사이클론과 관성충돌 및 백필터의 제진원리를 일체화한 멀티 제진시스템의 수치 해석적 연구 (Ⅰ) : 집진기 입구 최적화 설계

정유진*, 정문헌*, 박기우*, 홍성길*, 임기혁**, 서혜민**, 손병현**
씨이테크(주) 연구개발센터*
한서대학교 환경공학과**
e-mail : bhshon@hanseo.ac.kr

A Study on Numerical Calculations of Multi-stage Dedust System coupled with the Collection Principle of Cyclone, Inertial Impaction and Bag filter (Ⅰ) : Optimized Design of Dedust inlet

Yu-Jin Jung*, Moon-Heon Jeong*, Ki-Woo Park*, Sung-Gil Hong*,
Ki-Hyuk Lim**, Hye-Min Suh**, Byung-Hyun Shon**
* C.E.Tech Co. Ltd., R&D Center
** Department of Environmental Engineering, Hanseo University

요약

본 연구는 하나의 장치 내에서 “싸이클론-관성충돌-여과포 집진”이라는 다단 제진 단계가 동시에 이루어져 입경 분포별로 순차적인 제진이 가능한 멀티 집진기의 처리가스 제어 효율을 극대화시킬 수 있는 기류 흐름을 얻기 위한 최적화 설계 조건을 검토하는 것이다. 우선 1단계 제진 과정인 원심력을 이용하여 조대입자의 유선 이탈을 촉진시킬 수 있는 사이클론 유동을 최적화시키기 위한 집진기 입구 형상 설계 검토를 위해 수치 해석적 연구를 수행하였다. 그 결과, 멀티집진기 입구 형상을 일반적인 설계 방식인 접선 유입식으로만 설계한 것에 비해 선회류를 한번 더 가속화시킬 수 있는 가이드 베인을 추가로 설계한 경우 선회류의 pitch가 짧고 강하게 형성되어 사이클론부에서 조대입자의 유선 이탈을 촉진시키는데 매우 효과적인 것으로 예측되었다. 단, 사이클론부 하단 벤츄리 형상으로 인해 약 4 ~5 m/s의 강한 하향 흐름이 호퍼 하단까지 형성되고 있어 탈리 분진의 재비산 문제가 발생할 가능성이 크므로 벤츄리 형상 설치 유무에 대한 영향도 추가적으로 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1. 서론

현재까지 미세입자에 대한 최고 집진성능을 보이는 대기오염방지시설로는 전기집진기와 여과집진기로 알려져 있다. 여과집진기(백필터집진기, Bag filter de-duster)의 경우 년 평균 약 110% 이상 증가하는 추세를 나타내고 있는데, 이는 여과집진기술이 다른 집진기술에 비해 먼지 부하 변동에 크게 영향을 받지 않고 운전 및 관리가 용이하며, 미세입자에 대한 제진 효율이 매우 우수한 특징을 갖고 있기 때문이라고 볼 수 있다.

그러나, 실제 산업 현장 및 분진 다량 배출 공정에서는 발생 분진의 입경 분포가 매우 다양하므로 미세입자의 제진효율이 우수한 여과 집진기일지라도 조대입자에 대한 선행 제어가 되지 않는다면 여과포 상에서 조대입자의 방해에 의해 미세입자 제진효율이 저감될 수 밖에 없는 실정이다.

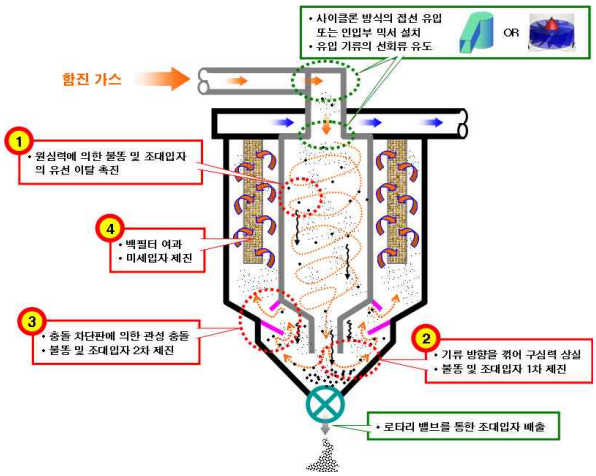
이에 다양한 입경 분포를 갖는 분진이 발생하는 공정, 특히 주물 공장의 후처리 공정 및 용해 공정 등에는 아래 [그림 1]과 같이 여과 집진기 전단에 원심력 집진기(사이클론, Cyclone)를 설치하여 조대입자를 1차 제어한 후, 여과 집진기에서 미세입자를 2차 제어하는 형태로 설치하여 운용하기도 한다.

그러나, 이러한 복합 제진 방식은 두 개의 집진장치를 직렬로 연결함에 따라 압력손실이 과대해져 고정압용 송풍기를 사용해야 하므로 이에 따른 초기

설치비, 동력비, 유지관리비, 및 설치 부지면적 등이 많이 소요된다는 문제점이 있다.

이에 본 연구팀에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 [그림 2]와 같이 하나의 장치 내에서 “싸이클론-관성충돌-여과포 집진”이라는 다단 제진 단계가 동시에 이루어져 입경 분포별로 순차적인 제진이 가능한 멀티 집진기(특허 출원 제10-2011-0068196호)를 산학공동기술개발사업을 통해 개발하고 있다.

[그림 1] 복합 제진 설비 (사이클론+백필터)



[그림 2] 멀티 집진기 집진 원리도

따라서 본 연구에서는 처리가스의 제어 효율을 극대화시킬 수 있는 기류 흐름을 얻기 위한 목적으로 우선 고효율 멀티 집진기의 1단계 제진 과정인 원심력을 이용하여 조대입자의 유선 이탈을 촉진시킬 수 있는 사이클론 유동을 최적화시키기 위한 집진기 입구 형상 설계 검토를 위해 수치 해석적 연구를 수행하였다.

2. 수치 해석 내용

2.1. 수치 해석 개요

2.1.1. 기초 방정식

유체의 유동에 대한 물리적인 특성을 나타내는 기본적인 법칙이 있다. 예를 들어, mass, momentum, energy conservation 등과 같은 법칙들이다. 정상 상태, 비압축성 기체라 가정할 때 일반적인 물리량의 수송 방정식을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.[3]

$$\mathrm{div}(\rho V\Phi_i - \Gamma_{\Phi i}\ \mathrm{grad}\Phi_i) = S_{\Phi i} \qquad (1)$$

$S_{\Phi i}$는 부력항($S_{buoyancy}$)을 제외한 비정상항, 압력구배 등을 포함한 모든 source term을 나타낸다. 난류 모델에는 난류점성계수를 취급하는 방법에 따라 여러 가지 모델이 있는데, 본 연구에서는 Launder와 Spalding에 의해 제시된 Standard k-ε turbulence model을 사용하였다[4].

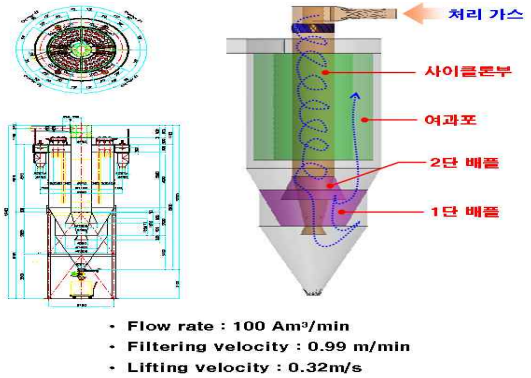
2.1.2. 수치 해석 방법

본 연구에 사용된 상용 소프트웨어인 FLUENT에서는 이산화 방법으로 유한 체적법 (Finite-volume method)을 사용하고 있다. 모든 수치 해석은 상류차분 도식(Upwind differencing scheme)과 엇갈림 격자계(Staggered grids)를 이용하여 수행하였다. 압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 Semi - Impicit Method Pressure - Linked Equations (SIMPLE) 알고리즘을 사용하였고, 벽면과 고체 표면에서의 전단 응력은 벽함수(wall function)를 이용하여 계산하였다. 촉매층은 실제 형상과 공극을 모델링하여 구현하는 것이 불가능하므로 porous jump model을 이용하여 다공성 물질로 가정하고 국부 유속에 대한 단위 면적당 압력강하로 계산하였다.[5]

2.2. 수치 해석 모델

2.2.1. 해석 대상 및 경계 조건

[그림 3]에 멀티 집진기 도면과 경계 조건을 나타내었다. 100Am/min^{3}의 유량이 상부 입구로 유입되어 하향 선회류를 형성하여 사이클론부를 통과하고 기류 방향이 상향으로 전환되어 배플에 충돌 차단 과정을 거친 후 여과포를 통과하도록 설계되었다.

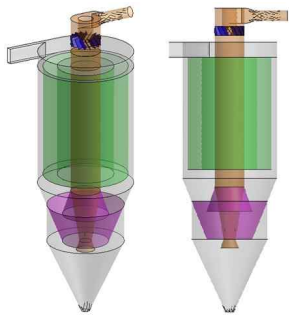


[그림 3] 해석 대상 본체 도면 및 운전 조건

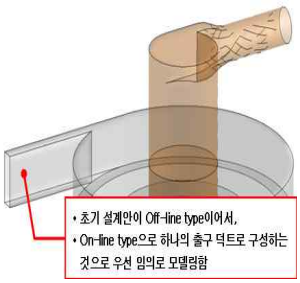
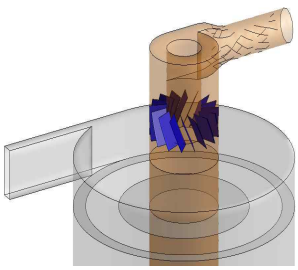
2.2.2. 해석 모델

[표 1]에 유동해석을 위한 집진기 본체 모델과 수치 계산을 위한 격자 형성(Grid configuration) 모습을 나타내었다. 아울러, 사이클론 유동 형성을 최적화시키기 위한 집진기 입구 형상 설계 조건 2가지를 [표 2]에 나타내었다.

[표 1] 집진기 본체

Control volume	Grid configuration
	

[표 2] 집진기 입구 형상 조건

Case 1	Case 2
접선 유입 (유입 구조 단순화)	접선 유입 + 가이드 베인 설치
	

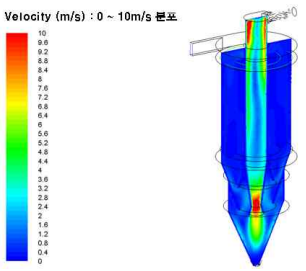
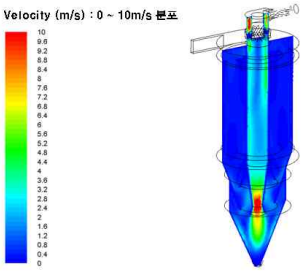
3. 결과 및 고찰

3.1. 속도장 및 기류장 예측 결과

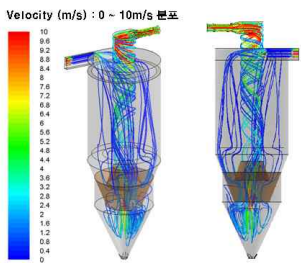
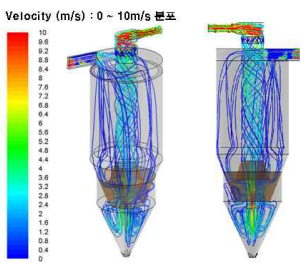
[표 3]의 속도장 예측 결과에서 볼 수 있듯이, 사이클론부 내부 유속의 경우 Case1은 Case2에 비해 강한 유속이 사이클론부 내부에 길게 형성되는 것으로 예측되었다.

[표 4] 기류장 예측 결과에서 볼 수 있듯이, 속도장 예측 결과와 마찬가지로 Case1 선회류 pitch가 Case2에 비해 길게 형성되고 있음을 확인할 수 있다.

[표 3] 속도장 예측 결과

Case 1	Case 2
접선 유입 (유입 구조 단순화)	접선 유입 + 가이드 베인 설치
	

[표 4] 기류장 예측 결과

Case 1	Case 2
접선 유입 (유입 구조 단순화)	접선 유입 + 가이드 베인 설치
	

3.2. 예측 결과 종합

사이클론부에서 조대입자의 유선 이탈을 촉진시켜 분리하기 위해서는 선회류의 pitch가 짧고 강하게 형성되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 멀티 집진기의 입구 형상은 접선 유입식으로 설계하되, 선회류의 형성을 극대화시킬 수 있는 가이드 베인

(Guide vane)을 추가로 설치하는 Case2의 방안이 바람직할 것으로 예측되었다.

단, 사이클론부 하단 벤츄리(Venturi) 형상으로 인해 약 4~5 m/s의 강한 하향 흐름(Down stream)이 호퍼 하단까지 형성되고 있어 탈리 분진의 재비산 문제가 발생할 가능성이 클 것으로 예상되었다.

4. 결론

본 연구의 목적은 하나의 장치 내에서 “싸이클론 - 관성충돌 - 여과포 집진”이라는 다단 제진 단계가 동시에 이루어져 입경 분포별로 순차적인 제진이 가능한 멀티 집진기의 처리가스 제어 효율을 극대화시킬 수 있는 기류 흐름을 얻기 위한 최적화 설계 조건을 검토하는 것이다.

이에 우선적으로 1단계 제진 과정인 원심력을 이용하여 조대입자의 유선 이탈을 촉진시킬 수 있는 사이클론 유동을 최적화시키기 위한 집진기 입구 형상 설계 검토를 위해 수치 해석적 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구 대상의 입구 형상을 접선 유입식으로 설계한 형태와 접선 유입식에 선회류를 한번 더 가속화시킬 수 있는 가이드 베인을 추가로 설계한 형태를 비교 검토한 결과, 가이드 베인을 추가로 설치한 경우에 선회류의 pitch가 짧고 강하게 형성되어 사이클론부에서 조대입자의 유선 이탈을 촉진시키는 데 매우 효과적일 것으로 예측되었다.
2. 단, 사이클론부 하단 벤츄리(Venturi) 형상으로 인해 약 4~5 m/s의 강한 하향 흐름(Down stream)이 호퍼 하단까지 형성되고 있어 탈리 분진의 재비산 문제가 발생할 가능성이 클 것으로 예상되었다.

벤츄리의 설계 의도는 사이클론부를 통과한 기류가 상향 흐름으로 방향을 전환할 때 좀 더 가속시켜 빠르게 곡률반경을 형성하여 조대 입자의 분리를 극대화시키기 위함인데, 벤츄리로 인하여 탈리된 분진을 잠시 저장하는 공간인 호퍼 하단부까지 강한 유속을 형성시키고 있어 탈리 분진의 재비산 가능성이 있는 바, 벤츄리 형상 설치 유무에 대한 추가적인 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도 산학공동기술개발사업(00045078)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

[1] 김진욱, 정유진, 유정근, 손병현, “반건식 반응기와 백필터를 결합한 하이브리드 대기오염제어 시스템의 수치해석적 연구(Ⅱ)”, 한국산학기술학회논문지 제12권 제2호, pp. 985-992, 2011.

[2] 이원희, “상부유입식 전기 Cyclone/Bag filter의 특성”, 부경대학교 공학석사학위논문, 2000.

[3] 박병현, “여과집진기에서 역세척 충격기류 분사노즐 형태 및 탈진 효율에 관한 연구”, 경희대학교 공학석사학위논문, 2004.

[4] 명현국, “수치유체공학”, 한미출판사, pp. 124-138, 1997.

[5] Patankar SV, “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, Hemisphere Publishing Corp., 1980.

[6] 신병록, 장근식, 조강래, “전산유체역학”, 대영사, pp. 264-277, 1997.