

## 연마장비용 사이클론 집진기의 유동해석

# Flow Characteristic of Cyclone Dust Separator for Marine Sweeping Machine

박민재\* · 진태석\*\*†

MinJae Park, and Taeseok Jin†

동서대학교 메카트로닉스공학과

† Dept. of Mechatronics Engineering, Dongseo University

### 요 약

본 연구는 선박의 외벽 유지보수를 위한 외벽 연마장비에 장착되는 먼지 집진장치에 적용하기 위한 사이클론 집진방식의 연마기 제작을 위한 사이클론 분리기 설계를 위하여 최적의 설계조건을 도출하고자 유동해석 기법을 적용한 사이클론 연마장비의 집진장치를 소개하고자 한다. 제작된 연마장비의 집진을 위한 접선유입 사이클론의 압력 강하와 입자 수집 능력은 기 연구된 수학적 모델을 적용하여 계산하였다. 종래 공기필터를 가진 사이클론의 계산 결과의 비교는 접선 유입 사이클론이 저압 드롭과 높은 입자 수집능률을 시뮬레이션을 통한 검증과 시작품을 제시하였다.

사이클론은 원통형 장치 내에 분진을 함유하는 기체를 장치내벽에 접선방향으로 유입시켜 유입분진에 선회운동을 부여함으로써 분진입자에 작용하는 원심력에 의하여 가스중의 입자를 분리 포집하는 집진장치로써 연마장비의 집진장치로 응용하고자 본 연구를 진행하여 진행중인 메커니즘과 유체흐름에 대한 기본적인 유체흐름에 따른 사이클론의 규격 파라미터에 따른 유동해석 결과를 제시하였다.

**키워드** : 연마기, 사이클론, 집진장치, 유동해석, 유체흐름

### Abstract

This paper describes the development of new sweeping machine based on Cyclone Technology, which maintains constant suction power and uses it in a industrial applications as a method for dust removed from grinding work. The performance of a cyclone separator is determined by the turbulence characteristics and particle-particle interaction.

To achieve this goal, we design cyclone technology based dust separator for sweeping machine has been proposed as a system which is suitable to work utilizing dust suction alternative to conventional manual system. and Numerical analysis with computational fluid dynamics(CFD) was carried out to investigate the working fluid that flow into cyclone dust separator in order to design optimal structure of the sweeping machine. The validation of cyclone model with CFD is carried out by comparing with experimental results.

**Key Words** : Sweeping machine, Cyclone, Separator, CFD, Air flow.

## 1. 서 론

사이클론 분리기는 가스, 액체, 고체를 분리하기 위한 방법으로 널리 사용되는 방식이다. 특히, 큰 알갱이 고체도 분리할 수 있는 정도로 널리 응용되고 있으며 선박의 외벽 탈

피 작업에 따른 분진(5 $\mu$ m 정도의 먼지 알갱이)을 집진하는데 가장 유용하게 집진할 수 있을 것으로 판단되어 본 연구를 진행하게 되었다[1][2].

국내 조선 산업의 발전과 더불어 조선 유지 보수를 위한 산업도 활발히 발전하고 있는 추세이다. 특히, 조선, 자동차, 항공, 건설 분야에서도 금속 표면에 도장작업 등을 효과적으로 행할 수 있도록 하기 위해서는 도장작업에 앞서 금속 표면에 부착된 이물질 제거하거나 용접 부위를 매끈하게 다듬거나 부식 부위를 제거하는 표면 연마작업이 선행 되어야 한다[1].

조선 선박의 표면 연마작업을 수행할 때 금속 표면으로부터 탈피되는 각종 이물질과 분진을 압축공기 구동 사이클론 집진장치로 즉시 집진하고, 기존 200kg급의 대형장비의 장시간 운용에 따른 불편함을 해소하기 위해 20kg급의 이동성과 효율성을 동시에 갖춘 압축공기를 적용한 연마 장비를 설계하는데 있다. 압축공기량을 밸브 등으로 간단히 조

접수일자: 2014년 3월 9일

심사(수정)일자: 2014년 4월 1일

게재확정일자 : 2014년 7월 31일

† Corresponding author

본 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 일부 수행된 기초연구결과임(No. 2010-0021054).

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

작하여 연마디스크의 속도조절이 가능함과 동시에 압축공기 구동만으로 집진 및 연마를 동시에 작업가능토록 경량화 장비를 설계하도록 하였다.

## 2. 사이클론 집진 연마기

### 2.1 구조 및 동작원리

본 연구에서 개발된 사이클론 집진방식을 채용한 연마기는 조선 선박의 표면 연마작업을 수행할 때 금속 표면으로부터 탈피되는 각종 이물질과 분진을 압축공기 구동 사이클론 집진장치로 즉시 집진하고, 기존 200kg급의 대형장비의 장시간 운용에 따른 불편함을 해소하기 위해 20kg급의 이동성과 효율성을 동시에 갖춘 다이아몬드 연마디스크 장착이 가능한 압축공기 구동 연마 방식의 연마 장비이다.

사이클론 집진 연마기는 압축공기량을 밸브 등으로 간단히 조작하여 연마디스크의 속도조절이 가능함과 동시에 압축공기 구동만으로 집진 및 연마를 동시에 작업가능토록 경량화 및 저진력을 목적으로 설계 및 제작되었다.

본 연마기에 채용된 사이클론 집진기는 유입분진의 유입 방식이나 운전방식에 따라서 몇 가지 형식으로 구분할 수 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 사이클론은 접선유입식 사이클론인데, 그림 1에 각 부의 명칭과 함께 대략적 구조를 나타내었다 [2][3].

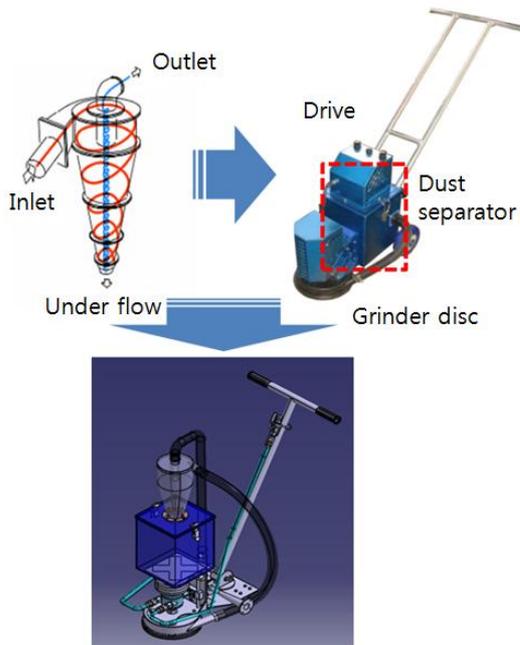


그림 1. 사이클론 집진 연마기 메커니즘  
Fig. 1. Mechanism of cyclone sweeping machine

사이클론의 작동원리는 일반적으로 다음과 같은 순서로 진행된다.

①유입분진은 유속 15~20m/s로 사이클론 유입구로 들어와서 원추형 원통내부를 나선형으로 회전하면서 하강한다. 이 흐름을 하향 선회류 혹은 외부 선회류라고 하며 그림 2에서 사이클론 내부의 실선 부분이다. 이 하향 선회류의 회전수는 벽적에 침강한 분진입자로 형성되는 회전수로서, 투명한 장치에서는 쉽게 관찰할 수가 있다. 그 값은 대략

0.3~10이고, 대부분의 사이클론에서 그 평균 회전수는 5정도라고 알려져 있다. 회전수는 유입유속이 빠를수록 증가하게 된다.

②유입분진은 장치 내에서 난류확산 형태의 완전혼합이 일어나고, 입자들은 중앙으로부터 벽 쪽으로 이동한다. 이렇게 이동하는 동안에 입자들끼리 충돌이 일어날 기회가 많으므로 입자농도가 높을수록 충돌로 인한 입자의 응집이 일어날 수 있고, 더 큰 입자가 되어 벽 쪽으로 쉽게 이동된다. 입자 중에 일부는 내벽에 도착하자마자 다시 가스중에 튀어 오르는 재비산현상이 일어날 수가 있다. 벽에 부딪되어 포집된 입자들은 내벽면을 따라서 바닥 쪽으로 미끄러져 내려온다. 벽면에 붙어서 흘러내리는 입자들은 장치내부에서 상승하는 2차 가스흐름 때문에 사막의 폭풍에 의한 모래둔덕처럼 움직이는 규칙적인 나선형 무늬를 형성하게 된다.

이 나선형 둔덕을 형성한 입자들은 아래쪽으로 계속 움직여서 먼지포집용 호퍼에 들어가서 집진된다. 유입분진 중에 있던 작은 입자들이나 모래둔덕을 이루었던 입자들 중의 일부는 사이클론 내부에 형성되는 반대방향의 가스흐름(상향 선회류)의 영향을 받아서 다시 비산된 후에 사이클론의 중앙부에 재순환된다. 유입분진의 공급속도가 커지면 포집된 입자가 재도약(saltation)하여 재비산되는 분진의 양이 많아진다.

③집진이 진행되는 동안 사이클론의 원추형 원통의 중앙 부분은 음압(陰壓)으로 유지되기 때문에 새로운 상승기류가 형성되며, 이 기류는 중앙상부로 계속 이동하여 선회류 약화기(vortex finder)를 지나 가스 출구관을 빠져나감으로써 하부로 내려가는 먼지와 분리된다. 이때 포집될 정도로 충분한 원심력을 가지지 못하는 작은 입자들은 기체와 함께 사이클론의 중앙 윗부분으로 운반되어서 배기관 즉, 선회류 약화기를 통과하여 바깥으로 배출된다.

### 2.2 집진성능

사이클론의 성능은 사이클론의 종류별로 차이가 있고 유입가스의 유량과 특성, 유입가스 중 먼지의 특성과 부하 등에 따라서도 차이가 있다. 사이클론의 성능을 집진효율과 압력손실로 나누어서 소개하도록 한다.

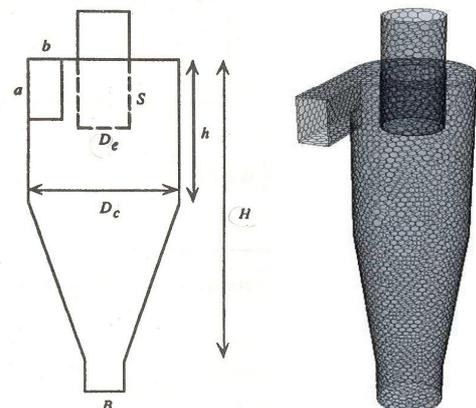


그림 2. 사이클론의 외형 및 규격  
Fig. 2. Typical cyclone shape and structure

사이클론 집진기의 부분집진효율을 결정하는 데는 몇 가지 해석모델이 연구되어 있는데, 가장 많이 적용되고 있는

Lapple의 연구결과를 인용하였다. Lapple의 해석모델은 사이클론에 유입되는 분진입자의 입도와 함진가스의 유체역학적 특성과 장치의 물리적 구조에서 결정되는 장치제원 등의 세 가지 변수를 사이클론 성능의 변수로 사용하여 부분 집진효율을 유도하는 방법이다[4][5][6].

우선, Lapple 해석모델을 적용하기 위한 가정으로는 다음과 같다. ① 집진기의 집진효율은 분진 입경별로 다르다. ② 집진기의 집진효율과 입경과의 관계를 선도(線圖)화하고 집진기의 집진효율을 예측할 수 있는 방법을 적용하였다.

유입분진이 사이클론에 유입되면 기류가 하향 선회류의 회전수  $N_e$ (유회회전수라고 한다)만큼 회전한 후에 상향 선회류로 바뀌어서 사이클론의 위쪽 중심부에 있는 선회류 약화기(배출구)를 통과하여 장치 밖으로 배출된다. 실험적 관찰에 의하여 하향 선회류 회전수  $N_e$ 를 결정하는 근사적 방법으로 다음 식이 많이 사용된다.

$$N_e = \frac{1}{a} \left\{ h + \left( \frac{H}{2} - \frac{h}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

$h$ : 사이클론의 위쪽 원통부분의 길이  
 $H-h$ : 아래쪽 원추부분의 길이  
 $a$ : 사이클론의 사각형 유입구의 높이

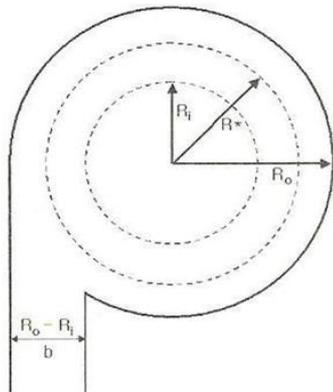


그림 3. 사이클론의 내부 구간  
 Fig. 3. Schematic diagram of the cyclone

다음 단계로서, 먼지입자는 장치의 가스유입구의 전체 단면에서 균일하게 분산되어 있다고 가정할 필요가 있다. 분진 입자들 중에서 입도  $d_p$ 인 입자가 100% 집진되기 위해서는 사이클론 내부반지름  $R_i = D_c/2 - b$ 와  $R_o = D_c/2$  사이에 들어간 입도가  $d_p$ 인 모든 입자는 기류의 나선회전이  $N_e$  회전에 이르기 전에 원심력에 의하여 사이클론 벽면에 도달하여야 한다. 즉, 반경  $R_i$ 와  $R_o$  사이에 들어오는 입도  $d_p$ 의 모든 입자는 100% 완전히 집진되어야하겠지만,  $N_e$  회 회전하는 동안 완전히 집진되지 않는 입도  $d_p$ 인 입자도 있을 것이다. 그러나 더 좁은 구간  $R_o - R_i^*$  사이에 있는 입자들은 반드시 집진된다( $R_i^*$ 는 입도  $d_p$ 의 입자가  $N_e$ 만큼 회전하는 동안에 외벽에 도착하게 되는 최소반경)<그림 3>.

이때, 입자가 외부와류영역에 머물러 있는 시간  $\Delta t$ 과 입자의 반경속도  $V_n$ 는 다음과 같이 표현가능하다[6][7].

$$\Delta t = \frac{N_e \text{에 대한 입자의 이동거리}}{\text{공기 유입속도}} \quad (2)$$

$$= \frac{2\pi \cdot R \cdot N_e}{V_t}$$

입자의 반경방향 속도는 반경방향에서 작용하는 원심력과 유체 저항력을 등식으로 놓으면 계산할 수가 있다. 다만 이때 입자에 작용하는 중력효과는 편의상(3차원해석을 피하기 위하여)무시한다. 이러한 관계를 유도하는 방법으로는 입자가 충분히 작고 구형이며 층류흐름인 Stokes 흐름을 유지하면서 운동한다고 가정한다면, 다음 식(1-3)이 성립한다. 즉, 입자에 작용하는 원심력과 입자에 작용하는 저항력이 힘의 평형을 유지하게 된다.

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

$$V_n = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_t^2}{18\mu \cdot R} \quad (4)$$

$\rho_p$ =입자의 밀도,  $kg/m^3$   
 $\mu$ =가스의 점도,  $kg/m^{-s}$

따라서,  $d_p$  입자의 부분집진효율  $\eta_d$ 는 일반적으로 다음과 같이 표현될 수가 있다.

$$\eta_d = \frac{R_o - R^*}{R_o - R_i} = \frac{V_n \cdot \Delta t}{W} \quad (5)$$

$$= \frac{V_n \cdot 2\pi \cdot R \cdot N_e}{W \cdot V_t} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot V_t^2 (2\pi \cdot R \cdot N_e)}{18\mu \cdot R \cdot W \cdot V_t}$$

$R_o - R_i$  = 유입구의 폭( $W$ )

이 식을 유도하는 과정에서 여러 가지 물리적 상황을 가정하였기 때문에, 식 (5)에는 결점이 내포되어 있다. 그 중 가장 중요한 결점은 장치의 기하학적 모양과 기체 흐름이 일정할 때  $\eta_d$ 는  $d_p^2$ 에 비례하여 변동되며,  $d_p$  값보다 더 큰 입자들은 모두 집진되므로 부분집진효율이 이론상 항상 100%가 된다. 그러나 실험적 결과에 의하면  $\eta_d$ 는  $d_p$ 가 증가하면 지수 함수적으로 증가함이 밝혀졌다. 즉, 부분분리효율  $\eta_d$ 를  $d_p$ 의 넓은 범위에 걸쳐서 plot하면 예리한 분리가 일어나지 않는다. 다른 말로 표현하면, 만들어진 부분분리효율 곡선의 기울기가 수직이 아니고 완만한 경사를 가진다. (원하는 입도 dpc에서 분리가 완벽하게 일어나는 경우에는 곡선이 수직선이 되는 이론적 분리절단이 일어난다.) 이러한 결과는 사이클론 내에서는 Stokes 흐름 대신에 실제로는 난류가 형성되고, 벽면에서는 얇은 층류가 형성됨으로서 난류의 감소현상이 있다고 하더라도 대부분의 난류영향은 장치의 내부에서 남아 있게 되므로 이론적인 집진효율과 실험적으로 결정되는 집진효율은 일치할 수가 없게 된다 [8][9].

### 3. 사이클론 유동해석

#### 3.1 해석환경설정

2.2절에서 소개한 Lapple 해석에 기반 한 집진효율을 근거로 CFD를 활용하여 최적설계를 위한 해석을 수행하였다.

우선, 사이클론 내부의 비압축성 유체는 3 차원 난류 유동을 구성하는 보존형 방정식으로서 연속 및 레이놀즈-평균 Navier-Stokes(RANS) 방정식으로 구성된다. 작동유체는 표준상태의 공기로 가정하였고, RANS 방정식의 Reynolds-응력항으로 인한 닫힘 문제를 해결하기 위해 난류 모델링을 적용하였다. 또한, 소용돌이가 유동이 발생하는 복잡한 난류유동현상을 예측하기 위해  $k-\epsilon$  모델, 대수응력 모델(ASM), 그리고 Reynolds-응력모델(RSM, Reynolds stress model)등이 일반적으로 적용되고 있다. 본 논문에서는 등방성 난류라는 가정과 Reynolds-응력항에 대한 미분형 수송방정식의 해를 구하는데 적용한 RSM을 이용하여 소용돌이가 발생하는 사이클론 내부의 난류 유동특성을 파악하였다[7][10].

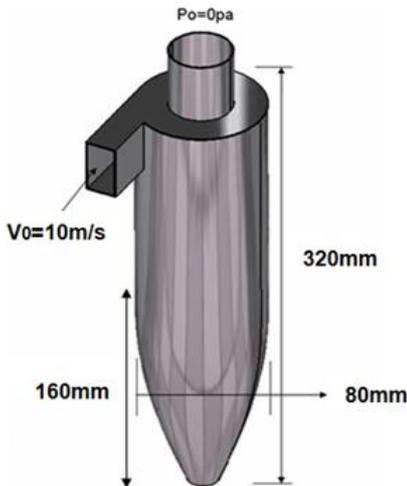


그림 4. 테스트용 사이클론의 규격

Fig. 4. Symbols of the cyclone geometrical dimensions

실험적 표준 모델 형상으로 설정하여 압력을 측정할 위하여 사이클론 height( $H$ )의 변수는 각각 320, 400, 480mm로 설정하였고, 집진효율에 대한 실험 사이클론의 형상의 밑부분 뿔립 상태로 두어 테스트를 실시하였다. ① 처음 형상에 대해 몸통부 길이의 변화  $H$ 의 변화 (몸통 320mm 생성)에 따른 성능, ② 입자의 직경을 변수하는 분진입자의 크기 수를 설정하여 각각 테스트를 실시하였다.

효율증대를 위한 사이클론의 외부 디자인은 다음과 같이 표준 사이클론의 크기의 길이 비율에 따라 그림 4와 같이 적용하였다.

집진효율 분석을 위한 시뮬레이션 툴로서는 CATIA5로 모델의 형상을 제작하고 CFD를 위한 툴로서는 그림 5와 같은 Fluent 5.3으로 적용하였다. 그리고 사이클론의 공기 유입구의 초기속도 10m/s 로 설정하였고 분진의 크기는 각각 10, 50, 100 $\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 3종류의 원통 길이에 대해서 각각의 분진을 투입시켜 유동특성을 관찰 할 수 있도록 수행하였다.

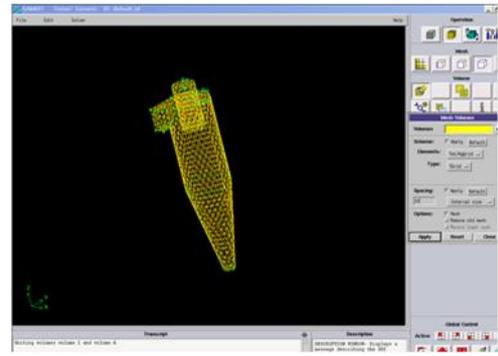
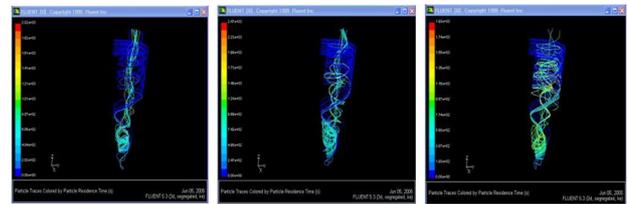


그림 5. Fluent 해석툴에 의한 분석환경

Fig. 5. Analysis environment of the Fluent software tool

#### 3.2 유체흐름 시뮬레이션

첫 시뮬레이션에서는 사이클론 몸통의 길이(320mm)에 대한 실험을 수행하였다. 그림 6의 결과에서 위의 그림은 입자의 직경이 10, 50, 100 $\mu\text{m}$  일 때의 분진의 해석모습이다. 10 $\mu\text{m}$ 의 경우 대체로 위쪽으로 분진이 유체와 함께 위쪽으로 빠져나가는 현상을 볼 수가 있다. 반면, 100 $\mu\text{m}$ 인 분진의 직경이 커짐에 의해 거의 포집 되는 것을 볼 수 있다.

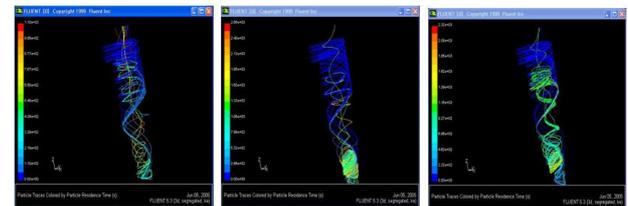


(a)10 $\mu\text{m}$  (b)50 $\mu\text{m}$  (c)100 $\mu\text{m}$

그림 6.  $H = 320\text{mm}$ 에 대한 CFD결과

Fig. 6. Streamline of each particles(10, 50, 100 $\mu\text{m}$ ) with  $H=320\text{mm}$

두 번째 시뮬레이션은 사이클론 몸통의 길이(400mm)에 대한 실험을 수행하였다. 입자의 직경을 변화를 주었을 때, ash의 유동 경로를 보여주고 있다. 입자가 작은 경우 거의 위쪽으로 ash가 유체와 함께 밖으로 빠져나가는 현상을 볼 수가 있다. 분진이 점점 커질수록 유체와 함께 빠져나가는 것 보다는 집진 되는 것이 더 많은 것을 그림으로도 확인이 가능하였다.

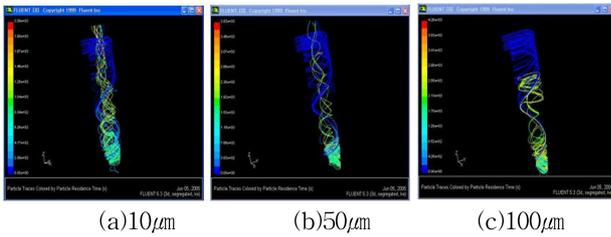


(a)10 $\mu\text{m}$  (b)50 $\mu\text{m}$  (c)100 $\mu\text{m}$

그림 7.  $H = 400\text{mm}$ 에 대한 CFD결과

Fig. 7. Streamline of each particles(10, 50, 100 $\mu\text{m}$ ) with  $H=400\text{mm}$

세 번째 시뮬레이션은 사이클론 몸통의 길이(480mm)에 대한 실험을 수행하였다.



(a)10µm (b)50µm (c)100µm

그림 8. H = 480mm에 대한 CFD결과

Fig. 8. Streamline of each particles(10, 50, 100µm) with H=480mm

위의 그림은 입자의 직경이 10µm, 50µm, 100µm 일 때의 분진의 유동모습이다. 그림 8(a)의 경우 대체로 위쪽으로 분진이 유체와 함께 위쪽으로 빠져나가는 현상을 볼 수가 있다. 그리고 그림 8(c)의 경우 분진이 원심력에 의해 빠지는 것이 거의 없는 것을 볼 수 있다.

몸통길이, 입자경의 변화에 의한 집진수의 관계를 표 1과 같이 정리할 수 있는데, 몸통의 길이는 원통부와 원추부의 길이를 1 : 1의 비율로 했을 때, 몸통의 길이가 길면 작은 것 보다 더 많이 집진되는 것을 볼 수 있으며, 또한 입자경이 클수록 집진의 효율이 좋은 것을 알 수 있다.

표 1. 몸통길이, 입자경에 따른 집진수 관계

Table 1. Escaped and trapped number for the particle diameters(The flow rate is 10/sec.)

입자경 \ 원통 길이	320mm		400mm		480mm	
	Escaped	trapped	escaped	trapped	escaped	Trapped
10 µm	40	8	38	10	35	13
50µm	16	32	9	39	7	41
100µm	10	38	5	43	1	47

아래 그림 9와 그림 10은 Cyclone diameter (D)=1.0D(290mm)에 대한 기본적인 압력변화와 위치에 따른 접선속도변화를 각각 표시하였다. 본 수학적 계산결과를 통하여 사이클론 집진기로서의 유입속도에 따른 압력값 상승과 사이클론 외경 위치에 따른 접선유입속도가 각각 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 결과를 통하여 보다 최적화된 사이클론 설계를 할 수 있을 것으로 판단한다.

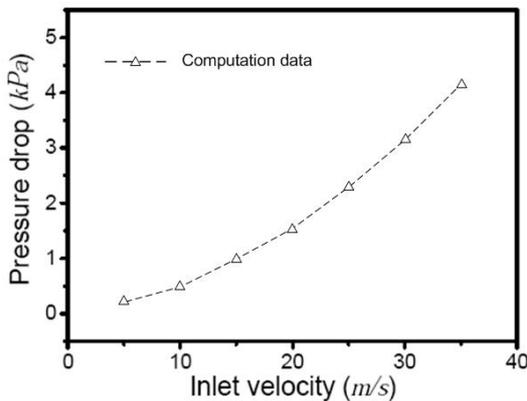


그림 9. 유입속도에 따른 압력변화

Fig. 9. Pressure drop of modified models for various inlet velocity

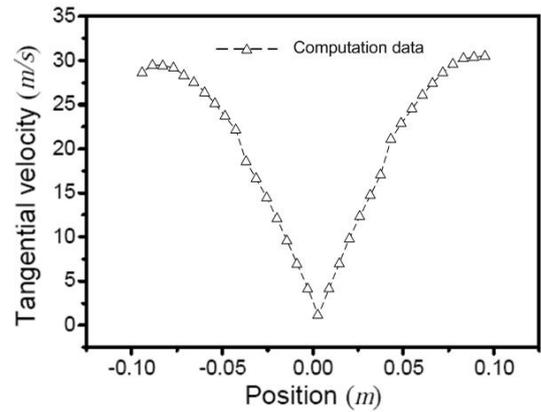


그림 10 위치에 따른 접선유입속도변화

Fig. 10. Tangential velocity at y=-0.1m for inlet velocity, 10m/s

본 연구에서 개발된 사이클론 연마기의 집진효율 성능시험에 있어서 다음과 같은 성능결과를 얻을 수 있었다.

- 분진의 농도 증가 - 압력손실 감소, 집진효율 증가
- 몸체길이 증가 - 압력손실 다소 감소, 효율 증가
- 원추길이 증가 - 압력손실 감소, 효율 증가
- 입자경, 입자밀도 증가 - 효율 증가

집진효율의 측정에 있어 변수 중에 입구의 유속은 효율에는 영향을 많이 끼치지 않는 것으로 가정하여 대표유속으로 정하였으며 입자의 직경이 효율에 영향을 많이 끼치는 듯하였고, 형상의 길이가 압력손실에 영향을 끼치는 것으로 보였다.

실험을 통한 고찰로서는 연마기의 집진효율이 증가한다는 것은 같은 유량에서 크기가 너무 커지거나 압력손실이 커진다는 것을 뜻 할 수도 있다는 것을 알 수가 있었지만, 소형이라든가 대형일 경우에도 비슷한 경우가 나타날 것으로 보이지만, 크기를 한정적으로 하였기 때문에 예측만 하였다.

해석을 함에 있어 이론상으로는 비슷한 현상을 발견하였으나, 프로그램이 해석과정 중 약간의 에러로 인해 정확한 수치의 값을 구하지는 못하였다.

실험에 적용된 원심력 집진기로는 미세입자는 집진 하는 것이 불가능 하고 다소 직경이 큰 입자를 걸러 낼 수가 있었다. 뿐만 아니라 분진(ash)을 통해서만 효율을 측정 하였는데, 프로그램에 대한 어려움으로 이론적인 수식결과와의 비교해 보기는 어려웠지만 다른 입자에 따라 효율이 변화됨이 예상 된다.

#### 4. 결론

본 논문은 사이클론 집진기의 부분집진효율을 결정하는 수학적 해석모델을 제시하여 집진성능을 시뮬레이션을 통해 집진기로서의 기본적인 기능에 부합하는 성능 결과를 제시하였다. 결과를 통해 사이클론 집진기로서의 유입속도에 따른 압력값 상승과 사이클론 외경 위치에 따른 접선속도가 각각 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 결과를 통하여 보다 최적화된 사이클론 설계를 할 수 있을 것으로 판단한다.

## References

- [1] Taeseok Jin, "Design of Driving Unit and Control for Robotic Vacuum Sweeping Machine" *Proceedings of 2012 Spring Conference, Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 249-252, 2012.
- [2] D. Leith, W. Licht, "The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors-A New Theoretical Approach," *American Institute of Chemical Engineers (AIChE) Symposium Series# 126*, vol. 68, 196-206, 1972.
- [3] H.S. Bryant, R.W. Silverman, F.A. Zenz, "How dust in gas affects cyclone pressure drop," *Hydrocarb. Process*, vol. 62, pp. 87-90, 1983.
- [4] A.J. Hoekstra, "Gas flow field and collection efficiency of cyclone separators," Ph.D. Thesis, Technical University Delft, 2000.
- [5] J.W. Lee, H.J. Yang, and D. Y. Lee, "Effect of cylinder shape of a long-coned cyclone on the stable flow-field establishment," *Powder Technology*, Vol.165, pp.30-38, 2006.
- [6] A. Raoufi, M. Shams, M. Farzaneh, and R. Ebrahimi, "Numerical simulation and optimization of fluid flow in a cyclone vortex finder," *Chemical Engineering and Processing*, vol.47, no.1, pp. 128-137, 2008.
- [7] K. Elsayed and C. Lacor, "The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance," *Applied Mathematical Modeling*, vol.35, pp. 1952-1968, 2011.
- [8] K.S. Lim, H.S. Kim, K.W. Lee, "Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes," *Journal of Aerosol Science*, vol. 35, no. 6, pp.743-754, 2004.
- [9] G. Wan, G. Sun, X. Xue, and M. Shi, "Solid concentration simulation of different size particles in a cyclone separator," *Powder Technology*, vol.183, pp.94-104, 2008.
- [10] R.B. Xiang, K.W. Lee, "Numerical study of flow field in cyclones of different height," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol.44, pp.877-883, 2005.

## 저 자 소 개



### 진태석(Taeseok Jin)

1998년 : 진주산업대학교 전자공학과 공학사  
 2000년 : 부산대학교 대학원 전자공학과 공학석사  
 2003년 : 부산대학교 대학원 전자공학과 공학박사  
 2006년~현재 : 동서대학교 메카트로닉스공학과 부교수

현재 : 한국지능시스템학회 회원이사

관심분야 : Sensor fusion, Mobile robot, Intelligent system

Phone : +82-51-320-1541

E-mail : jints@dongseo.ac.kr



### 박민재(Minjae Park)

2008년 : 동서대학교 메카트로닉스공학과

관심분야 : Robot system

Phone : +82-51-320-1541

E-mail : gkdln1348@naver.com