

사이클론과 배플 및 백필터 원리를 결합한 하이브리드형 집진기의 최적화 설계를 위한 수치해석

홍성길^{1,2}, 정유진¹, 임기혁², 유정근³, 손병현^{2*}
¹씨이테크(주) 연구개발센터, ²한서대학교 환경공학과, ³한서대학교 화학공학과

A Numerical Study on an Optimum Design of a Hybrid Collector Coupled with the Principle of Cyclone, Baffle and Bag-Filter

Sung-Gil Hong^{1,2}, Yu-Jin Jung¹, Ki-Hyuk Lim², Jeong-Kun Yoo³,
and Byung-Hyun Shon^{2*}

¹C.E.Tech Co. Ltd., R&D Center, ²Dept of Environmental Engineering, Hanseo University
³Dept of Chemical Engineering, Hanseo University

요약 본 연구에서는 하나의 장치 내에서 "사이클론-관성충돌-여과포 집진"이 동시에 이루어지는 멀티 집진기의 집진 효율을 극대화시키기 위한 설계 조건을 검토하였다. 먼저 사이클론의 입구 형상에 대한 수치 해석 결과, 접선 유입식 입구에 가이드 베인을 추가로 설계한 경우 선회류의 회전수가 많고 강하게 형성되어 사이클론부에서 조대입자의 유선 이탈을 촉진시키는데 매우 효과적인 것으로 예측되었다. 그러나 사이클론의 하단부가 벤츄리 모양이기 때문에 약 4-5 m/s의 강한 하향 흐름이 호퍼 하단까지 지속되어 분진의 재비산 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이에, 사이클론부 하단의 벤츄리를 제거하며 분진 재비산 문제는 해소 가능할 것으로 나타났다. 충돌 차단형 배플의 간격을 조정하여 통과유속을 빠르게 한 결과, 충돌 효과는 더욱 증가할 것으로 예측되었으나 탈리 분진이 간섭을 받을 수 있는 문제점이 예상되어 배플은 기본 설계안대로 유지하는 것이 바람직할 것으로 나타났다.

Abstract The current research reviewed the design conditions that would maximize the efficiency of the hybrid collector that combines in one unit "cyclone-inertial impaction-bag filter". The computational analysis for the shape of cyclone entry predicts that a design that installs the guide vane at the entry of the tangential type cyclone brings a high-rpm and powerful vortex, very effective in promoting the deflection of coarse particles from the streamline at the cyclone. As the lower part of the cyclone is venturi-shaped, however, a strong flow downward of 4 to 5 m/sec persists through the lower part of the hopper, revealing the likely reentrainment of collected dust. And the removal of the venturi at the lower part of the cyclone would solve the problem of the reentrainment of collected dust. The acceleration of the flow velocity through the adjustment of the gap of the collision baffle would increase the effect of collision, but as the interference with the dust separation is expected, the original design should be kept for the baffle.

Key Words : Hybrid collector, CFD, Cyclone, Bag filter, Venturi

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

*Corresponding Author : Byung-Hyun Shon (Hanseo University)

Tel: +82-10-9669-1368 email: bhshon@hanseo.ac.kr

Received January 2, 2013

Revised (1st January 22, 2013, 2nd January 29, 2013, 3rd February 1, 2013)

Accepted February 6, 2013

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

입자상물질에 대한 고효율 집진시설로는 전기집진기와 여과집진기가 있는데, 산업분야에서는 여과집진기(bag filter)가 가장 많이 적용되고 있다. 이는 여과집진 기술이 다른 집진방법에 비해 먼지 부하 변동에 크게 영향을 받지 않고 운전 및 관리가 용이하며, 미세입자에 대한 집진 효율이 매우 우수한 특징을 갖고 있기 때문이다[1]. 그러므로 계속 강화되고 있는 입자상물질의 배출허용기준과 총량규제 대응에 적합하여 산업체(주물 제조업을 포함한 각종 먼지 다량 발생공정)에서 가장 많이 사용되고 있는 집진장치이다.

그러나, 산업 현장에서는 분진의 입경 분포가 매우 다양하므로 미세입자의 집진효율이 우수한 여과집진기라도 조대입자에 대한 선행 제거가 되지 않는다면 미세입자 집진효율이 저감될 수밖에 없다[2, 3]. 이에 다양한 입경 분포를 갖는 분진이 발생하는 공정에서는 여과집진기 전단에 싸이클론을 설치하여 조대입자를 1차 제거한 후 여과집진기에서 미세입자를 제거하는 형태로 운용한다. 이러한 집진 방식은 두 개의 집진장치를 직렬로 연결함에 따라 압력손실이 과대해져 고정압용 송풍기를 사용해야 하므로 초기 설치비, 동력비, 유지관리비 및 부지면적 등이 많이 소요되는 문제점이 있다[2, 3]. 일반적인 접선 유입식 싸이클론은 유입속도를 약 15~20 m/s로 설계한다. 이 경우 유입속도에 의해 압력손실이 증가하고 백필터와 연결시 싸이클론 내에서의 기류 방향 전환과 백필터와 연결 덕트의 굴곡에 따른 영향도 압력손실 상승의 원인이 된다.

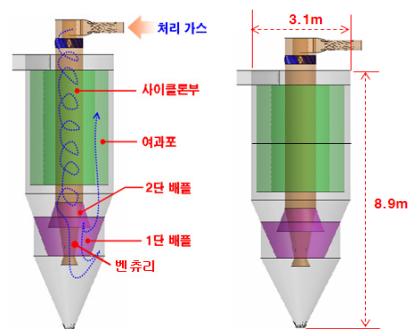
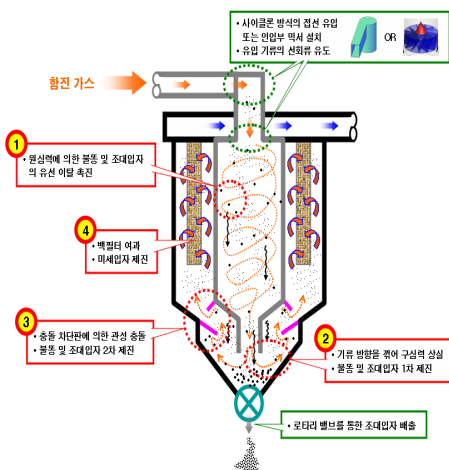
본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 1 과 같이 하나의 장치 내에서 “싸이클론 집진, 관성충돌, 여과포 집진”이 순차적으로 이루어져 입경 분포별로 집진이 가능한 멀티 집진기를 개발하고자 한다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 멀티 집진의 원리는 합진가스가 장치 상부로 유입되어 선회류를 형성하여 불동 및 조대입자가 원심력에 의해 이탈되고 기류 방향 전환에 따른 구심력 상실 및 중력침강 효과로 1차 조대입자 집진이 이루어진다. 이후 배플에 관성충돌하여 조대입자의 2차 집진이 발생하고 미세입자는 백필터를 통해 집진되는 구조이다.

싸이클론과 백필터를 결합하여 복합화 할 경우 발생 가능한 문제들을 해결하기 위해, 멀티 집진기의 1단계 집진과정인 조대입자의 유선이탈을 촉진할 수 있는 싸이클론의 입구 형상 설계를 위해 전산해석을 1차로 수행하였다. 또한, 싸이클론부 하단에 설치한 벤츄리의 영향으로 분진 재비산 가능성이 제기되어 이를 해결하기 위해 싸이클론 하단부에 벤츄리 설치 유무에 대한 효과를 2차 전산해석을 통해 검토하였다. 아울러 관성충돌용 배플에 대한 형상을 검토하기 위해 배플 제원을 변경하여 3차 전산해석을 수행하였다. 이와 같은 전산해석 결과를 바탕으로 최적 조업 조건을 유지할 수 있는 멀티 집진기의 상세 설계 및 제작에 반영하고자 한다.

1.2 장치 개요

Fig. 2에 멀티 집진기의 기본 설계안을 나타내었다. Fig. 2(a)는 본 연구에서 해석하고자 하는 멀티 집진기의 본체를 간략히 도시한 것이고 Fig. 2(b)는 멀티 집진기 본체의 제원을 나타낸 것이다.



[Fig. 2] Operating conditions and main body of hybrid collector

[Fig. 1] Cleaning mechanism of the hybrid collector

Table 1에 멀티 집진기의 기본 설계 조건을 나타내었

다. 분진의 재비산을 방지하기 위해 상승속도를 0.32 m/s 로 설계하였으며, 탈진 시스템은 충격 기류형(pulse air jet type) 방식을 적용하였다. Pulsing은 타이머 방식이 아닌 차압 상승에 따른 운전 방식으로 적용하여 50 mmAqu 에 도달하면 압축공기를 분사토록 구성하였다.

[Table 1] Design specification of hybrid collector

Flow rate	100 Am ³ /min
Type	Air pulse jet
Operation	On-line
Filter bag size	φ 156 X 3,700L / 1.85m ²
Filtering velocity	0.99 m/min
Lifting velocity	0.32 m/s

2. 수치해석내용

2.1 기초방정식

유체의 유동을 정상 상태, 비압축성 기체라 가정할 때 일반적인 물리량의 수송방정식을 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다[3,4]. 여기에서 V는 속도 벡터, Γ_φ는 확산 계수이다. S_φ는 부력항(Sbuoyancy)을 제외한 비정상항, 압력구배 등을 포함한 모든 항(source term)을 나타낸다.

$$\text{div}(V\Phi_i - \Gamma\Phi_i \text{ grad}\Phi_i) = S\Phi_i \quad (1)$$

2.2 난류모델

난류 유동은 매우 불규칙하고, 비정상 3차원 거동을 하므로 난류 유동과 관련된 유동 현상을 수치적으로 정확하게 예측하거나 설명하기는 어렵고 레이놀즈수 유동에서 발생하는 난류의 물리량 수송방정식인 Navier-Stokes 방정식을 직접 풀 수는 없으므로[5], 난류를 해석하기 위해 난류 모델을 도입하게 된다. 난류 모델은 난류 운동을 크게 난류 강도를 나타내는 속도 스케일과 난류 크기를 나타내는 길이 스케일, 두 가지 특성량으로 표현된다. 난류 모델은 난류 점성 계수(μ_t)를 취급 유무에 따라 여러 가지로 나눌 수 있다. 난류점성계수를 가정하지 않고 Navier-Stokes 방정식에서 레이놀즈 응력에 대한 수송방정식을 유도하여 구현하는 레이놀즈응력모델 등은 속도 변동에 따른 2차 상관량으로서의 레이놀즈 응력을 구하기 위한 산출식이 더욱 고차의 상관량 및 압력과 속도 변동량과의 상관관계 등을 포함하고 있기 때문에 이러한 상관량을 구하기 위해 수송방정식을 만들면 그보다 더 고차의 상관량이 식에 포함되는 문제가 발생함에 따

라 난류점성계수를 취급하는 난류 모델을 사용하게 된다. 난류점성계수를 취급하는 이러한 난류 모델 중 1974년 Launder와 Spalding에 의해 제시된 표준 k-ε 모델은 난류의 시간적으로 변동하는 속도가 시간 평균 속도와 변동분의 속도로 되어 있다는 가정하에 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균하여 속도 변동량의 상관항이 응력 형태(Re 응력항 = 난류 점성 계수 × 속도 구배)인 레이놀즈 응력항을 도출해 내고, 이는 분자점성에 의해 발생하는 전단 응력과 같은 형태로 난류를 가장 잘 표현하는 모델이라 할 수 있다[6].

표준 k-ε 난류 모델에서는 난류 점성을 난류운동 에너지(k)와 난류의 소산률(ε)로 표현한다.

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

난류 운동 에너지(k) 방정식은,

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

난류 소산률 방정식은 식 (4)와 같고 여기서 G_k는 난류 생성항으로서 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon_3} G_b) - C_{\epsilon_2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

필터백은 porous jump model을 이용하여 다공성 물질로 가정하고 국부 유속에 대한 단위 면적당 압력강하로 계산하였다[6].

2.3 수치해석조건

2.3.1 수치해석방법

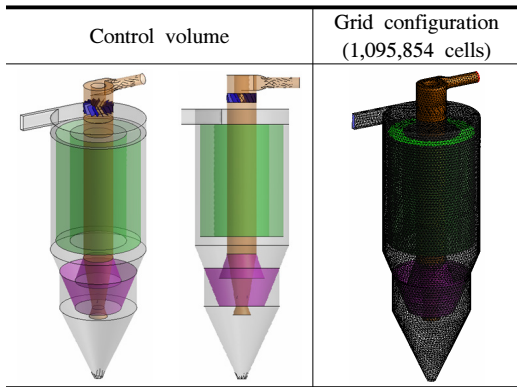
본 연구에서는 FLUENT를 사용하였고, 이는 난류 방정식들의 이산화 방법으로 유한체적법을 사용한다. 모든 수치 해석은 상류 차분 도식을 이용하여 수행하였다. 이는 대류항에 대해 인공적인 확산 즉, 수치확산을 도입한 것으로서 안정된 해를 구할 수 있다. 그리고 압력장을 구하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 조합시키는 방법으로 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다[4]. 또한 수렴

성을 좋게 하기 위해 하향 이완법을 사용하였다. 수치해석에 필요한 기본 방정식이 비선형이므로 반복에 의한 해의 수렴이 필요하다. 반복 계산 시 종속변수들의 수렴 정도를 점검하기 위하여 잉여치를 확인하면서 잉여치가 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 간주하였다[4].

$$\max |\phi^{n+1} - \phi^n| \leq 10^{-3} \quad (6)$$

2.3.2 해석모델 및 경계 조건

Fig. 3은 유동해석을 위한 집진기 본체 모델(Full domain, 1:1 scale)과 수치 계산을 위한 격자 형성(grid configuration) 모습을 나타낸 것이다. 격자는 총 1,095,824개를 사용하였다.



[Fig. 3] Control volume and grid configuration of hybrid collector

기본 설계안을 기초로 하여 멀티 집진기의 최적 조업 조건을 유지할 수 있는 설계안 검토를 위해 Fig. 4에 해석 조건 4가지를 나타내었다. Fig. 4에서 case-1과 case-2는 사이클론부의 선회류 유동 형성을 최적화시키기 위한 집진기 입구 형상에 관한 검토 조건이다. Case-1은 Fig. 2(b)의 선회류 형성을 위해 입구를 접선유입식으로 구성한 기본 설계안을 도시화한 것이며, case-2는 선회류수와 선회류강도를 좀 더 강하게 형성시키기 위한 의도에서 case-1의 기본 설계안에 가이드 베인을 추가로 설치한 것을 나타낸 것이다. Case-3은 기본 설계안에서 처리가스의 유속을 가속시키기 위해 설계한 벤츄리가 설계 의도에 부합되는지 확인하기 위해 벤츄리를 제거했을 때의 조건이다. Case-4는 조대입자의 충돌 차단용 배플 제원 변경 기본 설계안에서 배플 간격을 좁혀 상승 기류의 방향 전환 각도를 좀 더 크게 유지하고자 하였다.

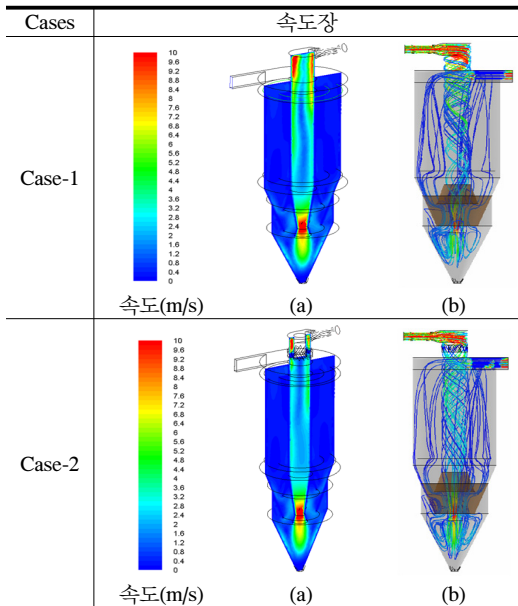
Cases	조건	모식도
Case-1	접선유입식의 기본설계안	
Case-2	접선유입식의 기본설계안에 가이드 베인 추가	
Case-3	접선유입식의 기본설계안에서 벤츄리 제거	
Case-4	접선유입식의 기본설계안에서 벤츄리 제거 및 충돌 차단용 배플 제원 변경	

[Fig. 4] Modified cases and boundary conditions for computational fluid dynamics of hybrid collector

3. 결과 및 고찰

3.1 가이드 베인 효과

Fig. 5에서 볼 수 있듯이, case-1은 case-2에 비해 강한 유속이 사이클론부 내부에 길게 형성되는 것으로 예측되었다. 또한 case-1의 선회류 pitch가 길어 회전수가 case-2에 비해 적음을 알 수 있다. 따라서 사이클론부에서 조대 입자의 유선 이탈을 촉진시키기 위해서는 선회류의 회전수가 많아야 하므로 멀티 집진기의 입구 형상은 접선 유입식으로 설계하고 가이드 베인을 설치하는 case-2의 방안이 바람직할 것으로 예측되었다. 단, 벤츄리의 설계 의도와는 달리 사이클론부 하단의 벤츄리를 통과한 처리가스가 호퍼 하단까지 약 4~5 m/s의 강한 하향 흐름을 형성하고 있어 탈리 분진의 재비산 문제가 발생할 가능성이 클 것으로 예상되었다.



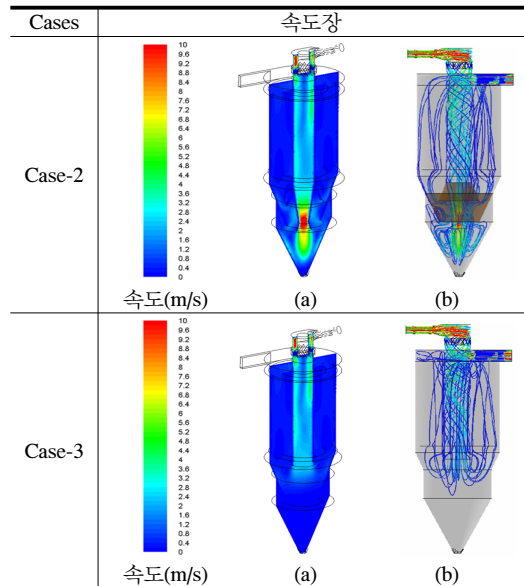
[Fig. 5] Velocity distribution and flow patterns of hybrid collector inlet with and without guide vane

3.2 벤추리 영향

Fig. 6은 싸이클론부의 벤추리 구간에서 기류 가속에 의한 분진의 재비산 문제를 해결하기 위해 벤추리를 제거한 후 전산해석을 수행한 결과이다. 벤추리 설치 유무에 따른 유동 현상 비교를 용이하게 하기 위해 case-2의 결과와 함께 비교하였다. Fig. 6의 case-3에서 볼 수 있듯이 벤추리를 제거하면 싸이클론부를 통과하는 즉시 상향으로 방향 전환을 하면서 오퍼 하단에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 예측되었다. 따라서 벤추리의 설계 의도와 달리, 분진의 재비산 문제가 발생할 가능성이 있으므로 벤추리는 설치하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

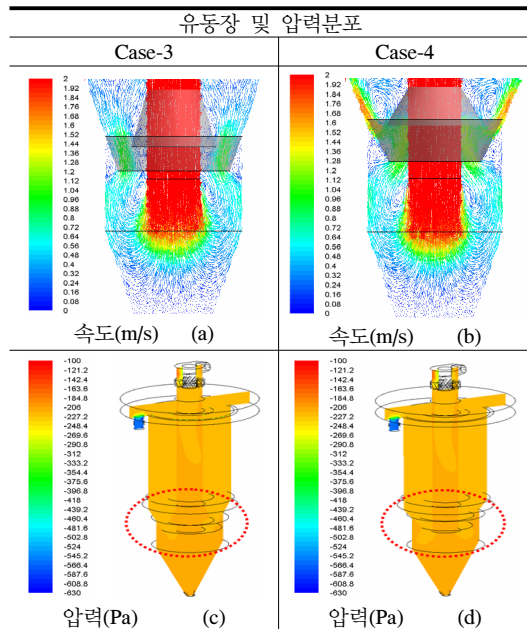
3.3 배플 효과

상승 기류의 방향 전환 각도를 좀 더 크게 유지시키기 위한 의도로 배플 제원을 변경한 결과를 case-3과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이, case-3 및 case-4의 배플 통과 유속은 각각 약 1 m/s 전후 및 1.5 m/s 이상으로 예측되었다. 배플 간격을 좁히고 상승 기류의 방향 전환 각도를 좀 더 크게 한 결과, 배플 주변의 통과 유속이 증가되고 또한 곡률반경이 커져 조대입자의 충돌효과는 더 클 것으로 판단된다. 단, 배플 통과 유속이 증가하고 기류의 회전 반경이 커짐에 따라 배플 주변의 정압이 상승할 가능성이 있으나 Fig. 7(c) 및 Fig. 7(d)와 같이 배플 간격을 좁혀도 차압 상승 등의 변화는 거의 없을 것으로 판단된다.



[Fig. 6] Velocity distribution and flow patterns of hybrid collector when venturi is not installed

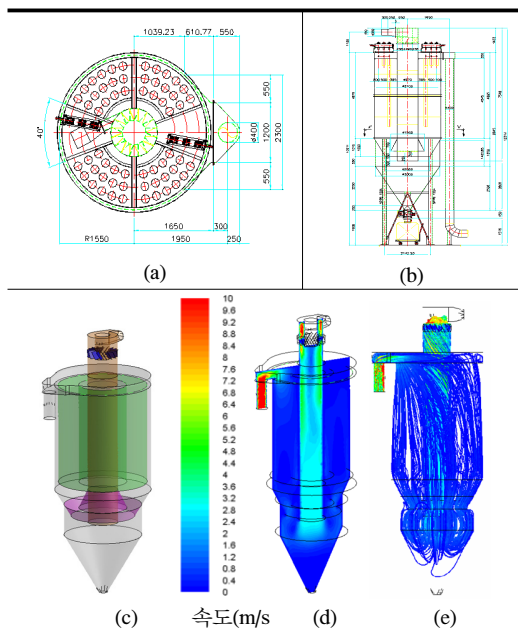
배플 간격이 너무 좁을 경우 배플의 통과 유속이 크게 증가하면서 탈리 분진과의 간섭이 발생할 수 있고 또한 배플 상부에서 경계층 분리 현상에 의해 일부 와류가 형성되므로 배플 간격은 기본 설계안대로 유지하는 것이 바람직하다.



[Fig. 7] Flow patterns and pressure distribution of hybrid collector when baffle shape was modified

3.4 최종 설계안

Fig. 8는 본 연구에서 수행한 전산해석 결과(case-1 ~ case-4)를 반영하여 최종적으로 제안한 설계안을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 (a)는 설계도면의 top view, (b)는 front view를 나타낸 것이다. 본 연구 결과를 바탕으로 유입구는 접선 유입식으로 설계하고 가이드 베인을 추가로 설치하였으며, 벤츄리는 설치하지 않았다. 또한, 배플의 제원은 기본 설계안을 유지하는 것으로 결론지었다. 이에 최종 설계안을 검토한 결과, Fig. 8의 예측 결과에서 볼 수 있듯이 출구 플레넘의 덕트 위치에 의해 기류가 덕트 부근으로 집중되며 여과 기류가 다소 편차가 발생하고 있으나, 이미 여과 기류가 대부분 균일한 분포로 백필터를 통과한 후, 플레넘 부근에서 편차가 발생한다는 점에서 크게 문제되지는 않을 것으로 판단된다. 현재 최종설계안을 바탕으로 시작품을 제작하여 실제 산업현장에서 테스트를 수행중에 있으며 테스트 결과와 전산해석 결과를 비교 검토하고 있어 향후 그 결과를 분석하면 전산해석의 유용성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다.



[Fig. 8] Velocity distribution, flow patterns, and final design of hybrid collector

4. 결론

멀티 집진기의 처리가스 제어 효율을 극대화시킬 수 있는 기류 흐름을 얻기 위한 최적화 설계 조건을 수치 해

석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 멀티 집진기의 입구를 접선 유입식으로 설계하고 가이드 베인을 추가로 설치하면 사이클론부에서 강한 선회류가 형성되어 초대입자의 유선 이탈을 촉진시키는 데 매우 효과적일 것으로 예측되었다.
2. 사이클론부 하단을 벤츄리 형상으로 설계할 경우, 처리가스가 가속되어 호퍼 하단까지 강한 하향 흐름을 형성하므로 분진의 재비산 가능성이 예측되었다.
3. 벤츄리없이 설계한다면 처리가스가 호퍼 하단으로 는 크게 영향을 미치지 않는 것이므로 벤츄리는 설치하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
4. 최종 설계안에 대한 집진기에서 출구 덕트로의 기류 쏠림 현상은 존재하나 이미 여과 기류가 대부분 균일한 분포로 백필터를 통과한 후 플레넘 부근에서 편차가 발생하므로 조업에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.
5. 본 연구의 멀티 집진기는 백필터 단일 운전시보다 차압 상승속도가 느리므로 탈진에 필요한 압축공기 소모량(동력비)을 줄일 수 있고 또한 필터백의 교체 주기를 연장할 수 있어 조업 비용의 절감이 클 것으로 판단된다.

References

- [1] Sung-Gil Hong, Yu-Jin Jung, Ki-Woo Park, Moon-Heon Jeong, Ki-Hyuk Lim, Hye-Min Suh, Byung-Hyun Shon, "A study on the optimization design of pulse air jet system to improve bag-filter performance", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation, Vol. 13, No. 8, pp. 3792-3799, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.8.3792>
- [2] Jeong-Gook Jang, Jae-Keun Lee, and Hai-Soo Chun, "Minimization of dioxins in municipal waste incineration processes", J. Korean Solid Waste Engineering Society, Vol. 11, No. 4, pp. 630-644, 1994.
- [3] Young-Ok Park, Jae-Ek Son, "Emission control technology in waste incineration(II)-Removal of toxic substances-" J. Korean Solid Waste Engineering Society, Vol. 11, No. 3, pp. 475-487, 1994.
- [4] Sung-Gil Hong, Yu-Jin Jung, Ki-Woo Park, Moon-Heon Jeong, Ki-Hyuk Lim, Hye-Min Suh and Byung-Hyun Shon, "A study on the optimization design of pulse air jet system to improve bag-filter performance", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 8, pp. 3792-3799, 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.8.3792>

- [5] Hyun-Guk Myung, Computational Fluid Dynamics for Engineering, Han Mi publishing company, pp. 124-138, 1997.
- [6] Patankar SV, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- [7] Byung-Rok Shin, Computational Fluid Dynamics, Dae Young publishing company, pp. 264-277, 1997.

홍 성 길(Sung-Gil Hong) [정회원]



- 1987년 8월 : 영남대학교 기계공학(공학석사)
- 2001년 12월 ~ 현재 : (주)씨이테크 대표이사

<관심분야>
대기오염제어기술, 열분해, 대기오염모델링

정 유 진(Yu-Jin Jung) [정회원]



- 2000년 2월 : 창원대학교 환경공학(공학사)
- 2002년 2월 : 창원대학교 환경공학(공학석사)
- 2002년 9월 ~ 2010년 3월 : 크린에어테크놀로지(주)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 씨이테크(주) 컨설팅 수석연구원

<관심분야>
산업환기기술, 대기오염제어기술, 대기오염모델링

임 기 혁(Ki-Hyuk Lim) [준회원]



- 2011년 2월 : 한서대학교 환경공학과 (공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 환경공학과 석사 과정

<관심분야>
유해가스처리, 산업폐기물처리

유 정 근(Jeong-Gunn Yoo) [정회원]



- 1987년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1991년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 정교수

<관심분야>
자원회수, 무기공업화학

손 병 현(Byung-Hyun Shon) [정회원]



- 1990년 2월 : 부산대학교 환경공학과(공학사)
- 1994년 2월 : 부산대학교 환경공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 부산대학교 환경공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 환경공학과 정교수

<관심분야>
대기오염제어(탈황 및 탈질), 폐기물처리, 이산화탄소 흡수