사이클론 선회류 약화기 구조에 따른 미세먼지 집진효율 연구

The Effect of Cyclone Vortex Finder Configurations on the Fine Particle Collection Efficiencies

정동균 · 김범석 · 홍민선[†]

Dong Gyun Jeong · Beom Seok Kim · Min Sun Hong[†]

아주대학교 환경안전공학과

Department of Environmental Safety Engineering, Ajou University

(Received February 20, 2017; Revised June 7, 2017; Accepted June 16, 2017)

Abstract : The effect of vortex finder configurations on the PM-10 collection efficiencies has been investigated using 7 different types of cyclones. Cyclone inlet velocities were calculated by computational fluid dynamics analysis and PM-10 collection efficiencies were measured from experimental apparatus. The inlet velocities of normal, P and A type cyclones were calculated 15.48 m/sec, 16.03 m/sec and 15.9 m/sec, respectively while experimental results show that PM-10 collection efficiencies were increased 4% for P type and 7% for A type cyclones compared to normal cyclone. Also it was found that there exist optimum parallel head lengths for both P and A type cyclones to maximize the PM-10 collection efficiencies.

Key Words : Cyclone, Vortex Finder, Collection Efficiency, Fine Particle, Parallel Head

요약 : 선회류 약화기(vortex finder)의 구조와 치수를 변형한 7종류의 cyclone을 제작해 PM-10 집진효율 자료를 도출하였고 CFD 분석을 통한 사이클론 입구 속도를 계산하였다. 입구속도는 normal, P, A type 사이클론의 경우 15.48 m/sec, 16.03 m/sec 그리고 15.90 m/sec로 계산되었고 PM-10 집진효율 실험결과는 P type과 A type의 사이클론의 경우 normal 사이클론에 비해 4%와 7%의 집진효율이 증가하였다. 또한 평행부의 길이가 증가함에 따라 PM-10의 집진효율은 증가하다 감소하여 집진효율을 최대화 할 수 있는 길이가 존재함을 보여주었다.

주제어 : 사이클론, 집진장치, 집진효율, 미세먼지

1. 서론

최근 미세먼지 및 초미세먼지에 대한 주의보 일수가 증가하고 있으며 화력발전소를 포함한 산업체 발생 미세먼지가 큰 사회문제로 이슈화되고 있다. 미세먼지로 인한 질병 발생률 또한 각종 논문을 통해서 발표되고 있으며 사회적으로 심도있게 다루어야 하는 문제로 급부상하였다.¹⁾

각종 산업현장에서 배출되는 미세먼지는 배출기준을 만족해야하며 다양한 집진장치에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 중 전처리 장치로 널리 쓰이는 사이클론 집진기 역시 연구가 활발하게 진행되고 있으며 다양한 분야에서 사용가능하도록 연구, 개발되고 있다.

Wang²⁾은 Reynolds stress model (RSM)을 이용하여 사이클론에서 난류흐름을 모사하였다. 내부선회류는 사이클론의 성능을 저하시키며, 다양한 난류를 형성하게 된다. 내부선회류는 사이클론에서 짧은 순환흐름을 만들며 와류 및 비정상적인 환류를 형성하게 된다. 이러한 흐름들은 사이클론에서의 분리성능과 압력손실에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

또한 배출구의 길이에 따라서 내부의 접선속도 및 축류속도의 변화에 따른 영향에 관한 연구를 진행했다. 이를 통해서 길이가 길어짐에 따라서 일정한 구간까지는 속도가 증

가하다 감소하는 결과가 나타났다.

이러한 연구처럼 사이클론에서 출구부 길이의 조절역시 사이클론의 집진효율에 영향을 미치는 중요한 인자로 인식되고 있으며 다양한 조건에 대한 연구가 필요하다.

높은 집진효율을 위해서는 운영 및 설치비용 증가와 같은 경제적인 부담이 증가된다. 사이클론의 경우 문제점으로 지적되는 낮은 효율을 만족시키기 위한 형태와 구조에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으며 사이클론의 선회류 약화기는 구조적 변경의 설계인자로서 연구에 이용되고 있다.²⁾

본 연구에서는 사이클론의 낮은 효율을 극복하기 위하여 선회류 약화기 외부에 또다른 선회류 약화기(평행부)를 설치한 사이클론을 제작하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 평행부 총 3종류, 7개를 제작하여 실험을 통해서 사이클론의 집진효율을 도출하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1. 이론적배경

사이클론 내에서 외부선회류는 유입되면서 회전수(N_e) 만큼 회전한다. 회전수는 유입구의 높이와 사이클론 몸통, 원추 길이를 가지고 근사치를 구할 수 있다.

[†] Corresponding author E-mail: msh@ajou.ac.kr Tel: 031-219-2404 Fax: 031-219-1613

Fig. 1. partial separation efficiency model.

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

N_e = 유효회전수

H = 유입구 높이(m)

L_b = 사이클론 몸통 길이(m)

L_c = 사이클론 원추의 수직길이(m)

사이클론 내부로 유입된 입경이 d_p 인 입자가 100% 집진되기 위해서는 유효회전수에 이르기 전에 벽면에 도달하여야 한다.

Fig. 1과 같은 형태로 표현되는 사이클론 내부로 유입되는 입자는 R_0 에서 R_i 까지 반경을 가지고 사이클론의 유효회전수만큼 회전하면서 외벽으로 이동하게 된다. 외벽으로 충돌할시 100% 집진이 된다고 가정하면, 입도가 d_p 의 입자들이 원심력에 의해서 외벽에 도달할 수 있는 최소반경이 R^* 이다. R_i 와 R_0 사이에 들어오는 입자들은 반드시 집진된다고 볼 수 있으며, d_p 에 대한 부분집진효율 η_i 는 다음과 같이 표현될 수 있다.³⁾

$$\eta_i = \frac{R_0 - R^*}{R_0 - R_i} = \frac{R_0 - R^*}{W} \quad (2)$$

입자의 반경방향 속도는 반경방향에서 작용하는 원심력과 유체저항력을 등식으로 놓고 계산한다. 이때 중력은 원심력의 1% 미만으로 무시하고 계산한다. 입자가 충분히 작고 구형이며 층류흐름을 가지며 Stokes 흐름을 유지하면서 운동한다고 가정하면 입자에 작용하는 원심력과 입자에 작용하는 유체저항력이 평형을 이루며 다음과 같은 식이 성립한다.

$$3\pi d_p \mu u_r = \rho_p \left(\frac{\pi d_p^3}{6} \right) \left(\frac{u_T^2}{R} \right) \quad (3)$$

입도 d_p 인 입자들 중에서의 부분집진효율 η_i 는 다음과 같이 정리된다.

$$\eta_i = \frac{\pi N_e \rho_p d_p^2 V}{9\mu W} \quad (4)$$

사이클론 내에서의 입도 d_p 인 입자의 부분집진효율은 입자의 밀도와 입도, 기체의 점도, 사이클론의 특성(회전수, 유입구 폭), 유입속도 등의 변수와 관계되는 식으로 정리된다.

집진 원리는 분진입자의 직경, 밀도, 가스의 점도와 같은 물질특성인자와 분진입자의 가스 내 혼합특성에도 영향을 받게 된다. 사이클론의 집진특성을 유도하기 위해서는 집진기 내에서의 분진의 체류특성과 혼합특성과 같은 기-고체 흐름에 대한 정보를 필요로 한다.⁴⁾

사이클론 내부에서의 가스흐름은 외부선회류와 내부선회류로 구성되며, 외부선회류는 입자상물질을 포집하며, 내부선회류는 집진되지 않은 입자상물질이 가스와 함께 외부로 배출되는 영역이다. 이런 외부선회류와 내부선회류를 갖는 가스흐름은 사이클론의 기하치수비에 의해 결정되는데 회전 방향은 변하지 않으며 사이클론 내부에서 가스흐름이 외부선회류에서 내부선회류로 변하여 사이클론의 출구로 배출된다.⁵⁾

사이클론 내부에서 선회류가 변하는 지점을 조절하는 장치로서 선회류 약화기가 설치되며 이 선회류 약화기의 길이가 길어지면 사이클론 하단의 포집분진함 부분에서 외부선회류의 방향이 바뀌게 되고 선회류 약화기의 길이가 짧아지면 상부에서 선회류의 방향이 바뀌게 된다. 대부분의 사이클론의 경우 원추부의 2/3지점에서 선회류의 방향이 바뀌도록 설계하고 있다.

강⁶⁾은 사이클론 내부에 선회류 약화기를 설치하여 이에 따른 입자흐름과 체류시간분포 특성을 통해 선회강도, 난류성 에디, 벽면 바운싱에 의한 고체흐름의 재비산 집진효율을 연구했으며, 내부에 선회류 약화기를 부착한 경우 선회류 강도가 증가하여 체류시간이 증가하는 것을 보여주었다.

또한 일반 사이클론에 비해 선회류약화기를 설치한 사이클론의 경우 집진효율이 더 높게 나타나지만 그 폭이 일정 이상 커질 경우 기본형 사이클론보다 집진효율이 낮아진다. 일정 이상의 폭에서는 선회속도가 매우 높아져 원통하부 및 원추에서 분진의 재비산 및 2차 바운싱을 야기하여 그 효율이 낮아지는 것으로 알려져 있다.⁶⁾

사이클론에서 내부선회류의 집진성능에 관련하여 영향에 대해 알아보고자 본 연구에서는 평행부를 선회류 약화기의 용도로 설치하여 평행부의 형태 및 길이에 따른 사이클론 집진기의 집진성능에 미치는 영향을 연구하였다.

2.2. 평행 사이클론 제작

Fig. 2는 본 실험에 사용된 평행 사이클론의 도면이다. 사이클론은 강화아크릴로 제작했으며, 접선유입식 사이클론방식을 택하였다. 고효율 사이클론을 기본 모델로 했으며 그 수치는 가스 유입구 높이 110 mm, 폭은 52.5 mm, 몸통 높이 350 mm, 원추부 625 mm로 하여 분진퇴적함을 제외하고 전체 높이는 975 mm이다. 내부에 설치하는 평행부는 내경 130 mm

Fig. 2. Specifications of parallel type cyclone.

Fig. 3. Schematic diagram of A and P type cyclone.

Table 1. Dimension of Vortex finder (unit : mm)

Division		a	b	c
A type	A-1	130	185	140
	A-2		205	190
	A-3		225	240
Parallel type	P-1			140
	P-2		130	190
	P-3			240

를 기준으로 제작하였다. 본 연구에서는 vortex finder의 규격과 형상을 달리하여 먼지 포집 효율 자료를 도출하였다.

평행부 타입별 치수는 아래의 도면을 기준으로 제작하였다. 위, 아래쪽을 a, b로 하고 길이를 c로 하여 제작하였다. 각각의 사이클론 헤드의 수치는 다음 Table 1과 같이 하여 각각의 헤드에 대한 집진 성능을 비교하였다.

내부 와류가 집진효율에 미치는 영향을 분석하기 위해서 평행부의 길이와 형상을 달리해 실험을 수행하였다.

2.3. 실험장치

Fig. 4는 평행 사이클론 실험장치의 구성도이다. 구성장치로는 사이클론 본체, 먼지를 주입하기 위한 먼지발생기, PM-10 측정기, 유입속도 조절을 위한 조절장치가 부착된 모터로 구성되어있다. 입구에서 먼지발생기를 통해 먼지를 유입해 주며 후단에서 계속적으로 공기를 흡입하는 방식으로 실험을 진행했으며 사이클론의 입, 출구부분에서 PM-10 측정기를 통해서 농도를 측정하였다.

실험에 사용된 분진은 fly ash로 구성된 JIS powder 1 Class 10을 사용하여 실험을 진행하였다. 이들의 입도의 분포는 2~16 μm 로 분포되어 있으며, 중앙입경은 4.8 μm 에서 5.7 μm 이다. 분진의 밀도는 1.95 g/m^3 이상이며 통상적으로 2.0~2.3 g/m^3 로 나타난다. 화학적 조성은 최소 45%의 SiO_2 , 최대 1%의 수분량으로 구성되어 있으며, 강열 감량(Ignition loss)은 최대 5%이다.

Table 2는 실험에 사용된 분진의 크기 분포이다. 실험에서

Table 2. Particle size distribution of fine particles

Particle size μm	Over size (mass basis) %
	Class 10
2	82 $\pm$ 5
4	60 $\pm$ 5
5	-
8	22 $\pm$ 5
10	-
16	3 $\pm$ 3

Fig. 4. Configuration of parallel type cyclone experiment.

비교하고자 하는 10 μm 이하의 크기 분포로 구성되어 있다. 16 μm 이하의 분진이 94~97%로 구성되어 있으며, 2 μm 이상의 분진이 82~87%로 구성되어 있어 실험에서 측정하고자 한 PM-10 집진실험에 적합한 분진으로 판단하였다.

K사의 model 3211는 먼지발생기로서 내부에 저장되어 있는 분진을 일정하게 내보내어 인위적인 먼지발생의 용도로 사용되었다. 고체입자로 50 μm 이하의 분진을 발생시키며 발생되는 양은 컴프레서를 통해서 유량을 조절가능 하도록 설계되어 있다. 발생된 분진과 배출분진의 농도는 T사의 AM510 모델로 사이클론의 입구부와 출구부에서 측정하였다.

실험용 펌프는 D공업의 모터 DB-230을 사용했으며, 컨트 롤 박스를 제작하여 회전수 조절을 통해 유속을 설정할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 60 rpm 회전수로 설정하여 실험을 진행했으며 사이클론에 연결 후 유속측정 시 입구농도는 12 m/s로 측정되었다.

2.3. 수치해석

수치해석을 위해 ANSYS사의 GAMBIT을 이용하여 모델링 및 격자를 생성하고 Fluent를 이용 Computational Fluid Dynamics (CFD) 해석을 통해 내부선회류 및 외부선회류의 흐름 분석 및 유속을 분석하였다.

수행 조건으로는 Reynolds Stress Model (RSM)을 이용하여 시뮬레이션을 수행했으며 RSM이 복합적인 와류에 대한 해석으로 적합한 모델로 판단된다.⁷⁾ GAMBIT을 이용하여 총 141,799개의 cell로 설정하여 시뮬레이션을 수행했으며, 입, 출구 및 유속을 입력하고 물질은 공기로 설정하여 수행했다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시뮬레이션을 이용한 수치해석 결과

각각의 사이클론 헤드 타입에 대해서 CFD 시뮬레이션을 통해서 결과를 도출하였다. 소선수는 25개를 설정하여 사이클론 내부에서 가스의 흐름 및 유속 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 5~7에서 각각의 평행 사이클론의 시뮬레이션 결과는 다음과 같이 나타났다. 사이클론의 효율에 관련된 인자들 중 입구속도에 따라서 효율이 변하기 때문에 시뮬레이션결과에서 나타났듯이 내부에서 속도변화를 색깔 별로 비교 분석이 가능하여 결과를 토대로 각각의 사이클론의 헤드 타입에 따른 입구속도를 분석하였다.

Fig. 5. Result of CFD simulation of normal type cyclone.

Fig. 6. Result of CFD simulation of P type cyclone.

Fig. 7. Result of CFD simulation of A type cyclone.

사이클론의 몸통부에서의 외부선회류 유속분포가 기본형의 경우 15.48~12.15 m/s, P-1의 경우 15.88~11.91m/s, P-2의 경우 16.22~12.16 m/s, P-3의 경우 16.01~12.01 m/s로 나타났다. A-1의 경우 15.70~11.78 m/s, A-2의 경우 16.20~12.15 m/s, A-3의 경우 15.80~11.85 m/s로 나타났다.

Fig. 8에서 P type과 A type의 입구최대속도를 비교하였다. 원통의 길이가 140 mm인 P-1의 입구최대속도는 15.88 m/s, 190 mm인 P-2는 16.22 m/s, 240 mm인 P-3는 16.01 m/s로 나왔으며 입구최대속도는 P-2, P-3, P-1 순으로 나타났다.

수직길이가 140 mm인 A-1의 입구최대속도는 15.70 mm, 190 mm인 A-2는 16.20 mm, A-3의 경우 15.80 mm로 나타났다. A-2, A-3, A-1 순으로 입구최대속도가 나타났다.

P type이 A type보다 전체적으로 높은 입구속도를 나타냈으며, 각각의 경우 P-2, A-2, P-3, P-1, A-3, A-1 순으로 입구최대속도가 나타났다. 두가지 type 모두 기본형의 15.48 m/s보다 높은 입구속도를 나타냈다.

사이클론에서 입구속도가 빠를수록 사이클론의 집진효율은 증가하게 된다. Xiong⁸⁾에 따르면 입구속도가 증가함에 따라서 효율역시 증가하고 동일한 입경의 입자에 대해서 입구속도가 빠를수록 집진효율이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8. Maximum inlet velocities of 7 different parallel head types.

Fig. 9. Collection efficiencies of 7 different parallel head types.

3.2. 집진효율

실험을 통해서 측정된 PM-10에 대한 입, 출구 농도를 계산하여 사이클론 타입별 집진효율을 분석하였다.

Fig. 9는 P type, A type의 헤드별 집진효율을 나타낸다. 원통의 길이가 140 mm인 P-1의 경우 86.48%, 190 mm인 P-2는 92.90%, 240 mm인 P-3의 경우 90.26%의 집진효율이 계산되었다. P-2, P-3, P-1 순으로 집진효율이 높게 나타났다.

원통의 길이가 140 mm인 A-1의 경우 91.57%, 길이가 190 mm인 A-2의 경우 94.84%, 길이가 240 mm인 A-3의 경우 92.49%로 집진 효율이 계산되었다. 집진효율은 A-2, A-3, A-1 순으로 높게 나타났다.

A type이 P type보다 동일한 길이별로 2~4% 정도의 높은 집진효율을 나타냈다. 두 가지 type 모두 2, 3, 1번 헤드순으로 집진효율이 높게 나타났다. 전체적인 집진효율은 A-2, P-2, A-3, A-1, P-3, P-1 순으로 높게 나타났으며 기본형의 집진효율인 85.60%보다 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 기본형 사이클론과 평행 사이클론에서 PM-10의 집진효율 실험과 평행 사이클론의 헤드의 조건에 따른 집진효율 실험을 통해 다음과 같은 결론으로 도출하였다.

1) 기본형 사이클론과 평행 사이클론의 집진효율을 분석한 경우, 기본형의 경우 집진효율 85.60%, p type의 경우 평균 89.88%, A type의 경우 평균 92.97%로 기본형 사이클론에 비해 평행 사이클론 두 종류 모두 PM-10에 대해서 높은 집진효율을 나타냈다.

2) 평행 사이클론의 경우 A type과 P type의 내부평행부의 길이에 따른 집진효율을 분석한 결과로는 길이가 증가함에 따라 집진 효율이 증가하는 추세를 보이다가 190 mm 이후 다시 감소하는 추세를 나타냈다. 이는 CFD 시뮬레이션 결과에서도 계산되었던 입구최대유속의 증가, 감소와 같은 결과로 나타났다. 내부 평행부의 길이에 따라서 유속에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3) CFD 시뮬레이션을 이용한 사이클론 내부의 기체의 유동을 분석한 경우, 입구부의 최대유속에 대해서 분석하였다. 기본형 사이클론의 경우 15.48 m/s, P type의 경우 평균 16.03 m/s의 최대유속이 계산되었고, A type의 경우 평균 15.9 m/s의 최대유속이 계산되었다. 기본형 사이클론에 비해서 평행 사이클론 두 종류 모두 높은 입구최대유속이 계산되었다.

4) type 간의 집진효율에 대해서 분석한 결과로는 A type이 P type에 입구최대유속은 작지만 사이클론 외벽에 도달하는 거리가 더 짧은 구조로 A type이 설계되어 더 높은 집진효율을 나타내는 것으로 판단된다. 집진효율에 대한 최적의 조건을 찾기 위해서는 다양한 평행부에 대한 실험을 통해서 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지안전기술개발사업 연구과제입니다(No. 20162220100260).

KSEE

References

1. Kim, S. Y., "Association between fine particulate matter (PM_{2.5}) components and cardiovascular health in MESA," *Symposium Conducted at the Meeting of Environ. Health and Toxicol.*, **5**, 154~175(2014).
2. Wang, B. et al. "Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator," *Appl. Math. Modell.*, **30**, 1326~1342(2006).
3. Wark, K., Warner, C. F. and Davis, W. T., "Air pollution; Its Origin and Control," 3rd. ed., Addison-Wesley, Menlo Park, 228(1988).
4. Chu, K. W., Kuang, S. B. and Yu, A. B., "Particle Scale Modelling of the Multiphase Flow in a Dence Mediyum Cyclone: Effect of Solid Flow Rate," *Minerals Eng.*, **33**, 34~45(2012).
5. Bingtao, Z., "Prediction of Gas-Particle Separation Efficiency for cyclones: A Time-off light Model," *Sep. Purific. Technol.*, **85**, 171~177(2012).
6. Kang, S. K., "A Study for Collection and Mixing Characteristics of Particles in a Modified Cyclone Particle Collector," *J. Korea Academia-Ind. Cooperat. Soc.*, **14**(1), 485~492(2013).
7. Elsayed, K. and Lacor, C., "The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance," *Appl. Math. Modell.*, **35**, 1952-1968(2011).
8. Ji, Z., Xiong, Z., Chen, H. and Wu, H., "Experimental investigations on a cyclone separator performance at an extremely low particle concentration," *Powder Technol.*, **191**, 83~91(2009).