

사이클론-백 하이브리드형 집진장치에서 유동연결부 설계조건에 따른 유동균일성 전산해석

구 성 모¹⁾ · 오 원 철²⁾ · 장 혁 상¹⁺⁾

¹⁾영남대학교 환경공학과, ²⁾정원이엔씨

(2016년 9월 22일 투고, 2016년 12월 22일 수정, 2016년 12월 25일 게재확정)

CFD Analysis on the Flow in the Connection Duct of the Cyclone-Bag Hybrid Dust Collector

Seongmo Koo¹⁾, Wonchul Oh²⁾, Hyuksang Chang¹⁺⁾

¹⁾Department of Environmental Engineering, Yeungnam University, ²⁾Jungwon E&C

Abstract

Numerical analysis was done to evaluate the movement of the particles and the fluid inside of the cyclone-bag hybrid dust collector. Flow discharged from the cyclone in the hybrid particle collector has swirl pattern, and it results in the biased flow to the bag filters and deteriorates the collection performance of the bag filter. The current study is to evaluate the effect of the duct lengths and the baffle arrays in the connection duct by the computational methods. Main concerns of the analysis are how to improve the uniformity of the internal flow between the cyclone and the bag filter. Numerical analysis was done to check the particle removal efficiencies of the system with respect to the flow characteristics which is expressed in RMS values of the upward flow inside of the connection duct. The flow pattern inside of the connection duct is evaluated under different the duct lengths and the baffle arrays. In case of the reference geometry the RMS value of inside flow was 56.7%, and the value was decreased to 30.1% by controlling the lengths of duct. The effects of baffle was also evaluated, the RMS value of flow could be decreased 55.2% and so on. But the pressure drop across the baffles becomes high and the system efficiency becomes lower.

Keywords : Cyclone dust collector, Bag-filter, CFD

* Corresponding author.

Tel : +82-53-810-2547, Fax: +82-53-811-5288

E-mail : hschang@yu.ac.kr

1. 서 론

대기오염물질은 특성에 따라 가스상 오염물질과 입자상 오염물질로 분류되어진다. 그 중 입자상 오염물질은 물질의 파쇄 같은 기계적 처리나 연소 공정을 포함한 각종 화학적 공정에서 주로 발생되며 그 발생기원에 따라 입자는 크기, 밀도, 농도 등의 다양한 특성을 갖고, 대기 중에 존재할 때 시정장애를 유발하고, 증금속, 질산염, 황산염, 유기화합물 등의 인체에 유해한 인자를 포함할 수 있어 인체나 호흡기에 치명적인 피해를 입히기도 한다(John et al., 1990). 또한 입자상 오염물질의 입경에 따라 그 영향이 달라지고 입경이 미세할수록 위생학적 피해가 증가되는 것은 널리 알려져 있다(Donaldson and Stone, 2003). 이러한 이유로 산업공정에 사용되는 집진장치는 넓은 입경범위에 걸친 입자상물질을 동시에 처리하는 능력이 요구되고 있다.

입자상 물질을 제거하기 위한 집진장치로는 집진 방식에 따라 중력식, 전기, 여과, 사이클론 집진장치 등이 존재하며, 각 집진장치는 유지 및 설치비용, 집진효율, 후처리 등에 따라 장단점을 갖는다. 중력식 집진장치는 유지비용은 저렴하지만, 낮은 집진효율과 넓은 설치공간을 요구하는 단점을 갖는다. 전기 집진장치는 집진효율을 비교적 높으나 설치비용이 높고, 부하변화에 대한 대응이 어렵다(Wark et al., 1981; Flagan and Seinfeld, 1988). 여과 집진장치는 백필터를 통과하는 처리가스 중에서 입자를 포집하기 위해 입상 또는 섬유상의 물질로 구성된 다공성 구조다. 여과 집진장치의 경우 먼지의 집진 량에 따라 압력손실이 달라지고 주기적인 탈진 작업이 필요하며 액체상 물질이 포함될 경우 탈진에 의해 처리하지 못하고 교체가 요구된다(Ellenbecker and Leith, 1981; Wark et al., 1981). 사이클론 집진장치는 유체가 회전하며 발생하는 원심력에 의해 고체상 또는 액체상의 입자상 물질을 분리하는 장치로서 질량에 비례하는 원심력으로 입경이 비교적 큰 입자들을 제어하는데 용이하지만 입경 10 μm 이하의 작은 입자에 대해서는 전기 집진장치나 필터 같은 고성능 집진장치의 효율적인 운전을 위해 입자의 처리부담을 경감해주는 역할을 한다(Leith and Mehta, 1973; Bohnet, 1994; Chung et al., 1998).

설치공간을 효율적으로 활용하고 넓은 입경범위의 입자상 물질을 처리하기 위해 제안되는 사이클론(cyclone)과 백필터(bag Filter) 결합형 하이브리드(hybrid) 집진장치는 고용량 사이클론의 후류위치에 상단박스를 설치하여 전단의 사이클론에서 포집하지 못하는 작은 입자를 후단의 백필터 집진장치가 포집하며 또 백필터의 교환주기를 늘려주는 상호보완작용을 하게 된다. 그러나 이런 하이브리드형 집진장치의 경우 구조상 전단의 사이클론을 통과하며 백필터 영역에 도달하는 유체는 유동을 유도하는 연결부에서는 벽면을 타고 흐르는 선회류의 특성을 가지게 되고 유체가 유동중심으로부터 외곽로 물리기 때문에 백필터의 여과 면에 균일하게 도달하는 유동을 얻을 수 없게 된다. 이러한 상황은 결국 집진성능의 저하 및 필터의 성능단축을 가져오기 때문에 이에 대한 개선이 필요하게 된다. 본 연구에서는 유동의 개선작업을 위한 목적으로 전산해석을 통해 유동연결부에서의 편향적 유동에 대한 문제점을 확인하고 평가한다.

2. 실험 방법

하이브리드형 집진장치 내 물리적 현상을 실험하기 위해서는 실제 형상을 제작하고 측정하여 결과 값을 도출하는 방법이 있다. 그러나 이러한 실험적인 방법은 실험비용과 공간 확보가 필요하며 실물 크기의 형상을 제작하는데 어려움이 따르기 때문에 형상을 축소하여 실험하는 경우가 많다. 축소 모델 실험을 통한 결과 값은 실물 크기의 모델에 대한 상사 보정이 요구되며, 이 보정으로 인해 실험 결과가 정확하다고 보장할 수 없어 신뢰에 어려움이 있다. 또한 백필터 영역의 활용도를 예측함에 있어서 내부에서 일어나는 난류 유동과 특정 영역의 속도 분포를 확인하는데 제약이 있기 때문에 본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 전산유체역학(CFD: computational fluid dynamics)을 이용하였다.

전산유체역학은 유동, 열전달, 입자추적 등과 같은 유체 현상을 비선형 편미분방정식인 Navier-Stokes 방정식을 유한차분법(FDM: finite difference method), 유한요소법(FEM: finite element method), 그리고 유한체적법(FVM: finite volume method)의 방법을 적용

이산화하여 대수방정식으로 나타내고(Crowe et al., 2012), 이를 수치해법의 알고리즘을 사용하여 풀어서 비선형 방정식의 근사해를 구하는 방법으로 저렴한 경비, 시간절약, 실제 및 이상 조건에서 유체 현상모사 등의 장점을 갖는다(Patankar, 1980) 본 연구에서는 전산해석을 실시하기 위해 상용코드인 ANSYS Fluent v15.0을 사용하였으며, 해석 대상을 여러 개의 격자로 나누어 나타낸 각 제어체적에 대하여 보존 법칙에 의거하는 비선형 미분방정식을 이산화하여 수치적으로 해석한다(ANSYS, 2013a).

2.1. 기본 해석 형상 및 격자

해석대상의 하이브리드형 집진장치는 정원 E&C에서 실제 제작하여 상용화하고 있는 집진장치를 이용하였다. 본 논문에서는 사이클론 집진장치와 백필터 집진장치를 혼합한 집진장치를 나타내기 위해 ANSYS사의 DesignModeler를 사용하였다(ANSYS, 2013a). 하이브리드형 집진장치의 형상은 그림 1로 나타내었다. 사이클론 입구는 높이 0.42 m, 폭 0.3 m의 덕트 형이며, 몸체의 직경은 2.3 m, 몸체의 원통 영역의 높이는 총 1.02 m로 상부로부터 0.56 m 위치에 입구가 위치해있다. 콘의 길이는 2.3 m, 덕스트 박스 쪽 출구 직경은 0.3 m이다. 내벽 직경은 원통 영역의 상부로부터 0.98 m의 위치에서부터 0.52 m까지 직경 1.7 m로 유지되었다가 이 위치에서 원통 영역의 상단까지 직경 2.3 m로 증가한다. 사이클론 영역이 끝나는 위치에서 0.85 m 동안 원통 영역에서 사각 기둥으로 전환되는 연결부이며, 사각 기둥은 가로 세로 2.3 m×2.3 m로 높이 3 m로 제작되었다. 이 사각기둥 내에 0.156 m 직경의 캔들 형 백필터가 등간격으로 100 개 위치하여 여과면적은 총 147 m²이다. 이후 0.5 m 높이로 빈공간이 유지되고 측면을 통해 아래로 직경 0.45 m의 출구가 있다. 총 높이는 7.67 m이며 최대 단면적은 가로 2.9 m, 세로 2.3 m로 6.67 m²이다.

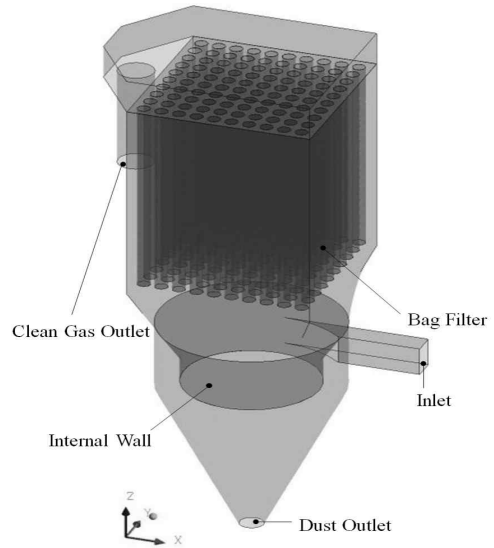


Figure 1. Schematic of default hybrid dust collector.

그림 1로 작성된 형상에 대하여 ANSYS사의 ANSYS Meshing 프로그램을 사용하여 격자를 생성하였다. 3D 현상에 대한 격자의 종류는 육면체 격자, 사면체 격자, 프리즘 격자 등이 있다. 이 중 육면체와 사면체 격자가 주로 사용되며, 육면체 격자의 경우, 동일 부피 내에서 비교적 적은 수의 격자를 형성하여 계산 시간이 짧고, 해석 시 나타나는 오차가 적다는 장점이 있다(Patankar, 1980; ANSYS, 2013). 그러나 복잡한 형상에서는 적합하지 않으며 본 연구에서 사용된 하이브리드형 집진장치에서는 사이클론 영역의 곡면이나 백필터 영역의 복잡한 형상에 의해 사면체 격자가 적합하다고 판단된다. 하이브리드형 집진장치의 노드(node) 수는 2,370,458 개이며, 요소(element) 수는 14,014,273 개로 구성된다. 격자의 질(quality)은 ANSYS Meshing 내에서 확인할 수 있으며 격자의 비대칭도(skewness) 값으로 판단가능하다. 비대칭도는 0~1 사이의 값으로 0에 가까울수록 격자의 질이 좋다고 할 수 있다(ANSYS, 2013). 본 연구에서 하이브리드형 집진장치의 비대칭도는 0.26이다. 전산해석에 활용된 격자는 그림 2에 나타내었다.

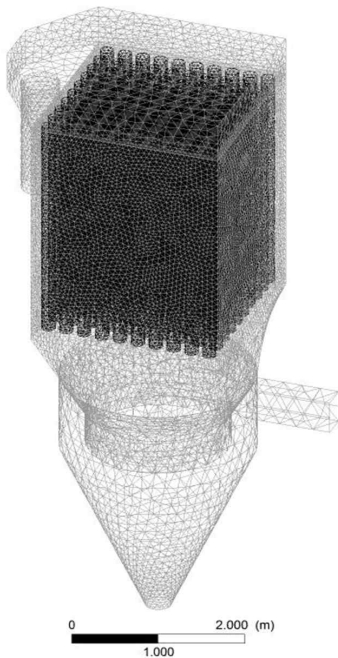


Figure 2. Mesh of default hybrid dust collector.

2.2. 경계 조건

전산해석에 이용된 유체는 연소 반응 후에 입자를 포함한 배출가스가 사용되어야 하지만 본 논문에서의 주제는 하이브리드형 집진장치에서 사이클론 집진장치 영역에서 배출된 유체가 백필터 집진장치 영역으로 접근하며 갖게 되는 편향적인 유동이 연결부 영역의 길이 및 배플 형상에 의해 비 편향적인 유동으로 전환되는 것을 유도하고 그에 따른 백필터 영역의 활용도를 해석하는 것을 주제로 하며, 실제로 집진이 이루어지는 영역의 크기 및 형상의 변화는 없으므로 집진효율의 큰 변화는 없을 것으로 예상된다(Griffiths and Boysan, 1996). 따라서 해석에 사용되는 유체는 정상상태의 공기로 유량은 $150 \text{ m}^3/\text{min}$ ($3.22 \text{ kg}/\text{sec}$)로 사용되었다. 해석에 입자를 띄울 필요는 없으나, 하이브리드형 집진장치에서의 집진효율을 확인하고 사이클론 집진장치에서 백필터 영역에서 줄여주는 로딩에 대한 해석을 위해 사용한 입자는 비중 2.65의 실리카로 사용하였다(Fassani et al. 2000). 입자의 크기를 0.01, 0.1, 1, 3, 5, 10 micron으로 각각 주입하여 크기별 집진효율과 입자추적을 통해 집진위치를 관찰할 예정이다. 출구는

대기압 조건으로 하였으며, 더스트 박스 쪽 출구에서 유체에 관해서는 벽면 조건, 입자에 관해서는 벽에 닿으면 포집됨을 가정했다.

2.3. 모델

하이브리드형 집진장치 내부에는 유체와 입자 다상 유동을 나타내기 위해, 오일러리안-라그랑지안(Eulerian-Lagrangian)기법을 사용하였다(ANSYS, 2013a). 이 기법에서 유체는 연속체로 간주하여 유동장에 대해 오일러리안(Eulerian)기법으로 해석되고, 비연속적으로 주입되는 입자에 대해서는 라그랑지안(Lagrangian) 기법으로 각 입자를 추적하여 입자의 거동을 예측했다. 이러한 다상유동에 대한 해석은 선행연구에 의해 개발된 모델을 적용하여 정확한 예측을 가능케 한다. 따라서 정확한 해석을 위해 적용된 난류모델과 이산유동모델은 다음과 같다(Dirigo and Leith, 1985; Avcı and Karagoz, 2003).

2.3.1 난류모델

점성 유체의 흐름은 무차원수인 레이놀즈 수를 기준으로 하여 흐름이 층류(laminar) 또는 난류(turbulence)로 나타낸다. 레이놀즈 수는 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (1)$$

여기서 μ 는 유체의 점성, ρ 는 유체의 밀도, U 는 유체의 속도, D_h 는 유체가 흐르는 관의 수리학적 직경이다. 또한 내부유동인 경우, 레이놀즈 수가 4,400 이상일 경우 흐름이 난류가 된다. 본 논문에서는 흐르는 유체는 공기이므로 밀도와 점도는 각각 $1.292 \text{ kg}/\text{m}^3$, $1.8 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ 이며, 입구에서의 속도는 $0.375 \text{ m}/\text{s}$, 입구의 수리학적 직경은 2.57 m 이므로 하이브리드형 집진장치에서 입구 속도를 기준으로 할 때 레이놀즈 수는 약 69,176을 가짐으로 해석 대상의 흐름은 난류 유동이 된다(Wark et al, 1988).

본 논문에서 장치 내부의 난류는 $k-\epsilon$ 모델을 통해 해석 및 설명된다. $k-\epsilon$ 모델은 가장 널리 적용되는 난류모델 중 하나로 관내 유동 해석에서 적합한 것으로 알려져 있으며, 복잡한 흐름에 대해서 정확한 예측이 가능한 모델이다(ANSYS, 2013a; ANSYS 2013b). 여기서, k 는 난류운동에너지(turbulent kinetic

energy)로 속도의 변동의 차이로 정의되며 차원은 $L^2 T^{-2}$ 이다. ε 은 난류에디소실(turbulence eddy dissipation)으로 정의되고 차원은 $L^2 T^{-3}$ 이다. $k-\varepsilon$ 모델은 방정식에 두 개의 새로운 변수를 나타낸다. 먼저, 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (2)$$

운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (3)$$

여기서, S_M 은 체적력의 합이고, μ_{eff} 는 난류에 대한 유효점성도이고 p' 는 변형된 압력으로 다음과 같이 정의된다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (4)$$

식 (4)에서 사용된 난류에 대한 유효점성도 μ_{eff} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5)$$

이 때, μ_t 는 난류 점성이다. $k-\varepsilon$ 모델에서는 난류 점성이 난류운동에너지와 소실과 관계를 가진다고 가정하였다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

C_μ 는 상수이다. k 와 ε 의 값은 난류운동에너지와 난류에디소실에 대한 미분 수송방정식으로 직접 나타내었다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \end{aligned} \quad (8)$$

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k 와 σ_ε 은 상수이다. P_{kb} 와 $P_{\varepsilon b}$ 는 부력의 영향을 나타낸다. P_k 는 점성력에 의한 난류 증가로 다음과 같이 나타낸다.

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \left(3 \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (9)$$

모델상수는 실험적인 값으로 가장 널리 사용되는 아래의 값을 적용하여 해석하였다.

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

2.3.2 이산유동모델

하이브리드형 집진장치에서 입구에서 유체와 함께 주입되는 입자의 유량, 직경 및 속도와 같은 초기 조건을 결정하기 위해 이산유동모델(Discrete Phase Model)을 사용하였다. 전술한 바와 같이 본 논문에서는 비연속상인 입자를 라그랑지안기법으로 Navier-Stokes 방정식에 따라 계산된 유동장을 통해 궤적을 추적한다. 이 모델에서 입자는 높은 질량부하를 가질지라도 낮은 부피분율을 가진다는 가정을 바탕으로 해석되어진다(Cortes and Gil, 2007).

2.3.2.1 입자 운동 이론

라그랑지안기법을 기반으로 한 해석 방식으로 입자에 대한 힘의 평형을 적분하여 비연속상인 입자의 궤적을 예측한다. 이 힘의 평형은 입자에 적용되는 힘을 입자 관성과 동일하다고 간주하고 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p + \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (10)$$

여기서, F_x 는 추가적인 가속도(force/unit particle mass) 항으로서 입자 주변의 유체 가속을 위해 필요한 가상 질량의 힘으로써 본 해석에서는 고려되지 않는다. g_x 는 중력가속도 ρ_p 및 ρ 는 각각 입자와 유체의 밀도이며, u_p 및 u 는 각각 입자와 유체의 속도이다(Crowe et al., 2012). $F_D(u-u_p)$ 는 입자의 단위 질량당 항력으로 다음과 같이 계산된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (11)$$

d_p 는 입자의 직경, μ 는 유체의 점성, C_D 는 항력계수, Re 는 레이놀즈(Reynolds) 수이다.

2.3.2.2 항력 계수 이론

오일러리안-라그랑지안 기법에서 사용되는 항력 계수 C_D 는 입자의 형태에 따라 그 값이 달라지며, 구형 입자의 항력계수는 다음과 같다.

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (12)$$

여기서, a_1, a_2 그리고 a_3 는 레이놀즈 수에 따라 결정되는 상수항이다. 비구형 입자의 경우 항력 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} (1 + b_1 Re_{sph}^{b_2}) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (13)$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3)$$

여기서 형상계수인 ϕ 는 다음으로 정의된다.

$$\phi = \frac{s_p}{S_p} \quad (14)$$

여기서 s_p 는 비구형 입자와 동일한 부피를 갖는 구체의 표면적이며, S_p 는 입자의 실제 표면적이다. Re_{sph} 는 동일한 부피를 갖는 구체의 직경을 이용해 계산된다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서 해석은 총 세 단계로 이루어진다. 첫 번째로 하이브리드형 집진장치의 기본 형태를 해석하여 사이클론 집진장치의 집진효율과 연결부에서의 내부유동 흐름 현상을 관찰하고 두 번째로 연결부의 길이 증가에 따른 유동 분포를 나타낸다. 마지막으로 기본 형상의 하이브리드형 집진장치의 연결부에 배플을 설계하여 배플의 형상에 따른 압력손실과 유동 분포를 비교하였다.

3.1. 기본 형상의 전산 해석 결과

하이브리드형 집진장치에 대한 계산처리의 반복(iteration)은 총 500 번 수행하였으며, 해의 잔차(residual)를 나타내는 그래프가 일정한 진동을 나타내어 해가 수렴되었다고 판단하였다. 전산해석 결과를 그림 3과 그림 5에 나타내었다. 그림 3에는 패스라인을 통해 집진장치 내부 유동을 확인하였으며 입구 영역에서 주입된 유체는 사이클론 외벽을 따라 빠른 속도로 회전하며 내려간 후에 다시 회전하며 내부유동을 통해 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 이 회전 유동은 사이클론으로부터 백필터 집진장치의 연결부로 상승함에 따라 약해지는 것을 볼 수 있다. 이 회전 유동은 백필터 영역을 거치며 사라지고 출구로 배출되어지는 것을 확인 할 수 있다. 연결부의 높이에 따라 유동방향의 순으로 plane 1, 2, 3으로 각각 정의하였으며 plane의 위치를 그림 4에 나타내었으며, 각 plane에서의 속도 분포를 그림 5에 나타내었다.

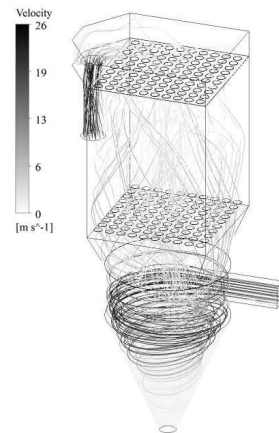


Figure 3. Pathlines of the default hybrid dust collector.

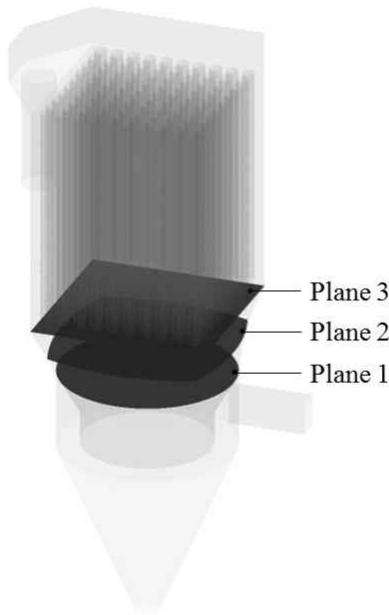


Figure 4. Plane position of the default hybrid dust collector.

그림 5에서는 아래쪽에 위치한 plane 1에서 유동 방향에 따라 plane 3으로 진행될수록 외각쪽에 위치한 빠른 유동을 갖는 두꺼운 영역이 점차 얇아지며 내부의 느린 유동 영역을 매워 나가는 것을 확인할 수 있다. 각 plane 에서의 속도에 대한 RMS를 계산하였을 때 결과는 표 1에 나타내었다.

Table 1. Root mean square of velocity on each plane of the default hybrid dust collector.

Location	RMS
Plane 1	97.82%
Plane 2	90.25%
Plane 3	56.67%

표 1을 통해 하이브리드형 집진장치 내의 유체가 유동방향에 따라 상승함에 따라 각 plane에서의 속도에 대한 RMS 값이 점차 낮아짐을 확인할 수 있으며, 이를 토대로 연결부에서 상승하는 유동은 점차적으로 평균에 근접하여 이후 백필터의 활용이 균일하게 될 것으로 예상되어진다. 본 연구에서는 전술한 결과를 토대로 연결부에서 상승함에 따라 속도의 균질화가 이루어지는 것을 확인하였으며 연결부의 길이조절 및 배플을 제작하여 동일한 해석을 진행하였다. 각 해석의 결과는 각각 3.2와 3.3절에 나타내었다.

3.2. 연결부 길이가 변형된 형상의 전산 해석 결과
전술한 바와 같이 사이클론 집진장치에서 백필터 집진장치로 이어지는 연결부에서 유동방향에 따라 속도 RMS가 낮아지며 균질한 유동으로 백필터의 높은 활용도를 예상하였다. 본 절에서는 다른 영역의 조건을 유지한 채 기본 0.85 m의 길이를 갖는 연결부를 1.275 m, 1.7 m로 각각 연장하여 높이에 따른 각 plane의 RMS를 확인하여 편향적 유동의 소멸을 예측하였다. 그림 6을 통해 길이가 조절된 하이브리드형 집진장치 나타내었다.

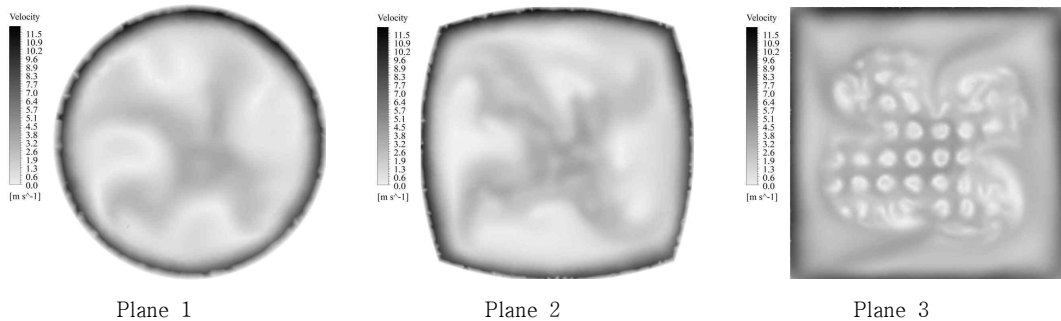
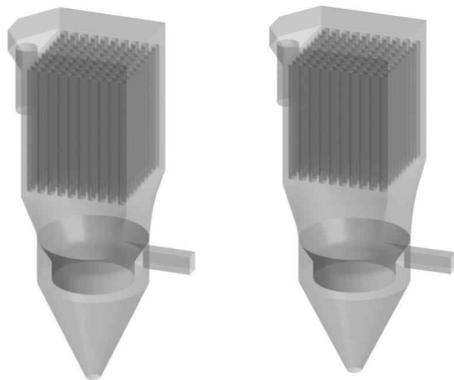


Figure 5. Velocity distribution on each plane of the default hybrid dust collector.



(a) Length of connection part=1.275 m (b) Length of connection part=1.7 m

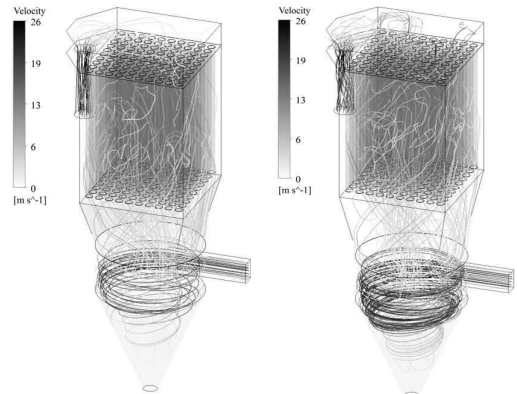
Figure 6. Schematics of modified hybrid dust collector.

각 해석에 따라 형상의 모양이 달라지므로 격자를 새로 생성해야하며, 해석에 사용된 형상은 각각 다른 높이를 갖기 때문에 격자의 개수가 아닌 각 격자들의 크기 수준이 같을 필요가 있었다. 격자 크기의 최소, 최대, 평균 및 표준편차를 맞추어 생성하였다. 각 형상에 대해 생성된 격자의 엘리먼트 수와 노드 수는 표 2를 통해 나타내었다.

Table 2. The number of element and node on each case of modified hybrid dust collector.

Case	Node	Element	Skewness
Lconnection = 0.85 m	2,370,458	14,014,273	0.278
(a) Lconnection = 1.275 m	3,356,756	18,936,618	0.269
(b) Lconnection = 1.7 m	4,219,395	25,024,685	0.255

유량 및 벽면의 조건은 일정하게 유지하고, 길이가 조절된 각 하이브리드형 집진장치에 대한 계산은 총 500번을 수행하였으며, 위의 경우와 마찬가지로 해의 잔차를 나타낸 그래프가 일정한 진동을 나타내어 해가 수렴되었다고 판단했다. 그림 7을 통해 각 형상에서의 패스라인을 확인하여 내부유체의 유동을 나타내었다.



(a) Length of connection part=1.275 m (b) Length of connection part=1.7 m

Figure 7. Pathlines of modified hybrid dust collector.

그림 7을 통해 각 집진장치에서 유체가 연결부 영역에 도달하며 회전력을 잃고 상승하며 백필터 영역 활용성이 높아짐을 예측할 수 있다. 그러나 패스라인을 통해 유체의 이동을 확인할 수 있으나, 균질화의 정도를 정확한 수치로 식별하기 어렵기 때문에 기본 형상과 동일하게 각 형상 내 연결부의 시작점, 중간점과 끝점에 각각 plane 1, 2, 3을 제작하였으며, 각 plane에서의 속도분포를 그림 8에 나타내고, RMS 값을 표 3에 나타내었다.

Table 3. Root mean square of velocity on each plane of modified hybrid dust collectors.

Case	RMS		
	Plane 1	Plane 2	Plane 3
default	97.82%	90.25%	56.67%
(a)	92.46%	73.00%	39.96%
(b)	89.08%	57.08%	30.06%

그림 8과 표 3을 통해 상승함에 따른 속도분포는 균질화 됨을 알 수 있는데 연결부의 길이가 길수록 RMS 값의 하강 폭은 높으므로 본 연구에 활용된 집진장치를 사용할 때 각 사업장의 규모에 맞추어 연결부의 길이를 길게 할수록 백필터의 활용도가 높을 것으로 예상된다.

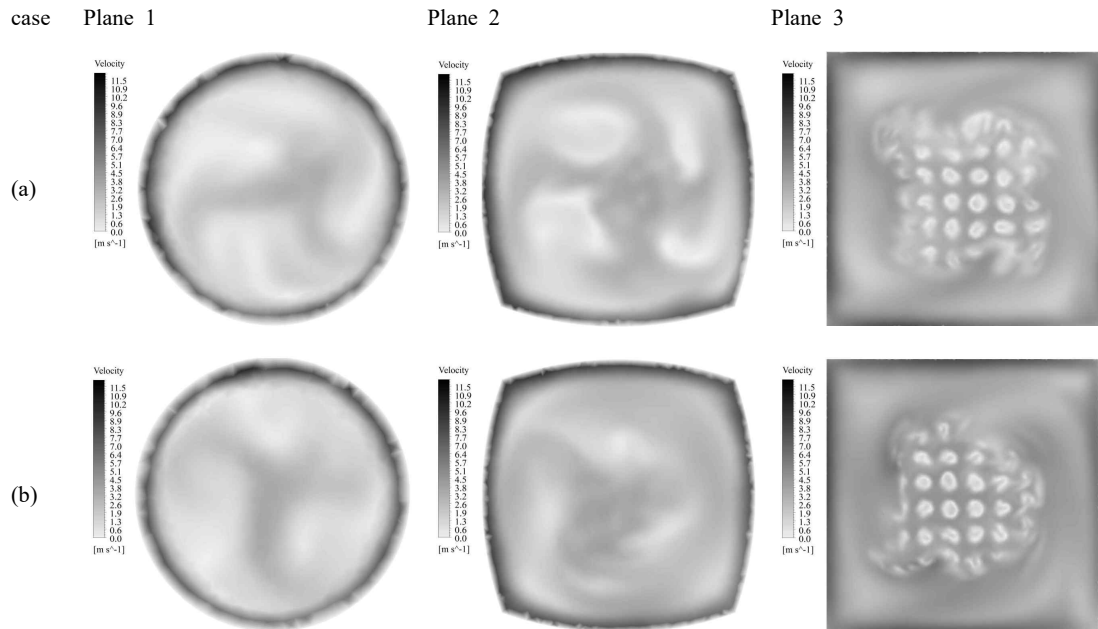


Figure 8. Velocity distributions on each plane of modified hybrid dust collector. (a) 1.275 m, (b) 1.7 m.

3.3. 연결부 배플이 제작된 형상의 전산 해석 결과
3.2절에서는 연결부 길이 조절에 따른 편향적 유동이 소멸되는 시간을 증가시켜 속도 분포를 확인하였다면, 본 절에서는 외각쪽으로 치우친 편향적 유동을 방해하는 배플을 제작하여 확인하였다. 이는 공정 건물의 높이가 일정하여 천장 이상으로 길이 조절이 불가능한 경우처럼 하이브리드형 집진장치의 크기를 변경할 수 없을 때 백필터 활용효율을 증가시키기 위한 해석이다. 배플은 기본 형상의 하이브리드형 집진장치의 연결부에 사이클론 집진장치 출구 반경인 1.15 m의 절반에 해당되는 0.575 m로 2개 설치하였다. 배플을 외각에 설치한 이유는 선회류에 의한 외각쪽으로 편향된 흐름은 방해하되 내부흐름은 방해하지 않기 위함이다. 그림 9를 통해 형상을 나타내었다.

3.2 절과 마찬가지로 각 해석에 따라 형상의 모양이 달라지므로 격자를 새로 생성해야하며, 해석에 사용된 형상은 배플에 의해 다른 형상을 갖기 때문에 격자의 개수가 아닌 각 격자들의 크기 수준이 같을 필요가 있었다. 격자 크기의 최소, 최대, 평균 및 표준편차를 맞추어 생성하였다. 배플을 설치한 하이

브리드형 집진장치의 형상에 대해 생성된 격자의 엘리먼트 수와 노드 수는 표 4에 나타내었다.

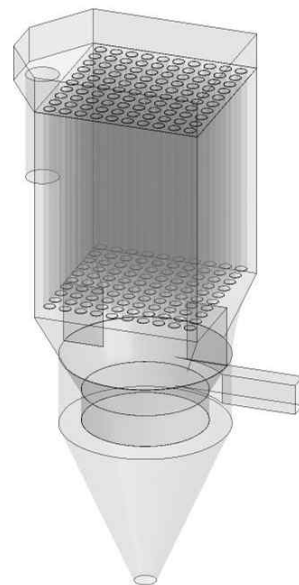


Figure 9. Schematics of baffle hybrid dust collector.

Table 4. The number of element and node of baffle hybrid dust collector.

Case	Node	Element	Skewness
none baffle (default)	2,370,458	14,014,273	0.278
2 baffles	2,376,322	14,046,611	0.279

경계조건을 일정하게 유지하여 배플이 형성된 각 하이브리드형 집진장치에 대한 계산은 총 500번을 수행하였다. 그림 10을 통해 형상에서의 패스라인을 확인하여 내부유체의 유동을 나타내었다.

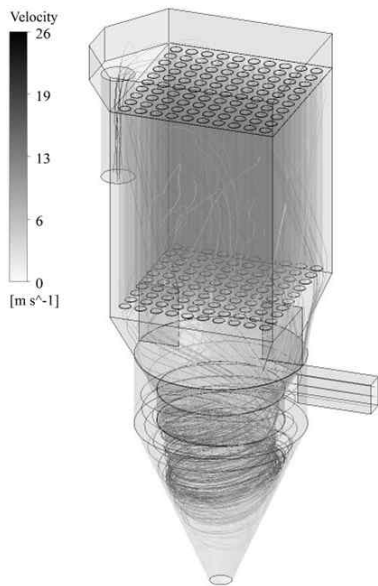


Figure 10. Pathlines of baffle hybrid dust collector.

그림 10을 통해 배플이 설치된 하이브리드형 집진장치에서 회전하던 유체가 연결부 영역의 배플에 도달하며 회전력을 잃고 상승하며 백필터 영역 활용성이 높아짐을 예측할 수 있다. 균질화의 정도를 정확한 수치를 식별하기 위해 기본 형상과 동일하게 형상 내의 연결부의 시작점, 중간점과 끝점에 각각 plane 1, 2, 3을 제작하였으며, 각 plane에서의 속도분포를 그림 11에 나타내고, RMS 값을 표 5에 나타내었다.

Table 5. Root mean square of velocity on each plane of baffle hybrid dust collector.

Case	RMS		
	Plane 1	Plane 2	Plane 3
default	97.82%	90.25%	56.67%
2 baffles	99.86%	89.18%	55.16%

그림 10과 표 5을 통해 상승함에 따른 속도분포는 균질화 됨을 알 수 있지만 각 plane에서의 RMS 값을 확인하였을 때, 배플의 설치와 비설치에서 크게 차이 나지 않는 것을 확인했다. 또한 3.2절의 경우 빈 통안의 유동임으로 압력손실이 높지 않았지만, 본 절의 연구에서는 배플에 의해 유동이 방해받기 때문에 압력손실이 발생할 것으로 예상되었다. 압력손실 값은 표 6에 나타내었다.

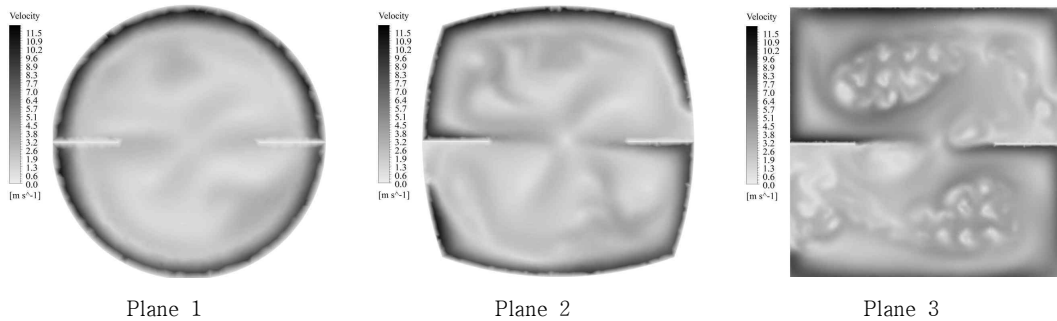


Figure 11. Velocity distributions on each plane of baffle hybrid dust collector

Table 6. Pressure drop of cyclone part of default and baffle hybrid dust collectors.

Case	Pressure drop
default	581.603 Pa
2 baffles	679.738 Pa

하이브리드형 집진장치의 압력손실의 대부분을 결정하는 위치는 백필터 영역이며 배플의 설치 유무는 압력손실에 큰 관여를 하지 않음을 알 수 있었으며 또한 앞의 해석 결과로 배플 설치 유무에 따른 속도 균질화는 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학을 통하여 하이브리드형 집진장치 내에서 가스의 유동을 분석하고 백필터의 고른 활용도에 대하여 해석하였다. 해석대상으로는 산업공정에서 사용되고 있는 크기의 사이클론 백필터 하이브리드형 집진장치가 사용되었으며 실제 운전되는 질량 유량을 사용하여 해석이 시행되었다. 해석결과 사이클론 집진장치에서 배출되는 유동이 외각을 타고 흐르는 선회류로 형성되어 있는 것이 확인되었으며 이 선회류 유동특성은 유동이 상승함에 따라 감소하지만, 10개×10개의 배열로 설치된 본 연구에서의 백필터에서는 선회류 유동에 의해 시스템의 활용도가 충분하지 못함을 볼 수 있었다. 이를 해결하기 위하여 선회류의 감소가 진행되는 연결부의 길이를 증가시키거나 외각쪽으로 회전하는 유동을 방해하는 배플을 설치하여 유동제어를 할 수 있는 것으로 평가되었다. 백필터의 고른 활용을 위한 연결부의 길이를 조절했을 때에는 연결부 영역의 길이가 길어질수록 영역내의 속도 분포가 고르게 전환되어지므로 보통의 경우 덕트의 길이를 충분히 되나 시스템이 장착되는 공간영역의 제한이 있으므로 필요한 만큼의 길이를 파악해 내어 그 결과를 설계에 적용하는 것이 필요하겠는 데 본 연구를 그 방법이 제안되었다. 배플에 의한 외각 유동 제어법은 배플이 설치되는데 따른 압력손실이

높고 시스템의 특성상 배플이 영역의 속도분포를 효율적으로 고르게 전환하지 못하는 것을 확인하였다.

참고 문헌

ANSYS. (2013a). *ANSYS Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc. Canonsburg. PA 15317

ANSYS. (2013b). *ANSYS Fluent User's Guide*, ANSYS Inc. Canonsburg. PA 15317

Avci, A. and Karagoz, I. (2003). Effect of Flow and Geometrical Parameter on the Collection Efficiency in Cyclone Separators, *Journal of Aerosol Science*, 34(7), 937-955.

Bohnet, M. (1994). Cyclone Separator for Fine Particles and Difficult Operating Condition, *KONA, Powder and Particle*, 12(0), 69-76.

Chung, J. D., Seo, Y. G. and Kanaoka, C. (1998). Numerical Simulation of Fluid Flow in Porous Filter for Particulate Removal Facility, *Advanced Powder Technology*, 9(1), 39-54.

Cortes, C. and Gil, A. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators, *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(5), 409-452.

Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y. (2011). *Multiphase flow with Droplets and Particles*, 2nd ed., CRC Press, Boca Ration, USA, Chap 8, pp 235-258.

Dirgo, J. and Leith, D. (1985). Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Prediction, *Aerosol Science and Technology*, 4(4), 401-415.

Donaldson, K. and Ston, V. (2003). Current Hypotheses on the Mechanisms of Toxicity of Ultrafine Particles, *Ann Ist Super Sanita*, 39(3), 405-410.

- Ellenbecker, M. J. and Leith, D. (1983). Dust Removal Characteristic of Fabric Used in Pulse-Jet Filters, *Powder Technology*, 36, 13-19.
- Fassani, F. L. and Goldstein, L. (2000). A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency, *Powder Technology*, 107(1-2), 60-65.
- Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H. (1988) *Fundamentals of air pollution engineering*, New Jersey, Prentice Hall Inc., Chap.7, pp 391-478.
- Griffiths, W. D. and Boysan, F. (1996) Computational Fluid Dynamics(CFD) and Empirical Modeling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers, *Journal of Aerosol Science*, 27(2), 281-304.
- John, W., Wall, S. M., Ondo, J. L., and Winklmayr, W. (1990) Modes in the Size Distribution of Atmospheric Inorganic Aerosol, *Atmospheric Environment*, 24A, 2349-2359.
- Leith, D. and Mehta, D. (1973). Cyclone performance and design, *Atmospheric Environment*, 7(5), 527-549.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, 1st ed., New York, McGraw-Hill, Chap3.
- Wark, K., Warner, C. F. and Davis, W. T. (1981). *Air Pollution: Its Origin and Control*, 3rd ed., New York, Prentice Hall, Chap 5.