

사이클론 내 유동특성 및 미세입자 집진효율에 대한 수치해석적 연구

용 정 권, 김 창 녕^{*†}, 조 영 민^{**}

경희대학교 기계공학과, ^{*}경희대학교 테크노공학대학, ^{*}경희대학교 산학협력기술연구원,

^{**}경희대학교 환경응용화학대학

A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency for Fine Particles in a Cyclone

Jung Kwon Yong, Chang Nyung Kim^{*†}, Young Min Jo^{**}

Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

^{}College of Advanced Technology, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea*

^{}Industrial Liaison Research Institute, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea*

*^{**}College of Environment and Applied Chemistry, Kyunghee University, Yongin 447-701, Korea*

(Received July 12, 2007; revision received January 18, 2008)

ABSTRACT: A numerical analysis has been carried out to examine the flow characteristics and the collection efficiency for fine particles in a cyclone using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The cyclone with the cylinder diameter of 60 mm has been considered for the investigation of the particle collection in a relatively smaller cyclone with somewhat higher inlet air velocities. Fundamental air flow patterns for different inlet velocities have been calculated and then the motions of particles of different sizes have been obtained. The calculated collection efficiencies for fine particles are compared with the experimental results, which shows a good agreement. The current result can be used for the design of cyclones with high collection efficiency.

Key words: Cyclone(원심력 집진장치), Numerical analysis(수치해석), Fine particle(미세입자), CFD(전산유체역학)

기 호 설 명

A : 면적 [m^2]
 C_D : 항력계수 [-]
 D : 직경 [m]
 D_H : 수력직경 [m]
 $D_{T\bar{y}}$: Turbulent diffusion [kg/ms^3]

F_{ij} : Production by system rotation [kg/ms^3]
 F_D : Momentum transport coefficient [1/s]
 F_x : Additional force like buoyancy, etc.
 I : 난류강도 [-]
 P : 둘레길이 [m]
 P_{ij} : Stress production [kg/ms^3]
 Re : Reynolds 수, $\frac{\rho u D}{\mu}$ [-]
 t : 시간 [s]
 u : 유체 속도 [m/s]
 x : 좌표축 [m]

[†] Corresponding author

Tel.: 031-201-2869; fax: 031-202-9715

E-mail address: cnkim@khu.ac.kr

그리스 문자

- δ : Kronecker delta [-]
- ϵ_{ij} : Dissipation [kg/ms^3]
- η : 집진효율 [-]
- Θ : 체적분율 [-]
- μ : 유체 점성계수 [kg/ms]
- ρ : 유체 밀도 [kg/m^3]
- Φ_{ij} : Pressure strain [kg/ms^3]

상첨자

- ' : 난류요동
- : 시간평균

하첨자

- in : 입구
- i, j, k : 각 방향의 좌표축
- p : 입자

1. 서론

원심력을 이용하여 입자를 분리, 포집하는 원심력 집진장치(cyclone)는 구조가 간단하고 설치원가 및 운전비가 저렴하기 때문에 다양한 산업 현장에서 폭넓게 사용되고 있다. 현재 사이클론은 보건 위생분야에서 호흡에 의해 인체에 흡입이 가능한 Sub-micron 크기의 입자를 집진하는 본체직경 10 mm 이하에서 부터, 각종 산업공정에서 배출되는 오염가스로 부터 입자상 물질을 집진하는 7~8m 크기의 사이클론까지 다양하게 적용되고 있다. 사이클론에서 밀도가 크거나 입자크기가 비교적 큰 입자의 집진은 그리 어려운 문제는 아니지만 미세 입자의 집진 효율을 높이기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.⁽¹⁾

사이클론은 간단한 구조에도 불구하고 유동패턴이 매우 복잡하여 이를 해석하려는 많은 이론적, 실험적, 수치적 연구가 진행되어 왔다. 지난 10여 년 동안, 사이클론에 대한 수치적 연구는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 기반으로 하는 수치해석 도구를 통해서 수행되어 왔지만 실험적 연구가 수치적 연구보다 훨씬 더 많았다. 또한 사이클론 내의 유동흐름을

회전대칭(rotational symmetry)으로 가정한 2차원 수치해석의 해는 적절하지 않은 결과를 제공한다. 최근, 사이클론 내의 가스-입자 흐름을 3차원으로 해석하는 수치적 연구가 활발히 진행되고 있다. 3차원 수치적 해의 정확성은 난류(turbulence) 모델에 크게 의존한다.⁽²⁾ 다양한 난류 형태의 특성을 해석하기 위하여 여러 가지의 난류 모델들이 적용될 수 있다. 사이클론에서는 강한 선회류가 나타나며 이때 Reynolds stress는 비등방성을 갖게 되므로 이러한 난류유동 특성을 정확하게 해석할 수 있는 난류모델이 사용되어야 한다.

사이클론의 내통직경(D_e)이 작을수록 미세한 입자의 집진효율이 증가한다.⁽¹⁾ 그러나 외통직경(D_c)이 100 mm이하인 사이클론에서 유체의 흐름과 입자 집진효율에 대한 연구가 미진하다. 따라서 본 연구에서는 외통직경이 60 mm이고 내통직경이 30

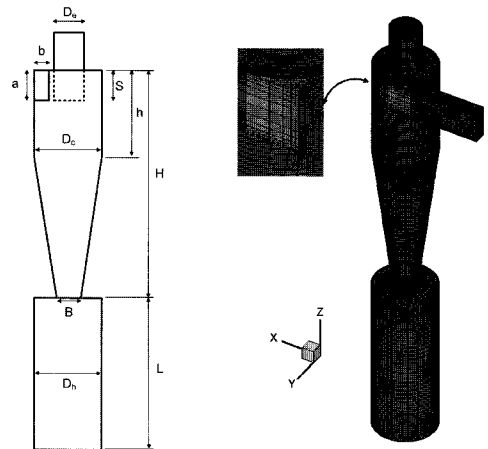


Fig. 1 Schematic and grid diagram of cyclone geometry.

Table 1 Geometry of the cyclone(unit : mm)

a	30
b	12
S	30
h	90
H	240
B	22.5
D_c	60
D_e	30
D_h	60
L	150

mm인 상대적으로 크기가 작은 사이클론에서, 많은 오염가스를 처리하도록 하기 위한 입구속도가 큰 경우에 대해 수치적 연구가 수행되었다. 본 연구를 통해 유체와 입자의 거동특성이 해석되었고, $10\ \mu\text{m}$ 이하 입자들의 집진효율이 계산되었다. 또, 본 수치해석과 같은 조건 하에서 실험적으로 수행되었던 다른 연구의 집진효율과 수치적으로 얻어진 집진효율이 비교되었다.

2. 문제설정

2.1 해석모델

사이클론 내에서의 유동해석을 위하여 구성된 사이클론의 형상과 격자시스템이 Fig. 1과 Table 1에 제시되었다. 입자를 포함하는 유체는 사이클론 상단에 위치한 입구를 통하여 사이클론으로 유입되며, 유입된 유체는 원통형의 내벽을 따라 회전 유동하며 하부로 내려간다. 이 과정에서 일부의 입자들은 유체와 함께 회전 유동하며 중력 효과에 의하여 하부로 내려가고 일부의 입자들은 유체와 함께 상부에 위치한 출구를 통하여 배출된다(Fig. 2).

수치계산을 위해 격자는 사이클론의 입구통로와 원통이 접하는 부분을 제외한 모든 영역에서 정렬격자가 사용되었다. 입구통로와 원통이 접하는 부분에서는 격자의 비틀림이 심하므로 wedge 격자가 사용되었다(Fig. 1).

수치적 해의 격자 의존성을 파악하기 위해서 격자수가 90,650개, 117,600개, 140,000개, 190,000개 일 때, 각각의 격자수에 따른 수치적 해를 비교하여 적절한 격자수가 결정되었으며 본 수치계산에 사용된 격자수는 140,000개이다.

2.2 해석방법

2.2.1 수학적 모델링 및 계산방법

유체의 유동에 대한 수치 계산은 3차원 정상상태로 가정하여 수행되었다. 유동장의 수치적 해를 얻기 위해 Reynolds Stress Model(RSM)이 사용되었다. RSM은 최근 연구에서 다른 난류모델보다 더 정확한 수치적 해를 얻을 수 있다고 제안되었다.⁽³⁻⁵⁾ 이는 사이클론 내에 유체의 유동에서 Reynolds stress들이 이방성을 갖기 때문에 ed-

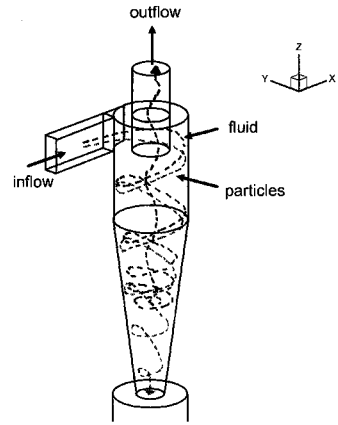


Fig. 2 Flow patterns in the cyclone.

dy viscosity가 이방성이라고 가정하여 난류 유동의 해를 풀기 때문이다. 유체와 입자의 운동량 교환에 의한 입자의 거동을 해석하기 위해서 입자운동방정식(Lagrangian 기법)을 고려하여 해석을 수행하였다.

연속방정식, 운동량 방정식과 RSM 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u_i u_j}) = \quad (3)$$

$$D_{Tij} + P_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Phi_{ij} + F_{ij}$$

여기서,

$$D_{Tij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{\rho u_i u_j u_k} + p(\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j) \right] \quad (4)$$

$$P_{ij} = -\rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}} \quad (6)$$

$$\Phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$F_{ij} = -2\rho\Omega_k \overline{(u_j u_m \varepsilon_{ikm} + u_j u_m \varepsilon_{jkm})} \quad (8)$$

사이클론 내 입자의 거동을 해석하는 입자운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + (g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p) + F_x \quad (9)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (10)$$

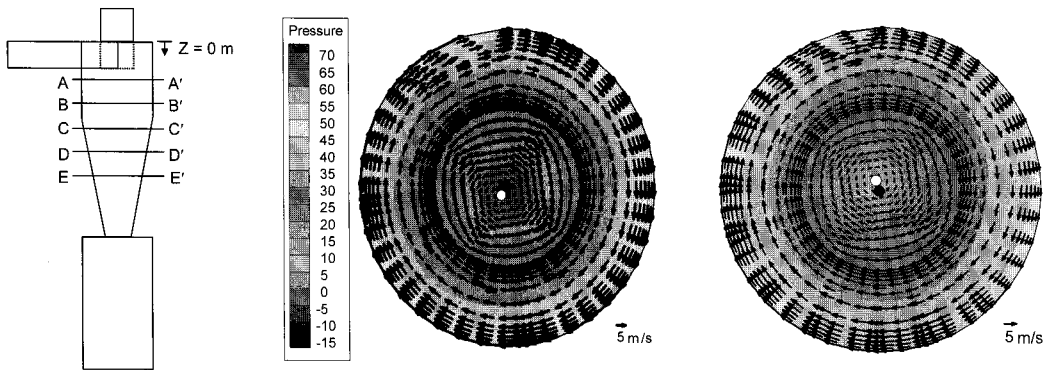
여기서, Re 는

Table 2 Analysis conditions

inlet	velocities	$u_{in} = 9.26 \text{ m/s}, 18.52 \text{ m/s}$
	area	$A_{in} = 3.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
	perimeter	$P = 0.084 \text{ m}$
	hydraulic diameter	$D_H = 0.0171 \text{ m}$
	turbulence intensity	$I = 0.05 \text{ (5\%)}$
	Reynolds numbers	$Re_D = 10870, 21740$
outlet	pressure condition	gauge pressure = 0
wall	fluid	no-slip condition
	particle	reflect

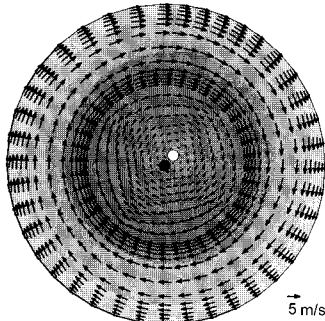
$$Re \equiv \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \quad (11)$$

연속방정식과 운동량방정식을 결합시켜 압력-속도해를 구하는 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)이 수치계산을 위

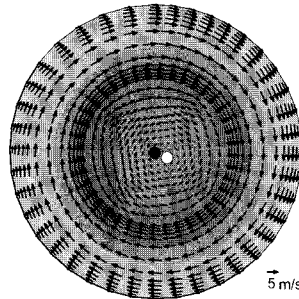


(a) lines for denoting cross-sections (b) on the surface A-A'

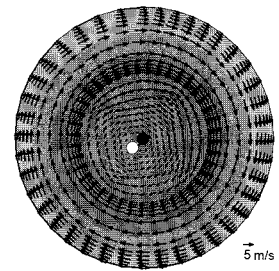
(c) on the surface B-B'



(d) on the surface C-C'



(e) on the surface D-D'



(f) on the surface E-E'

Fig. 3 Static pressure contours and radial-tangential velocity vectors for the inlet velocity 9.26 m/s.

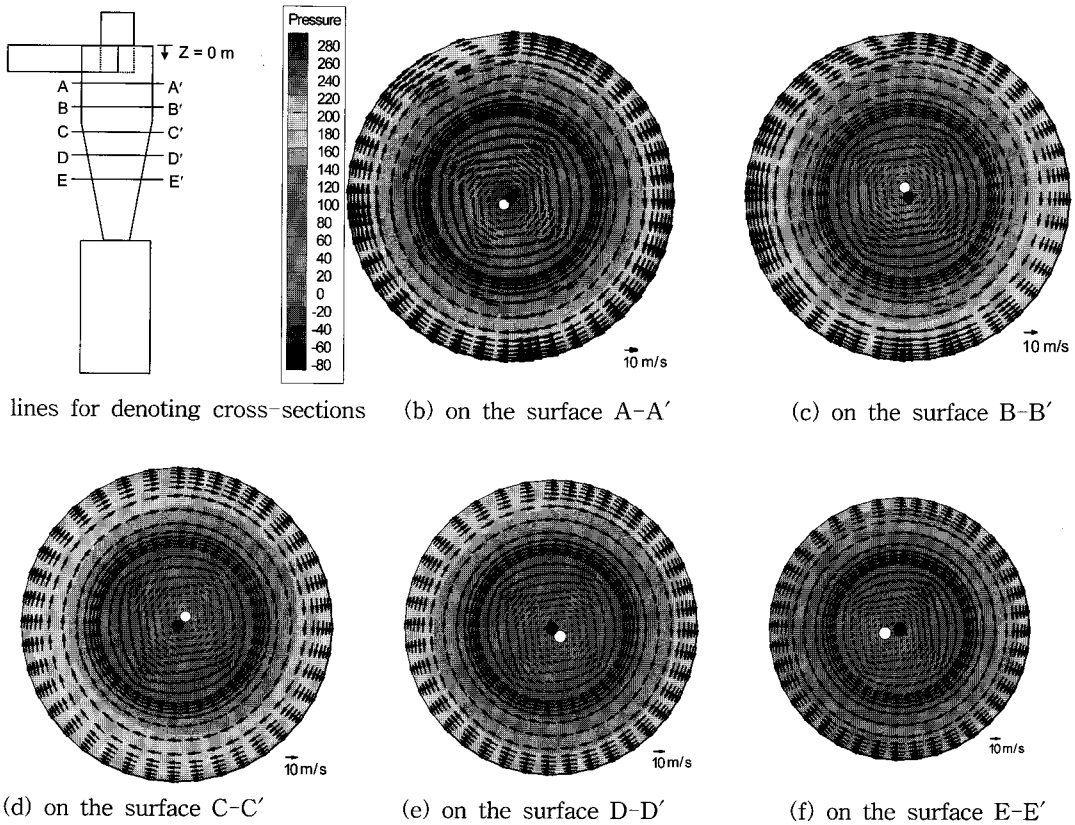


Fig. 4 Static pressure contours and radial-tangential velocity vectors for the inlet velocity 18.52 m/s.

해 사용되었다. 압력에 대한 이산화방식은 강한 회전유동을 해석할 때 적합한 PRESTO(Pressure staggered option)가 적용되었고 대류항의 처리방법으로 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics)이 사용되었다.⁽⁶⁾ 수렴판정은 모든 격자점에서 무차원 잔차(residual)가 10^{-4} 이내이면 수렴한 것으로 가정하였다. 계산시간은 CPU가 듀얼코어 2.13 GHz인 PC를 사용하여 2시간 정도 소요되었다. 위의 계산은 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.2를 이용하여 수행되었다.

2.2.2 계산조건

유체의 입구속도가 9.26 m/s와 18.52 m/s인 2가지 경우의 대하여 입자의 직경이 각각 $0.5 \mu\text{m}$, $1 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ 인 모두 8 case에 대한 수치해석이 수행되었다. 입자의 밀도는 2500 kg/m^3 , 해석에 사용된 유체의 밀도는 1.225 kg/m^3 , 점성계수는 $1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 이다.

본 해석에서 사이클론의 입구, 출구, 벽 부분에서 적용된 주요 변수들과 해석조건이 Table 2에 제시되어 있다.

3. 해석결과

3.1 유체의 유동특성

사이클론 내에서, 먼저, 입자의 유입이 없는 경우에 대한 유체유동 특성을 검토한 후 계산된 유동장에 입자가 유입될 때에 입자의 거동특성 및 집진효율이 해석되었다.

원통부분의 여러 단면에 대한 유체의 압력 분포와 radial-tangential 속도 벡터들이 입구속도가 다른 두 가지 경우에 대하여 각각 Fig. 3, Fig. 4에 나타나 있다. A-A' 단면의 위치는 사이클론의 상판의 위치($z = 0 \text{ m}$)에서 0.04 m 떨어진 곳이다. 각 단면들 사이의 거리는 0.03 m 이고 총 5개

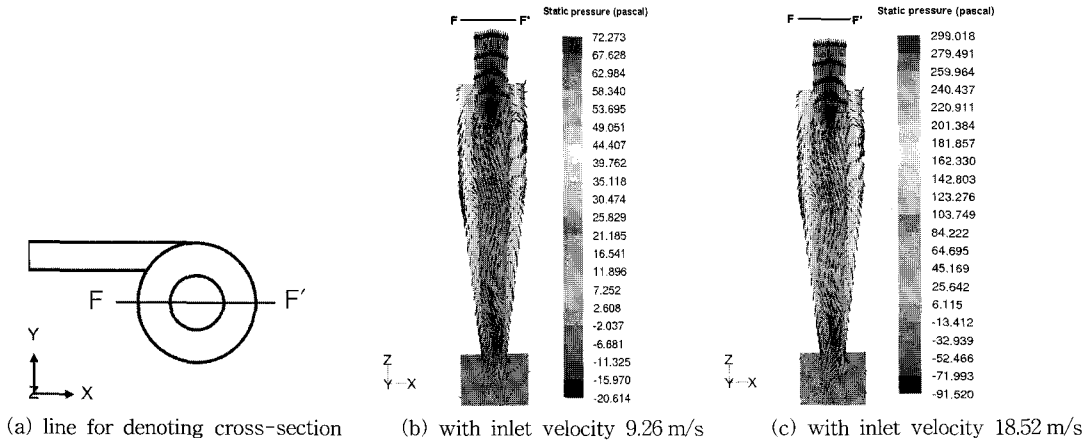


Fig. 5 The static pressure contours and axial-radial velocity vectors with different inlet velocities.

의 단면이 고려되었다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 압력은 원의 중심부에서 반경방향으로 갈수록 증가하였다. 반경방향에 대한 압력의 구배(gradient)는 원형단면의 중심에서 음의 값의 압력이 나타나는 A-A' 단면에서 가장 컸고 E-E' 단면에서는 반경방향에 대한 압력의 변화가 작았다. 또한 radial-tangential 속도의 크기는 중심에서 멀어질수록 커졌으나 원통의 벽면 근처에서는 벽면에 가까이 갈수록 점착조건으로 속도가 작아졌다.

이 그림들에서 vortex의 중심은 흰점으로, 기하학적 중심은 검은 점으로 표시되어 있다. 속도벡터의 크기가 0인 vortex의 중심부가 꼭 원형단면의 중심과 일치하지는 않고 각 원형단면의 중심으로부터 약간 벗어나 있다.

사이클론을 위에서 바라본 형상이 Fig. 5에 제시되었다. F-F' 평면은 사이클론의 중심축을 지나고 입구 단면에서의 유입 속도 벡터와 평행한 평면이다. 이 F-F' 평면에 입구속도에 따른 유체의 압력 분포와 radial-axial velocity vector들이 나타나 있다.

해석결과, 사이클론에서 입구와 출구에서의 정압 차이는 두 개의 입구속도에 대하여 각각 72 Pa, 299 Pa 정도로 평가되었다. 유체가 유입되어 흐르다가 사이클론의 형상에 의해 선회유동이 시작되는 사이클론 상단 우측의 내벽 가까이에서 압력이 가장 컸다(Fig. 5). 이는 입구통로를 따라 흐르는 유체가 사이클론의 원통내벽에 충돌하여 내벽 가까이에서 유체의 압력이 커진 것으로 판

단된다. 음의 압력이 vortex finder(출구통로)와 그 아래 부분에서 나타났고 또한 음의 압력이 나타나는 영역에서는 유체의 속도크기가 상대적으로 컸다. F-F' 단면에서 유체의 속도 벡터들이 사이클론의 중심축에 대해서 대칭적으로 나타나지 않았다. 또한 사이클론 내벽을 따라 하부까지 내려간 유체가 상승하여 출구로 흐를 때, 유체가 굽이치며 상승하는 모습이 Fig. 5에 나타나 있다.

3.2 입자의 유동특성 및 집진효율

입구 단면에서의 투입위치에 따른 입자의 거동 특성을 파악하기 위해 입구 단면의 서로 다른 위치에서 입자들이 투입되었다. 사이클론 입구가 9개 등분 영역으로 나뉘었을 때, 각 영역에서의 중심위치가 입자투입 위치로 선정되었다(Fig. 6). 그림에 나타나 있는 입자투입의 위치 ①~⑨에서

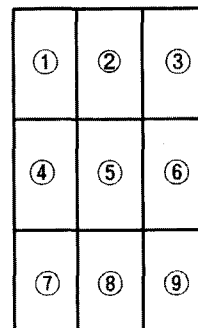


Fig. 6 Nine positions on the inlet surface.

Table 3 The residence times for the two cases

velocity	particle diameter	position of particle put in									mean residence time
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
9.26 m/s	0.5 μm	0.107 s	0.131 s	0.126 s	2.894 s	1.152 s	0.117 s	2.385 s	2.016 s	0.211 s	1.015 s
	1 μm	0.103 s	0.139 s	0.127 s	3.182 s	1.124 s	0.142 s	3.845 s	3.149 s	2.734 s	1.616 s
	2.5 μm	0.187 s	0.196 s	0.257 s	2.704 s	2.951 s	0.350 s	1.033 s	2.300 s	6.704 s	1.856 s
	10 μm	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
18.52 m/s	0.5 μm	0.081 s	0.062 s	0.062 s	2.012 s	0.727 s	0.059 s	1.580 s	0.614 s	0.099 s	0.589 s
	1 μm	0.067 s	0.066 s	0.064 s	1.891 s	1.380 s	0.086 s	0.391 s	1.621 s	0.559 s	0.681 s
	2.5 μm	1.858 s	2.962 s	2.147 s	0.917 s	2.018 s	1.618 s	4.360 s	2.372 s	2.333 s	2.265 s
	10 μm	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

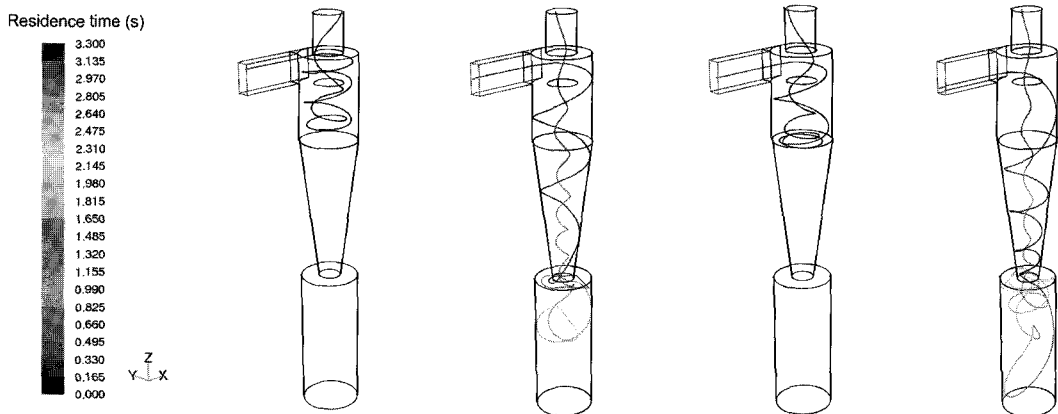
입자를 투입하여 입자의 크기에 따라 입자들의 체류시간과 평균 체류시간이 수치계산으로부터 구해졌으며 서로 다른 입구속도에 대하여 Table 3에 제시되었다.

일반적으로 입자의 크기가 증가함에 따라 체류시간은 증가하였으며 평균 체류시간 또한 입자의 크기가 증가할수록 증가하였다. 입자의 크기가 0.5 μm , 1 μm 일 때, 입구속도가 증가할 경우에는 대체적으로 체류시간은 감소하였다. 이 정도의 입자크기에서는 입구속도가 증가하면, 입자의 속도도 증가하여 입자는 더 빨리 출구로 빠져나간 것이라고 평가된다. 하지만 입자의 크기가 2.5 μm 일 때, 입구속도의 증가에 따라 체류시간은 대체로 증가하였다. 이는 입자의 크기 증가와 입구속도의 증가로 인하여 입자의 원심력이 유체로부터

받는 힘보다 커지거나 또는 대등해져서 유체와 같이 출구로 쉽게 휩쓸려 나가지 않고 더 오래 사이클론 내부에 체류한 것으로 판단되었다. 입자의 크기가 10 μm 일 때 투입된 9개의 입자들은 출구로 나가지 못하고 사이클론의 하부인 hopper에 머물렀다. 그러므로 입자의 크기가 10 μm 인 입자들은 완벽하게 집진된다고 평가된다.

Table 3에서, 대체로 입구의 우측 상단 쪽(①, ②, ③, ⑥)으로 투입된 입자들의 체류시간이 좌측 하단 쪽(④, ⑦, ⑧, ⑨)으로 투입된 입자들보다 상대적으로 짧았다.

입구속도가 9.26 m/s일 때, 입자의 투입위치 ③, ④, ⑥, ⑦에서 투입된 1 μm 입자의 궤적이 체류시간에 따라 색상화되어 Fig. 7에 나타나 있다. ④와 ⑦에서 투입된 입자들이 ③과 ⑥에서 투입



(a) for inlet position 3 (b) for inlet position 4 (c) for inlet position 6 (d) for inlet position 7

Fig. 7 The residence time and trajectories of 1 μm particles for inlet velocity 9.26 m/s with different inlet positions.

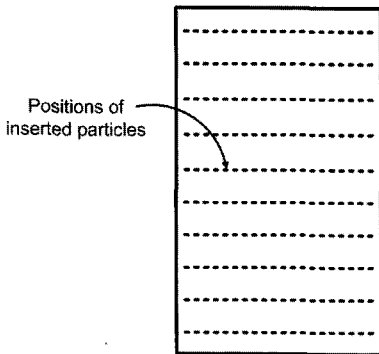


Fig 8. Thousand positions on the inlet surface.

된 입자들보다 더 여러 번 선회하면서 사이클론의 하부까지 내려갔다가 출구로 빠져나갔다. ④와 ⑦에서 투입된 입자들은 상대적으로 더 큰 원심력을 받아 출구로 빠져나가는 유체를 따라 흘러가지 않고 사이클론의 외벽을 따라 하강하는 유체와 함께 하부까지 내려가므로 더 큰 체류시간을 갖는 것으로 밝혀졌다.

본 연구와 동일한 규격의 사이클론이 제작되어 미세입자 포집 실험에 사용되었다.⁽⁷⁾ 실험용 장치는 스테인리스 재질과 아크릴 재질로 제작되었으며 실험에 사용된 분진시료는 보령화력발전소에서 발생하는 flyash가 사용되었다. 100 °C oven에서 2시간 동안 건조된 flyash가 노즐을 통하여 사이클론의 inlet pipe로 공급된 후에 pipe 내에서 공기와 완전히 혼합, 분산되어 사이클론으로 공기와 함께 유입된다. 이 때 유체의 흐름은 사이클

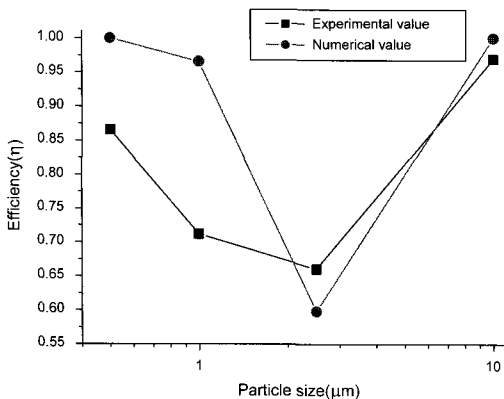


Fig. 9 The collection efficiency for different sizes of particles with the inlet velocity 9.26 m/s.

론의 출구 쪽에 설치된 송풍기인 vortex blower (samjin, HS-060-E)에 의하여 유지되었다. 유량은 유량계(gas rotameter)로 측정되었으며 입구 단면에서 유속이 9.26 m/s~18.52 m/s가 되도록 조절되었다. 사이클론의 hopper와 출구로 배출된 분진들의 크기는 레이저를 이용한 입도분석장치인 Master Sizer(Malvern, Master Sizer-S)으로 측정되고 이로서 사이클론에 공급된 입자들의 크기에 따른 집진효율이 얻어졌다. 입자의 크기와 밀도로부터 질량을 기준으로 한 집진효율은 식 (12)로부터 계산된다.

$$\eta(D_p) = \frac{\Theta(D_p)_h m_h}{\Theta(D_p)_h m_h + \Theta(D_p)_o m_o} \quad (12)$$

여기서, m_h 는 hopper에 남은 flyash의 총 질량, m_o 는 출구로 배출된 flyash의 총 질량이고, $\Theta(D_p)_h$ 는 hopper로 배출된 flyash의 체적에 대한 직경이 D 인 flyash의 체적분율이고 $\Theta(D_p)_o$ 는 출구로 배출된 flyash의 체적에 대한 직경이 D 인 flyash들의 체적분율이다.

수치적으로 모사된 사이클론 내의 유동장에서 입자들의 집진효율을 구하기 위한 계산방법은 다음과 같다. 입구의 하단으로부터의 높이가 등간격으로 서로 다른 10개의 각 위치선상에 등간격으로 100개의 투입위치가 선정되었다(Fig. 8). 서로 다른 4개의 입자크기에 대하여, 또 서로 다른 입구속도에 대하여 각각 1000개의 투입위치에서

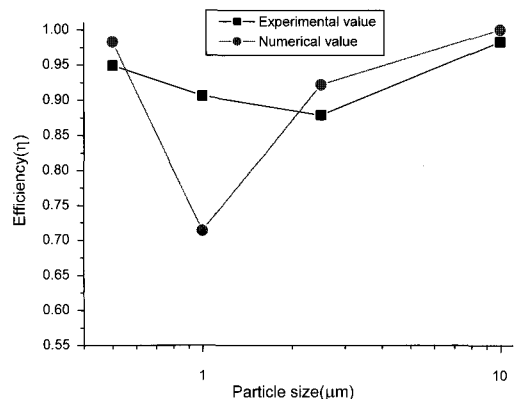


Fig. 10 The collection efficiency for different sizes of particles with the inlet velocity 18.52 m/s.

균일한 크기의 입자들이 투입되었고 이에 따른 집진효율이 계산되었다.

실험으로부터 얻은 집진효율과 수치적으로 계산된 집진효율이 입구속도 9.26 m/s와 18.52 m/s에 대하여 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 제시되었다. 실험을 통하여 얻어진 집진효율은 두 가지 입구속도에 대하여 입자의 크기가 2.5 μm 일 때 가장 작았다. 입자 포집에 있어서 주요 메카니즘은 관성력(inertia)과 확산(diffusion) 효과인데, 관성력은 입자의 크기가 클수록 증가하고, 확산효과는 반대로 감소한다.⁽⁸⁾ 그러므로 1 μm 이하 입자들은 확산 효과로 벽면에 부딪히는 빈도가 증가되어 결국 입자의 집진효율이 상승한 것으로 판단된다. 수치적으로 계산된 1 μm 이하 입자들은 관성력이 작아서 사이클론 벽면과 충돌한 후에 되튀어나올 때의 운동량이 작아서 벽면 근처에서 체류하게 되므로 결과적으로 집진효율이 증가되었다.

수치적 방법으로 얻어진 효율과 실험값에 있어서 다소 차이가 있지만 입자크기에 따른 집진효율 경향은 유사하게 나타났다고 평가된다. 유속이 9.26 m/s일 때, 1 μm 입자의 집진효율에 있어서 실험값이 수치값보다 작게 나타나 있는데 실험에서 1 μm 이하 입자들이 큰 입자들에 달라붙어 사이클론의 출구로 나올 수 있기 때문에 외관상의 집진효율이 작게 나타났다고 판단된다. 유속이 18.52 m/s일 경우에는 수치적으로 계산된 1 μm 입자의 집진효율이 실험값보다 작게 나타났다. 수치해석에서 입자가 사이클론 벽면에 충돌할 때에 완전탄성충돌이 발생한다고 가정하였는데 이로 인하여 입자에 작용하는 관성력이 실제의 경우보다 크게 작용하여 상대적으로 큰 유속을 갖는 유동이 1 μm 입자를 휩쓸어 출구로 빠져나가 집진효율을 감소시켰고, 반면에 실험의 경우 벽면에서 입자가 실제로 완전탄성충돌을 하지 않으므로 수치계산의 결과보다 큰 집진효율을 나타내는 것으로 사료된다.

4. 결 론

여러 분야의 산업현장에서 사용되는 원심력 집진 장치(cyclone)의 집진효율 향상을 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 본 연구는 상대적으로 사이클론의 크기가 작고 입구속도가 큰 경우에 대한 유동특성과 미세입자들의 집진효율을 파

악하고자 수치적 방법을 통해서 수행되었다.

사이클론 내에 유동특성이 RSM을 이용하여 수치적으로 파악되었다. 두 가지의 입구속도에 대한 수치해석 결과, 입구속도가 두 배로 커질 경우 입구와 출구의 정압 차이가 네 배 정도 증가했다. 입구에서 유입된 유체는 사이클론의 외벽을 따라 회전유동하며 하강하여 하부에서 사이클론의 중심축을 따라 상승했다. 이 때, 유체의 vortex 중심점의 위치는 사이클론의 중심축의 위치에 따라 변화하였다.

미세입자의 거동이 입자운동방정식으로부터 계산되었다. 입자들의 궤적은 투입되는 입구 단면에서의 위치에 따라 달라졌다. 입구 단면에서 상단 우측으로 투입되는 입자들은 궤적의 길이가 짧고 체류시간이 짧았으며 하단 좌측으로 투입되는 입자들은 궤적의 길이가 길고 체류시간이 길었다.

크기가 다양한 입자들의 집진효율이 수치적 방법으로 얻어졌고 실험 결과와 비교되었다. 실제로는 입자의 관성력과 확산효과가 포집 메카니즘을 지배하는데 수치계산에서는 입자와 사이클론 벽면 사이의 충돌이 완전탄성충돌이라고 가정하였으므로 수치계산에서 입자의 관성력이 과대평가되어 낮은 집진효율이 나타난 경우도 있었다. 하지만 집진효율에 대한 수치값이 실험값과 대체로 유사하였고 각각의 입자들에 대한 집진효율이 60% 이상이었다. 본 연구는 미세입자들을 효과적으로 포집하기 위한 사이클론 설계에 큰 도움이 될 것이다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-042-D00184).

참고문헌

1. Kim, Y. J., 1993, Cyclone dust collector, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 391-797.
2. Shalaby, H., Pachler, K., Wozniak, K. and Wozniak, G., 2005, Comparative study of the continuous phase flow in a cyclone separa-

- tor using different turbulence models, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 48, pp. 1175-1197.
3. Wang, B., Xu, D.L., Chu, K. W. and Yu, A. B., 2006, numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 30, pp. 1326-1342.
 4. Sommerfeld, M. and Ho, C. A., 2003, Numerical calculation of particle transport in turbulent wall bounded flows, *Powder Technology*, Vol. 131, pp. 1-6.
 5. Pant, K., Crowe, C. T. and Irving, P., 2002, On the design of miniature cyclones for the collection of bioaerosols, *Powder Technology*, Vol. 125, pp. 260-265.
 6. Bhaskar, K. U., Murthy, Y. R., Raju, M. R. Tiwari, S., Srivastava, J. K. and Ramakrishnan, N., 2007, CFD simulation and experimental validation studies on hydrocyclone, *Minerals Engineering*, Vol. 20, pp. 60-71.
 7. Lee, K. M., Jang, J. H. and Jo, Y. M., 2007, Recalculation of the particle dynamic model for gas-solid cyclone, *KOSAE*, Accepted and in Press.
 8. Jung, C. H., Xiang, R. B., Kim, M. C., Lim, K. S. and Lee, K. W., 2004, Performance evaluation of a cyclone with granular packed beds, *Aerosol Science*, Vol. 35, pp. 1483-1496.