). "Characteristics of Fly Ashes Emitted from Large Scale Industrial Process, J. of Korea Society of Waste Manag." 20(2), 179-185. (in Korean with English abstract)
6. C. David Cooper, F. C. Alley. (1994). "Air pollution control : A design approach (second edition)." pp. 127~149, 217-247.
7. D. G. Kim. (2008). "Removal Characteristics of Air Pollutants using Wet type Multi-stage Porous Plate System." MS Thesis, Pukyong National University.
8. Dietz, P. W. (1981). "Collection efficiency of cyclone separators." AIChE Journal, 27(6), pp. 888-892.

9. G. R. Lee, J. H. Bae, G. H. Song, G. H. lee, J. H. Lee and G. H. Lim. (2001). "Environmental Engineering(latest)." Dong Hwa Technology, pp. 226-233.
10. H. M. Yang, S. S. Kim. (2000). "An Experimental Approach to Evaluate the Desulfurization Yield in Spray Drying Sorber," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B. 24(4), pp. 589-598.
11. J. Y. Kim. (2012). "Collection characteristics of multi-layer multi-stage porous plate system with water spray." MS Theis. Pukyung National Unibersity.
12. J. K. Yong, C. N. Kim, Y. M. Jo. (2008). "A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency for Fine Particles in a Cyclone." International Journal of Air-conditioning and Regrigeration, pp. 144-153.
13. J. H. Koo, M. C. Kim, S. C. Park, T. S. Park, B. G. Ahn, S. W. Oh, G. S. Lee and S. J. lee. (2006). "Atmosphere Environmental Device Design II", Dong Hwa Technology, pp. 226-233.
14. J. S. Kim et al. (2004). "Air pollution prevention technology(latest) Series 6(Environment)." Dong Hwa Technology, pp. 281-336.
15. J. D. Chung. (2003). "A Study on Characteristics of High Efficiency Cyclone." Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 25(9) pp. 1184-1189.
16. K. S. Lim, S .B. Kwon, K.W. Lee. (2003). "Characteristics of collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air." Journal of Aerosol Science, 34, 1085-1095.

17. Leith, D. and W. Licht (1972). "The collection efficiency of cyclone type particle collectors - A new theoretical approach." AIChE Symposium. Series, 126(68).
18. Miles L. Croom, (1994). "Filter Dust Collectors - Design and Application." McGraw-Hill, Inc.
19. S. J. Lee, S. A. Kwon, C. L. Kim, C. B. Ko. (2013). "Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone." Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(2) pp. 163-170.
20. S. M. Ahuja (2010). "Wetted wall cyclone - A novel concept." Powder Technology 204, pp. 48-53.
21. Wang, W., P. Zhang, L. Wang, G. Chen, L. Li, and X. Li. (2010). Structure and performance of the circumfluent cyclone, Powder Technology, 200, 158-163.
22. Y. O. Park, H. J. Park and Y. H. Kim. (2011). "SO₂ Removal by Internal Circulation of de-SO_x Absorbents." Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 27, No. 6 pp. 672-680.
23. Yi, C.S. and C.W. Lee. (2011). "Comparisons of dust collection efficiency on the tangential entry and axial-vane type cyclone." Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 10(6), 115-121.
24. 김신도. (1995). "에어로졸." 동화기술교역 pp. 159-165.
25. 장혁상 엮음. (1999). "환경에어로졸공학." 영남대학교출판부, pp. 64-70.
26. 전홍신. (2009). "액체의 미립화." 문운당, pp. 244~250, 304-317.