

사이클론 집진장치의 내부온도에 따른 외부 소용돌이와 집진효율의 관계

현 대 근 · 장 혁 상*

영남대학교 환경공학과 환경에어로졸공학연구소

(2015년 6월 12일 투고, 2015년 7월 2일 수정, 2015년 7월 2일 게재확정)

Relationship between the Outer Vortex and the Collection Efficiency with respect to Temperatures in the Cyclone Dust Collector

Daegeun Hyun, Huksang Chang*

Environmental Aerosol Engineering Laboratory, Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

(Received 12 Jun 2015; Revised 2 July 2015; Accepted 2 July 2015)

Abstract

This study compares the results of collection efficiency of difference gas temperature in cyclone dust collector. The previous researcher's experiment results were used to confirm the reliability of CFD(Computational Fluid Dynamics) model. Based on this verified CFD model, we extended the analysis on the cyclone dust collectors. In CFD study, we used RNG k-epsilon model for analysis of turbulence flow, fluid is air, the velocity at inlet is 10 m/s, the temperature of air is 20 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 600 °C and 1000 °C. As the temperature decreases, the average velocity of outer vortex and collection efficiency is increased, showed the highest collection efficiency at 20 °C. It can be inferred smooth flow in cyclone dust collector is difficult because air viscosity increases as temperature increases. The power required at 1000 °C is almost 18 times greater than that of 20 °C to get the similar collection efficiency.

Keywords : Cyclone dust collector, CFD, Collection Efficiency, Outer vortex

* Corresponding author.

Tel : +82-53-810-2547, Email : hschang@yu.ac.kr,

1. 서 론

최근 국민들이 가장 관심을 가지는 환경적 이슈는 미세먼지(PM₁₀)라 할 수 있다. 미세먼지는 공기역학적 직경이 10 μm 이하인 입자상 물질을 통칭하는 용어로서 자연적 발생원 보다는 화석연료 사용, 타이어와 지면의 마찰 등과 같은 인위적 활동에 의한 생성이 지배적이다. 미세먼지는 인체에 유입될 시 다시 배출되지 않고 체내에 축적되어 폐 기능악화, 호흡기 질환 등을 유발하며, 세계보건기구 국제암연구소의 발암물질 분류에서 Group 1에 속해 있을 정도로 인체에 유해성이 심각하다. 이러한 심각성으로 인하여 행정적 규제인 대기환경기준 안에 미세먼지가 속해 있으며, 이를 배출하는 각종 사업장에 대한 법적 규제가 강화되고 있다. 규정 강화에도 미세먼지의 농도는 크게 저하되지 않고 있다. 그 이유는 발생원 자체에서 제어가 어렵기 때문이다. 이와 같은 문제점으로 발생 후 미세먼지를 제거하는 장치가 과거로부터 많이 개발되어 왔으며, 집진원리에 따라 중력식 집진장치, 사이클론 집진장치, 세정식 집진장치 등과 같은 여러 종류의 집진기가 존재한다. 그 중 사이클론 집진장치는 배출가스에 선회 운동을 유도하여 가스에 포함되어 있는 분진입자를 원심력으로 분리하는 집진장치로서 낮은 설치, 유지비용, 고온 고압과 같은 악 조건에서도 사용 가능한 장점을 가지고 있어 가장 널리 사용되는 집진장치 중 하나라고 할 수 있다.

사이클론 집진장치의 설계 요소는 집진효율과 압력강하라고 할 수 있다. 과거 이 두 가지 요소에 대한 많은 연구가 진행되었다. Donna Lee Iozid와 David Leith(1989)¹⁾는 사이클론 형상과 유량 변화에 따른 내부 속도의 변화를 측정하였으며, John Dirgo와 David Leith(1985)²⁾는 집진효율에 대하여 이론식과 실험결과를 비교하였고, J. C. Kim과 K. W. Lee(1990)³⁾는 출구와 몸체의 직경에 따른 집진효율 변화에 대한 실험을 실시하였고, David Leith와 Dilip Mehta(1972)⁴⁾는 사용 목적에 따라 서로 다른 형상을 가진 사이클론에 대한 압력강하와 집진효율을 계산하였다. 위와 같이 사이클론 집진장치의 선행 연구에서는 거의 대부분이 실험과 경험적 이론식을 바탕으로 연구가 진행되었다. 그러나 Kung-Yu Kuo와 Chuen Jinn Tsai(2001)⁵⁾의 이론식과 실험 결과 비교

연구에서도 나타나듯이 실험이 이루어진 환경에 따른 집진효율과 경험적 이론식의 계산 값이 상이하게 나타나는 문제점이 발생할 수 있을 것이다.

사이클론 집진장치의 집진원리는 다음과 같다. 입구로 유입되는 가스가 원통형 몸체에 의해 유도된 선회 운동으로 하강하게 되며, 이러한 현상으로 외부 소용돌이가 발생하게 된다. 하부로 갈수록 원통의 직경이 줄어들어 가스 내 입자는 충분한 원심력을 얻어 선회류를 벗어나 사이클론 집진장치의 바닥부분에 존재하는 더스트 박스에 집진된다. 입자의 집진이 이루어진 후 가스와 집진되지 못한 입자는 내부 소용돌이를 형성하며 출구로 상승하여 출구로 배출된다. 즉, 원심력을 발생시키는 외부 소용돌이의 폭과 속도에 따라 사이클론 집진효율이 결정된다고 추측할 수 있다. 집진효율과 내부유동의 관계는 아직까지 명확히 밝혀지지 않고 있다. 그 이유는 위에서 언급한 바와 같이 많은 선행 연구에서 대부분이 실험과 경험적 이론식을 바탕으로 연구가 이루어 졌고, 실험으로 내부 유동 측정은 많은 어려움이 따르기 때문이다.

사이클론 집진장치는 동일한 형상일지라도 작동 조건에 따라 그 집진효율이 변화할 수 있다. Donna Lee Iozid와 David Leith(1989)¹⁾의 실험 결과에서도 확인 할 수 있듯이 동일 형상일 경우 가스가 높은 유속으로 집진장치 내부로 유입될 시 외부 소용돌이의 속도가 높아지고 그로인해 높은 원심력을 가지게 되어 집진효율이 증가할 것으로 예상된다. 하지만 효율을 높이기 위해 지속적으로 높은 유속으로 가스가 유입할 시에는 유량의 증가로 인해 많은 동력비가 소모되기 때문에 유속을 증가시켜줌으로써 집진효율을 향상시키는 방법에는 금전적 제약이 따른다. 집진효율을 변화 시키는 또 다른 요소는 유입되는 가스의 온도를 들 수 있다. 본 연구에서는 유입되는 가스의 유속은 고정하고, 온도를 변화시켜 줌으로써 내부 유동 변화와 외부 소용돌이에서의 속도 변화를 관찰하고 집진효율과의 관계를 추론하기 위해 전산유체역학을 통한 연구가 진행되었다. 전산유체역학이란 유체 현상을 기술하기 위하여 수치기법의 알고리즘을 사용해 유체 유동 문제를 풀고 해석하는 것으로서 공학 분야에서 주로 사용되는 학문이다. 위에서 언급한 바와 같이 환경에 따른 실험 결과와 이론식에 의한 계산 값에 차이가 존재

하기 때문에 전산해석 또한 결과 값이 정확한지에 대한 의문이 발생한다. 그로 인해 전산해석을 실시하기에 앞서 해석모델의 신뢰성을 논의할 필요가 있다고 판단되며, 이에 대한 논의는 차후에 실시하도록 할 것이다.

2. 연구방법

2.1 해석 형상

사이클론 집진장치는 가스의 유입방식에 따라 여러 종류로 나뉘게 된다. 본 연구에는 산업 현장에서 가장 널리 사용되는 접선유입식 사이클론 집진장치를 사용하였으며 기본 형상은 Figure 1에서 보는 것과 같다.

그림에서 볼 수 있듯이 좌측 상단에 가스의 유입구가 존재하며 몸체의 가운데 출구가 존재한다. 원심력과 속도를 증가시키기 위하여 사이클론 집진장치의 아랫부분으로 갈수록 몸체의 직경이 줄어드는 콘 형상으로 설계되어 있으며 가장 아랫부분에는 더스트 박스가 존재한다. 사이클론 집진장치의 각 부분에 대한 치수는 몸체의 직경을 기준으로 비율에 따라 다른 치수가 결정되며, 치수의 비는 사용목적과 형상을 제시한 연구자에 따라 상이하게 나타난다. 그 중 Stairmand의 디자인이 가장 널리 사용되는 형상이라고 할 수 있으며 고효율, 고용량, 일반적인 목적 3가지의 디자인으로 나뉘어져 있다. 본 연구에는 Stairmand의 고효율 디자인을 사용하였으며 8가지 치수에 대한 값은 Table 1에 나타나있다.⁴⁾

2.2 CFD 신뢰성

전산해석을 실시하기 전에 앞서 전술한 바와 같이 전산해석 결과의 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다. 신뢰성 확보를 위하여 선행연구자의 실험 결과를 바탕으로 이론식과 전산해석 결과를 비교하였

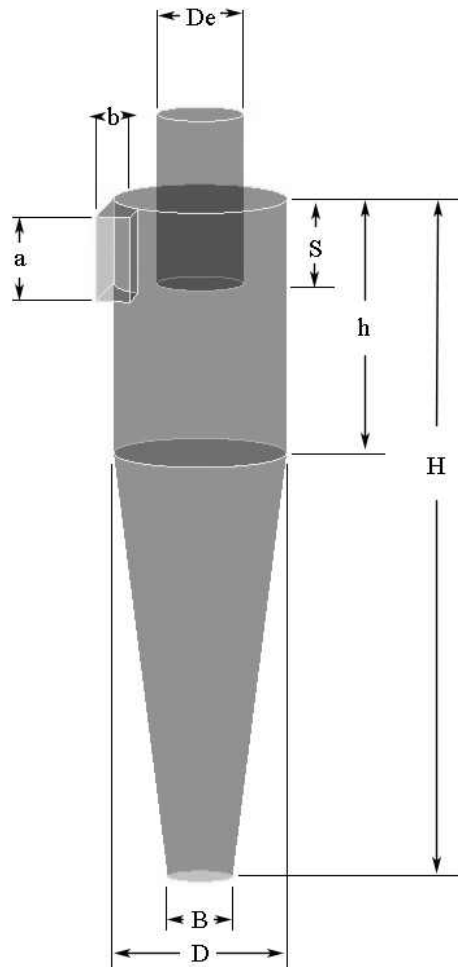


Fig. 1. Schematic of Cyclone Dust Collector.

다. 비교에는 Dirgo와 Leith(1990)¹⁾의 실험 결과를 사용하였으며, 이론식으로는 집진효율 예측을 위해 가장 대표적으로 사용되는 Barth(1956)³⁾의 효율 방정식을 사용하였다. Dirgo와 Leith(1990)¹⁾는 밀도가 860 kg/m³인 입자를 사이클론 집진장치 내부로 유입할 때 유속에 따른 집진효율 변화를 실험하였다. 출구

Table 1. Dimensions of Stairmand High Efficiency's Design.

	D	a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D
Rate	1	0.5	0.2	0.5	0.5	1.5	4.0	0.375
	D	a	b	De	S	h	H	B
Dimension(m)	0.5	0.25	0.1	0.25	0.25	0.75	2	0.1875

에서 가스의 소용돌이 유동이 입자 측정에 주는 영향을 줄이기 위하여 유동 균일화를 실시한 후에 입자의 개수를 측정하였다. 이론식으로 사용된 Barth(1956)의 효율 방정식은 아래와 같다.²⁾

$$\eta = \frac{1}{[1 + (v_{ts}/v_{ts}^*)^{-3.2}]} \quad (1)$$

여기서 v_{ts} 는 입자의 종말침강속도이며, v_{ts}^* 는 정적입자의 종말침강속도이다. 두 입자들의 종말침강속도는 다음으로 표현 가능하다.

$$v_{ts}^* = \frac{Qg}{2\pi h^* v_t^2} \quad (2)$$

$$\frac{v_{ts}}{v_{ts}^*} = \frac{\pi h^* v_t^2 \rho_p d^2}{9\mu Q} \quad (3)$$

여기서 ρ_p 는 입자의 밀도, d 는 입자의 직경, μ 는 유체의 점성계수, Q 는 유량이다. h^* 는 사이클론 코어의 길이 v_t 는 사이클론 소용돌이에서 가스의 접선속도로서 다음과 같다.

$$h^* = H - S \quad \text{if } De \leq B \quad (4)$$

$$h^* = \frac{(H-h)(D-De)}{(D-B)} + (h-S) \quad \text{if } De > B \quad (5)$$

$$v_t = v_o \left[\frac{(De/2)(D-b)\pi}{2ab\alpha + h^*(D-b)\lambda\pi} \right] \quad (6)$$

여기서 λ 는 마찰계수로서 Barth(1956)는 0.02로 가정하였으며, α 는 다음과 같다.²⁾

$$\alpha = 1 - 1.2(b/D) \quad (7)$$

실험과 이론식 그리고 전산해석 결과의 비교는 Figure 2에 나타냈다.

위에서 언급한 바와 같이 입구의 유속이 빨라짐에 따라 집진효율 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 신뢰성 측면에서 검토를 실시하면 유입되는 가스의 유속이 10 m/s일 경우 1.3, 2.1 μm 의 입자에서 실험 평균값과 전산해석 값이 거의 동일하다고 판단될

정도의 일치성을 보인다. 그 외의 입자 영역에서도 실험값과 전산해석 결과는 유사하게 나타나는 것으로 판단된다. 15 m/s에서는 2.9 μm 의 입자의 경우 실험과 전산해석 결과 값의 차이가 존재하지만 2.1, 3.7, 5.9 μm 에서 아주 높은 동의성을 보이고 있으며 나머지 영역부위에서도 높은 일치성을 보인다고 할 수 있다. 전체적인 신뢰성 검토에서 실험 결과와 전산해석 결과는 아주 유사하게 나타났기 때문에 사이클론 집진장치와 같은 소용돌이 유동이 지배적인 유동해석에서 입자의 추적은 상당히 정확하다는 결론을 내릴 수 있으며, 전산해석 결과의 신뢰성이 확보되었다는 판단 하에 연구를 계속적으로 진행하였다.

2.3 해석 모델 및 경계조건

본 연구에서 사용된 전산해석 프로그램은 Fluent v15.0이며, 해석 대상의 형상을 생성하기 위하여 Design Modeler를 사용하였고 치수는 Table 1과 동일하다. 격자 생성을 위하여 ANSYS Meshing을 사용하였으며 생성된 격자의 수는 약 715,000개의 tetrahedron 형태로 구성되어 있다. 유동이 급격하게 변화할 것으로 예상되는 벽면 부위에 inflation 효과를 설정하여 주어 정밀한 계산을 유도하였고, 방정식의 해는 잔차(residual)가 1×10^{-3} 미만의 값을 가질 때를 수렴기준으로 설정하였다. 모든 방정식의 계산은 하향 이완(under relaxation)이 사용되며 이 방식은 반복 계산이 진행될 때 해의 중속변수 값의 변화를 느리

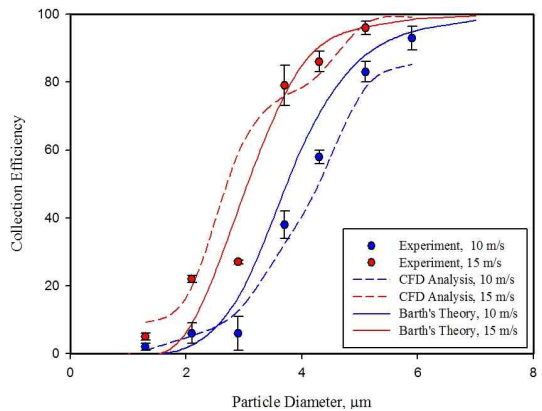


Fig. 2. Comparison for CFD Reliability (Dirgo and Leith's Experiment, 1990; Barth's Theory, 1956).

게 하여 수렴성을 향상시킨다.

전산해석의 경우 사용모델에 따라 결과 값이 상이하게 나타나기 때문에 적절한 모델의 선택이 아주 중요하다. 난류 모델은 유체 유동의 특성에 따라 몇 가지 모델이 존재한다. 본 해석에서는 RANS (Reynolds averaged Navier Stokes) 계열의 RNG k-epsilon 모델을 사용하였다. RNG k-epsilon 모델은 난류 해석에 대표적으로 사용되는 Standard k-epsilon 모델을 기반으로 하여, 상당히 빠르고 급격하게 변화하는 유동에서 정확성을 향상시키기 위해 epsilon 방정식에 항을 추가하여 발전된 모델로서 수송 방정식을 기초로 한 반경험적 모델이다. 여기서 k는 난류 운동에너지, epsilon은 소산율로서 다음 식으로 표현할 수 있다.⁶⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_M \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (9)$$

여기서 μ_{eff} 는 유효점성계수, G_k 와 G_b 는 평균 속도 구배와 부력에 의한 난류 운동에너지이며 α_k , α_ϵ 는 k 와 ϵ 에 의한 난류 Prandtl Number의 역수이다. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 는 상수항이다. 사이클론 집진장치의 경우 내부에서의 온도변화가 거의 발생하지 않기 때문에 Isothermal 모델을 적용하였다. 사이클론 집진장치 내부는 입자와 유체가 공존하는 다상유동이다. 다상 유동 해석에는 Eulerian, Lagrangian 두 가지 접근 방식이 존재한다. 본 연구에서는 입자를 추적하는 Lagrangian 접근방식으로 해석을 실시하기 위하여 DPM(Discrete Phase Model)을 설정하였다. DPM에서 입자의 force balance는 다음의 식으로 계산된다.⁶⁾

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

여기서 F_x 는 단위 입자 질량당 힘으로서 추가적인 가속도 항이며, g_x 는 중력가속도, ρ_p , ρ 는 입자와 유체의 밀도, u_p , u 는 입자와 유체의 속도, $F_D(u - u_p)$ 는 단위 입자 질량당 항력으로서 다음으로 계산된다.⁶⁾

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

d_p 는 입자의 직경, μ 는 유체의 점성, C_D 는 구형입자의 항력계수, Re 는 레이놀드 수로서 다음과 같다.

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (12)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (13)$$

a_1 , a_2 그리고 a_3 는 레이놀드 수에 따라 결정되는 상수항이다.

사이클론 집진장치의 입구는 velocity inlet으로 설정하여 입자를 함유한 가스가 해석 영역 내부로 일정한 유속을 가지고 유입되도록 하였다. 유속은 온도 변화에 따른 6가지 case에 대하여 동일하게 10 m/s로 설정하여 주었으며, 유입되는 가스는 공기로 설정하였다. 출구 부분은 pressure outlet으로 설정하고 내부 유동에 영향을 주지 않는 조건인 0 Pa로 지정해 주었다. 더스트 박스 부분인 사이클론 집진장치의 하부는 벽면으로 지정하였고 입자가 접촉하면 집진이 이루어지는 현상을 설정하기 위하여 DPM에서 Boundary Condition Type을 trap으로 설정해주었으며, 그로 인해 재비산은 일어나지 않는다고 가정하였다. 온도는 각 case에 대해 1000, 600, 300, 200, 100, 20 °C로 각각 설정하여 온도에 따른 점성계수를 다르게 설정하였다. Table 2에 사용모델과 경계 조건을 정리하여 나타내었다.

3. 전산해석 결과

3.1 온도에 따른 집진효율

온도에 따른 집진효율의 비교 그래프는 Figure 3에 나타내었다. 입자의 효율은 입구에서 유입되는 입자의 개수와 출구로 빠져나가는 입자의 개수의 비를 통하여 계산하였으며 입구 전체영역의 계산그리드에 1,066개의 입자가 고르게 분포되어 집진기로 들어간다.

Table 2. Models and Boundary Conditions for CFD Analysis.

Computational Conditions	
Turbulence Model	RNG k-epsilon
Discrete Phase Model	
Materials	Air
	Ash (2000 kg/m3)
Boundary Conditions	
Inlet	10 m/s
Outlet	0 Pa (Gauge Pressure)
Dust Box	DPM Condition : Trap

그림에서 볼 수 있듯이 1000 °C 온도인 유체의 경우 가장 낮은 집진효율을 나타내고, 온도가 점차 낮아지면서 집진효율은 증가 하는 것을 볼 수 있다. 1000 °C와 600 °C, 600 °C와 300 °C에서 가장 큰 집진효율 차이를 나타내는 것을 볼 수 있으며 온도의 차이가 적을수록 집진효율의 차이도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 가장 큰 차이를 보이는 1000 °C와 20 °C의 경우 가장 작은 1 μm 입자에 대하여 집진효율이 2배 정도의 차이를 보이며 가장 큰 차이를 나타내는 4 μm 크기에서는 4배 이상의 차이를 나타낸다. 온도가 100 °C, 20 °C의 경우 가장 작은 집진효율의 차이를 나타내는데 1 μm의 경우 거의 동일한 효율을 보이고, 2 μm ~ 6 μm 미세한 차이를 나타내며 6 μm 이후에서 두 case 모두 효율이 100%로 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 사이클론 집진장치의 형상과 입구에서 유속이 고정된 상태에서 온도의 변화만으로 집진효율의 차이가 존재

하는 원인으로는 온도에 따라 공기의 점성이 변하기 때문이라고 추측하였다. 공기의 점성 값은 레이놀드 수를 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 레이놀드 수는 유체흐름의 형태를 나타내는 중요한 무차원 수로서 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$Re = \frac{\rho D u}{\mu} \quad (14)$$

여기서 ρ는 유체의 밀도, D는 유체가 흐르는 원형관의 직경, u는 속도, μ는 점성계수이다. 사이클론 집진장치의 경우 입구가 직사각형의 형태를 가지므로 수력학적 직경 값을 계산하여 식에 대입하였다. 온도에 따른 입구에서 레이놀드 수는 Table 3에 나타내었다.

표에서 나타나는 것과 같이 온도가 높아질수록 유체의 점성과 밀도의 변화로 인해 레이놀드 수는 감소하며 1000 °C와 20 °C에서는 10배 이상의 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 난류 유동의 지표인 레이놀드 수가 사이클론 집진장치의 집진효율과 큰 상관관계를 가진다고 판단할 수 있다.

3.2 사이클론 집진장치 내부에서 속도장

공기의 점성은 레이놀드 수에 영향을 주는 요소일 뿐만 아니라 사이클론 집진장치 내부의 유속에 큰 영향을 미치기도 한다. 온도로 인해 점성이 높아진 공기는 상대적으로 낮은 점성의 공기보다 원활한 유동 형성이 어려우며, 그로인해 외부 소용돌이 영역에서 낮은 속도를 발생시킬 것으로 예상된다. 외부 소용돌이에서 낮은 속도는 원심력의 저하로 연결되어 집진효율 감소에 영향을 미칠 것이라고 추측하였다. 이를 확인하기 위하여 사이클론 집진장

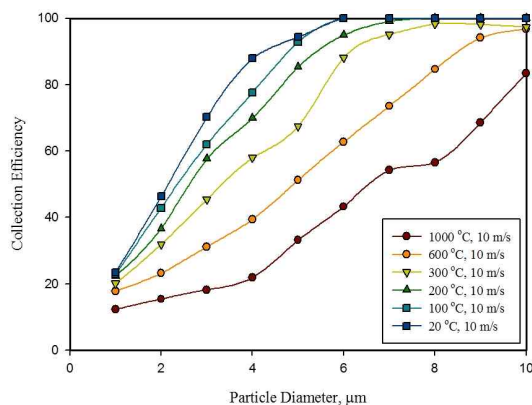


Fig. 3. Collection Efficiency of Each Temperature.

Table 3. Reynolds Number of Each Temperature.

	1,000 °C	600 °C	300 °C	200 °C	100 °C	20 °C
Reynold number	7,617	14,191	28,314	39,108	58,739	89,644

치 내부에서 온도에 따른 속도장을 Figure 4에 나타내었다.

예상했던 것과 같이 상대적으로 낮은 점성을 가진 20 °C 공기의 경우 외부 소용돌이 영역에서 속도장이 가장 높게 나타났으며 온도가 올라갈수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 사이클론 집진장치 하부의 더스트 박스 부분에서 유속이 0에 가까운 값을 가지게 되며, 출구로 향하는 내부 소용돌이의 코어 부분에서도 유속이 아주 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로 보아 소용돌이의 중심부분에는 유동이 약하게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 속도장은 가시적인 비교만을 제공되기 때문에 수치적인 비교가 필요하다고 판단하였다. Dirgo와 Leith (1989)¹⁾의 연구에서 확인할 수 있듯이 외부 소용돌이의 경계는 출구의 직경으로 결정되기 때문에 출구의 양 끝 부분에서 가상의 연장선을 생성하여 연장선의 외각 부분을 외부 소용돌이라고 가정하고

그 부분에서 평균속도를 계산하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

가장 점성이 낮은 20 °C와 가장 높은 1000 °C의 외부 소용돌이에서 평균속도는 약 2.7 m/s의 차이가 존재한다. 이러한 속도의 차이가 원심력에 차이로 이어져 집진효율에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이 결과를 통해 온도에 따른 집진효율의 차이는 점성의 변화에 따른 외부 소용돌이의 속도차이로 인해 발생하였다고 판단할 수 있다.

3.3 1000 °C의 온도에서 유속에 따른 동력비교

위의 결과에서 처리가스의 온도가 낮을수록 집진효율이 증가한다는 결과를 도출하였다. 1000 °C의 가스에서 20 °C와 유사한 집진효율을 나타내기 위해서는 어느 정도의 유속이 요구되는지에 대한 추가적인 연구를 진행하였다. 가스 온도는 1000 °C로 고정을 해주고 기존의 유속조건이었던 10 m/s에서 5

Table 4. Average Velocity of Outer Vortex about Each Temperature.

	1,000 °C	600 °C	300 °C	200 °C	100 °C	20 °C
Average Velocity	8.31	9.34	10.55	10.66	10.81	11.08

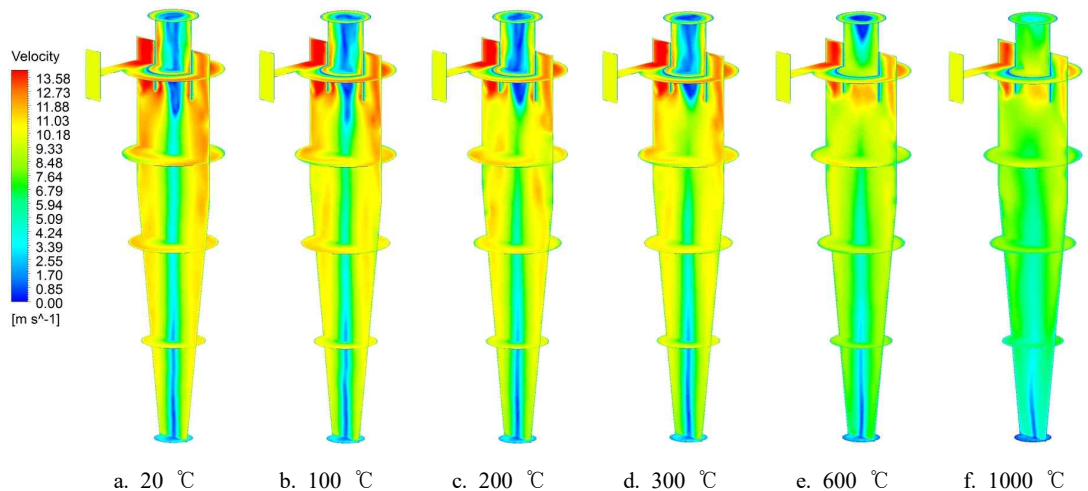


Fig. 4. Velocity Contours of 6 Case about Each Temperature

m/s 단위로 유속을 증가시켜 전산해석을 실시하였고, 그에 따른 집진효율을 Figure 5에 나타내었다.

1000 °C에서 10 m/s와 15 m/s의 집진효율은 차이가 나지만 효율곡선의 기울기는 유사하게 나타난다. 20 m/s의 경우 효율곡선의 기울기가 급격히 증가하는 경향을 보이며, 20 °C의 효율곡선 기울기와 유사하게 나타난다. 20 °C, 10 m/s와 가장 유사한 집진효율을 나타내는 경우는 1000 °C, 25 m/s이다. 결론적으로 약 2.5배 이상의 유속이 요구되는 것을 알 수 있다. 입구의 면적이 고정된 상태에서 유속이 증가할 경우 유량의 증가로 이어지며, 유량이 증가하면 사이클론 집진장치의 운전에 필요한 동력이 증가하게 된다. 1000 °C에서 유속에 따른 동력 비교를 위하여 다음의 식으로 동력을 계산하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

$$Power(W) = \Delta P \times Q \tag{15}$$

여기서 ΔP 는 사이클론 집진장치에서 압력강하, Q 는 유량이다.

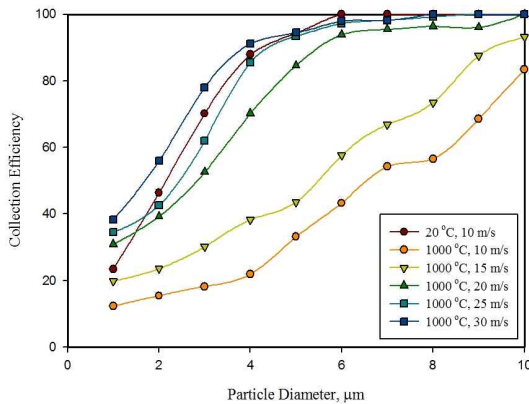


Fig. 5. Collection Efficiency of Each Velocity about 1000 °C.

Table 5. Comparison of Power.

	1,000 °C (10 m/s)	1,000 °C (15 m/s)	1,000 °C (20 m/s)	1,000 °C (25 m/s)	1,000 °C (30 m/s)
Power (W)	7.40	25.21	63.50	133.08	251.46

ΔP 는 사이클론 집진장치의 입구와 출구에서 압력 차이로 계산하였다. 표에서 보는 것과 같이 속도가 높아질수록 압력강하와 유량이 증가하여 동력이 높아지는 것을 볼 수 있으며, 10 m/s와 25 m/s는 약 18배의 동력차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 결론적으로 20 °C에서 10 m/s와 동일한 효율을 내기 위해서는 18배의 동력이 필요하다는 결과를 얻었다.

4. 결 론

사이클론 집진장치에서 유속을 10 m/s로 고정된 상태에서 가스의 온도에 따른 집진효율의 변화에 대한 전산해석을 실시하였다. 전산해석을 실시하기에 앞서 전산해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 Dirgo와 Leith(1990)의 실험과 전산해석 결과를 통해 전산해석의 신뢰성을 확보하였으며 이를 토대로 연구를 진행하였다.

전산해석 방법으로 온도변화에 따른 집진 영향을 평가하였으며 온도의 증가는 집진효율의 감소를 초래하는 결과가 얻어졌다. 이는 온도에 변화에 따른 공기점성의 변화로 외부 소용돌이에서의 평균 유속이 20 °C에서는 11.08 m/s, 1000 °C에서는 8.31 m/s로 차이가 발생하기 때문으로 판단된다.

계산범위의 온도영역에서 상대적으로 집진효율이 가장 높은 20 °C, 10 m/s와 유사한 효율을 가지기 위해 온도 1000 °C에서 필요로 하는 유속에 대한 전산해석을 실시하였다. 그 결과 초기 조건이었던 10 m/s보다 약 2.5배 이상 빠른 25 m/s일 때, 20 °C, 10 m/s와 유사한 집진효율을 나타내었으며, 동력을 계산해본 결과 약 18배의 차이가 나는 것으로 추정할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정원이엔씨의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Iozia, D. L. and Leith, D., "Effect of Cyclone Dimensions on Gas Flow Pattern and Collection Efficiency," *Aerosol Science and Technology*, **10**(3), 491~500(1989).
- Dirgo, J. and Leith, D., "Cyclone Collection Efficiency: Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions," *Aerosol Science and Technology*, **4**(4), 401~415(1985).
- Kim, J. C. and Lee, K. W., "Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones," *Aerosol Science and Technology*, **12**(4), 1003~1015(1990).
- Leith, D. and Mehta, D., "CYCLONE PERFORMANCE AND DESIGN," *Atmospheric Environment*, **7**(5), 527~549(1973).
- Kuo, K. Y. and Tsai, C. J., "On the Theory of Particle Cutoff Diameter and Collection Efficiency of Cyclones," *Aerosol and Air Quality Research*, **1**(1), 47~56(2001).
- FLUENT Inc. FLUENT User's Guide, Ver. 15.0(2013).
- Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, 1st ed., McGraw-Hill, New York(1980).
- Lim, K. S., Kim, H. S. and Lee, K. W., "Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes," *Aerosol Science*, **35**(6), 743~754(2004).
- Xiang, R., Park, S. H. and Lee, K. W., "Effects of cone dimension on cyclone performance," *Aerosol Science*, **32**(4), 549~561(2001).
- Kessler, M. and Leith, D., "Flow Measurement and Efficiency Modeling of Cyclones for Particle Collection," *Aerosol Science and Technology*, **15**(1), 8~18(1991).
- Karagoz, I. and Avci, A., "Modeling of the Pressure Drop in Tangential Inlet Cyclone Separators," *Aerosol Science and Technology*, **39**(9), 857~865(2005).
- Zhao, B., Su, Y. and Zhang, J., "SIMULATION OF GAS FLOW PATTERN AND SEPARATION EFFICIENCY IN CYCLONE WITH CONVENTIONAL SINGLE AND SPIRAL DOUVLE INLET CONFIGURATION," *Chemical Engineering Research and Design*, **84**(12), 1158~1165(2006).