# 고온 작동 싸이클론 유체역학적 거동 전산 연구

# A numerical fluid dynamic study of a high temperature operating cyclone

신미수 · 김혜숙 · 장동순 †
Mi-Soo Shin · Hey-Suk Kim · Dong-soon Jang †

충남대학교 환경공학과
*Department of Environmental Engineering, Chungnam National University*

(2009년 7월 31일 접수, 2009년 11월 12일 채택)

**ABSTRACT :** One thing to note in cyclone operation and design is to minimize the pressure drop with the enhancement of the efficiency of dust collection. This can be facilitated by the detailed resolution of complex fluid flow occurring inside a cyclone. To this end, the main objective of this study was to obtain the detailed fluid dynamics by the development of a reliable computation method and thereby to figure out the physics of dust collection mechanism for more extreme environment caused by high temperature and pressure condition.

First of all, the computer program developed was evaluated against experimental result. That is, the numerical calculation predicts well the data of experimental pressure drop as a function of flow rate for the elevated pressure and temperature condition employed in this study. The increase of pressure and temperature generally affects significantly the collection efficiency of fine particle but the effect of pressure and temperature appears contrary each other. Therefore, the decrease of collection efficiency caused by the high operating temperature mainly due to the decrease of gaseous density can be remedied by increase of operating pressure.

After the evaluation of the program , a series of parametric investigations are performed in terms of major cyclone design or operating parameters such as tangential velocity and vortex finder diameter for dusts of a certain range of particle diameters, etc. As expected, tangential velocity plays the most important effect on the collection efficiency. And the efficiency was not affected significantly by the change of the length of vortex finder but the diameter of vortex finder plays an important role for the enhancement of collection efficiency.

**Key words :** *Cyclone, Numerical study, Pressure drop, Collection efficiency*

**요약 :** 고효율 싸이클론의 설계는 압력강하의 최소화와 집진효율의 최대화를 이루는 것이 중요하다. 본 연구는 고온, 고압 조건하에서 신뢰성 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하여 싸이클론의 집진효율에 영향을 주는 물리적 메카니즘을 연구하는 것이다.

수치 해석적 연구를 통한 고온, 고압 조건에서의 압력강하 계산은 실험데이터와 비교적 잘 일치하였다. 온도와 압력은 일반적으로 집진효율에 중요한 영향을 미치는데 보통 항력에서 가스의 밀도나 점도 등에 영향을 주어 서로 상반되는 결과를 나타낸다. 그러므로 고온 운전에 따른 집진효율의 감소는 고압 조건으로 운전하는 것이 대안이 될 것으로 판단된다.

집진효율에 영향을 주는 인자에 대해 좀 더 세부적인 연구를 위하여 접선방향 속도나 보텍스 파인더의 직경 등과 같은 싸이클론의 설계변수나 운전변수에 따른 연구를 수행하였다. 예상한 바와 같이 접선방향의 속도가 집진효율에 가장 큰 영향을 주었다. 그리고 보텍스 파인더의 직경이 증가할수록 집진효율은 감소하였으며 보텍스 파인더의 길이는 집진효율에 큰 영향을 나타내지 않았다.

**주제어 :** 싸이클론, 수치해석, 압력강하, 집진효율

## 1. 서 론

강한 선회유동을 이용하는 싸이클론 장치는 1940년대부터 현재까지 산업체 전반에 걸쳐 제진기, 연소기, 입자분리 및 입도분석 등 다양한 응용분야를 가지고 있는 반면 압력강하가 심하고 온도 등의 운전조건에 민감하다는 단점을 갖고 있다. 또한 싸이클론 내부에서의 유동은 고상 또는 액상의 입자와 난류의 기체가 결부된 복잡한 3차원 유동문제이므로 입자의 제거 기전에 대한 정확한 이론 규명을 위해서는 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

많은 학자들에 의해 싸이클론에 대한 많은 연구들이 이루어지면서 압력 강하에 대한 경험식들을 제시되었다. 그러나

† Corresponding author : E-mail : p_dsjang@cun.ac.kr Tel : 042-821-6677 Fax : 042-823-8362

이러한 경험식들은 일반적인 상온 상압의 운전조건에서는 실험결과와 잘 맞지만 고온 고압조건에서는 가스의 물리적 특성이 바뀌므로 실제 실험치와 차이를 나타내었다.[1~3)]

본 연구의 목적은 일차적으로 강한 선회를 가진 제진용 싸이클론의 유동에 대한 수치해석용 컴퓨터 프로그램을 개발하여 싸이클론 내부 유동 기작을 확인하는 것이다. 이러한 연구결과를 고온 고압하에서 운전한 싸이클론의 실험치와 결과를 비교하여 프로그램을 검증하고, 그 밖의 싸이클론의 제원이나 운전조건에 따른 집진 효율과 그에 따른 압력손실 등을 정량적으로 규명하고자 하는 것이다.

또한 향후 에너지 발전시설이 필요한 IGCC (Integrated gasification combined cycle)나 PFBC (Pressurized fluidized bed combustion)에서는 아직 실험단계이면서 매우 고가이고 검증 단계에 있는 세라믹 캔들 집진방식을 채택해야 하는 어려움이 있는데 이러한 고온 고압조건하에서 운전이 가능한 싸이클론이라면 IGCC나 PFBC에 적용 가능하여 자원이 부족한 우리나라에 에너지를 효율을 증가 시킬 수 있는 새로운 장치로서의 역할을 하리라 기대한다.

## 2. 수치 해석적 연구 방법

### 2.1. 기체상 지배방정식

본 연구의 대상이 되는 2차원 원통좌표계에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같이 나타내어진다. 이때 종속변수 $\phi$는 단위질량당의 물리량을, $S_\phi$는 질량, 엔탈피, 운동량의 생성항을 나타낸다.[4)]

$$\frac{\partial(\mathrm{p}\vec{u\phi})}{\partial z}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\mathrm{p}\vec{u\phi})=\frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial z})+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\Gamma_\phi\frac{\partial\phi}{\partial z})+\mathrm{S}_\phi \quad (1)$$

싸이클론에 사용한 종속변수 $\phi$와 그에 따른 확산항($\Gamma_\phi$) 및 생성항($S_\phi$)은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

난류 유동장을 해석하기 위하여 속도 성분 $u,\upsilon$, w에 대해 순간 운동방정식을 시간 평균한 값을 이용하였고, $k$-$\varepsilon$ 모델을 적용하였으며, 난류점성계수 $\mu_t$는 아래 식 (2)와 같은 Prandtl-Kolmogorov 관계식에 의해 단위 질량당의 난류에너지 $k$와 난류에너지 소산율 $\varepsilon$을 이용하여 표현하였다.

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

위의 식 (1)의 2차 편미분 방정식은 검사체적에 기초한 유한 차분방법을 사용하였으며 운동량 방정식에 나타나는 속도와 압력의 연계는 SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Eguation Consistent) 알고리즘을 사용하였다. 이산화된 식 (3)의 형식은 선형이지만 종속변수의 함수로 주어지는 선형계수에 내재된 비선형 특성으로 TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)에 의한 반복계산에 의해 해를 구하였다.

$$a_P\phi_P=a_E\phi_E+a_W\phi_W+a_N\phi_N+a_S\phi_S+a_P\phi_P+b \quad (3)$$

$a_E$, $a_W$, $a_N$, $a_S$, $a_P$는 각각 동쪽, 서쪽, 북쪽, 남쪽, 그리고

**Table 1.** $\phi$ and $\Gamma_\phi$ expression for 2-D cylindrical coordinate

| Variables | $\phi$ | $\Gamma_\phi$ | $S_\phi$ |
|---|---|---|---|
| Axial Momentum | $u$ | $\mu_{eff}$ | $\frac{a}{ax}\left(\mu_{eff}\frac{au}{ax}\right)+\frac{1}{r}\frac{a}{ar}\left(\mu_{eff}r\frac{av}{ax}\right)-\frac{ap}{ax}$ |
| Radial Momentum | $v$ | $\mu_{eff}$ | $\frac{a}{ax}\left(\mu_{eff}\frac{au}{ar}\right)+\frac{1}{r}\frac{a}{ar}\left(\mu_{eff}r\frac{av}{ar}\right)-2\mu_{eff}\frac{v}{r^2}+\frac{\rho w^2}{x}-\frac{ap}{ar}$ |
| Tangential Momentum | $w$ | $\mu_{eff}$ | $-\left(\frac{\mu_{eff}}{r^2}+\frac{\rho v}{r}+\frac{1}{r}\frac{a\mu_{eff}}{ar}\right)w$ |
| Kinetic Energy | $k$ | $\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$ | $G_{k1}-\rho\varepsilon$ |
| Kinetic Energy Dissipation rate | $\varepsilon$ | $\frac{\mu_{eff}}{\sigma_s}$ | $\frac{\varepsilon}{k}(C_1C_{k1}-C_2\rho\varepsilon)$ |
| Temperature | T | $\frac{k}{C_p}$ | - |

$G_{k1}=2\mu_{eff}\left[\left(\frac{au}{ax}\right)^2+\left(\frac{av}{ar}\right)^2+\left(\frac{v}{r}\right)^2\right]+\mu_{eff}\left[\left(\frac{au}{ax}\right)^2+\left(r\frac{a}{ar}\left(\frac{w}{r}\right)\right)^2+\left(\frac{au}{ar}+\frac{av}{ax}\right)^2\right]$

$G_1=2.44$, $G_2=1.92$, $G_\mu=0.92$, $\sigma_k=0.9$, $\sigma_g=1.22$

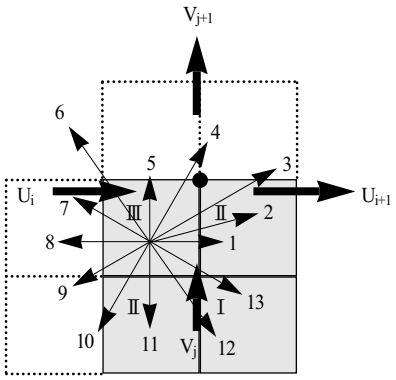



**Fig. 1.** Schematic droplet trajectories in a control volume for the accuracy and efficiency of the calculation.

주요 격자점에서의 영향력 강도를 계수로 나타낸 것이다.

## 2.2. 입자 지배방정식

입자의 지배방정식 유도시에는 입자궤적 계산에 유리한 Lagrangian 방법을 택했으며 난류에서의 입자의 궤적 계산은 항력뿐만 아니라 부력, virtual mass 효과, Basset 힘, 입자의 회전 등이 관계된다.

원통 좌표계를 사용할 경우에는 항력과 중력이외에 단위질량당의 원심력과 전향력 효과가 고려되어야 하나 이는 좌표변환시에 자동적으로 유도된다. 원통 좌표계의 액적 궤적 추적을 위한 운동방정식은 아래와 같은 Lagrangian 형태로 나타내어진다.

$$\frac{du_p}{dt} = a(u_g - u_p) \tag{4}$$

$$\frac{dv_p}{dt} = a(v_g - v_p) + \frac{w_p^2}{r_p} \tag{5}$$

$$\frac{dw_p}{dt} = a(w_g - w_p) - \frac{v_p w_p}{r_p} \tag{6}$$

여기서, $a = \dfrac{18\mu_g C_D}{p_p d_p^2}\dfrac{R_e}{24}$

여기서 아래첨자 p와 g는 입자상과 가스상을 의미하며 Re는 레이놀즈 수이며 $C_D$는 항력계수로 Wallis에 의해 주어진 식을 사용하였다.[5] 액적의 궤적 추적을 위한 격자점에서의 운동양상은 검사체적을 4등분으로 분류하여 각각의 영역에서

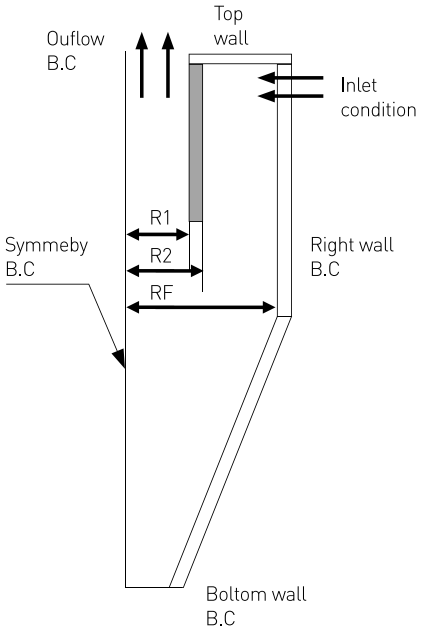



**Fig. 2.** Boundary conditions of cyclone.

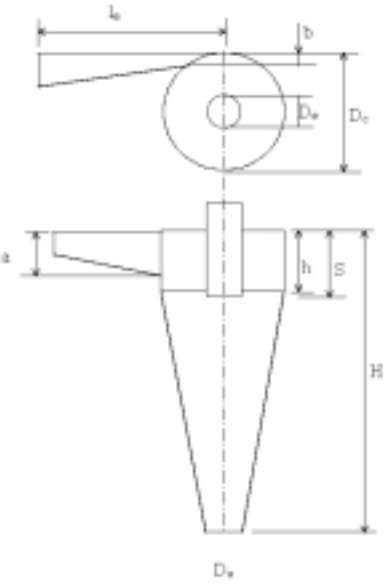



**Fig. 3.** Cyclone dimensions.

Fig. 1과 같이 가능한 13개의 추적을 가상하였다.

싸이클론의 수치 해석을 위한 경계조건은 Fig. 2에 나타내었다. 입구에서는 난류강도 10%를 가정하였고 벽에서는 점성유체에 대한 no slip조건을 적용하였으며, 벽에 평행한 속도성분에 대해서는 벽에 의한 점성효과를 고려하여 유효점성계수를 정의한다. 난류에너지 $k$와 난류에너지 소산율 $\varepsilon$은 벽근처에서 난류에너지 생성과 소멸이 평형을 이룬다는 가정하에 유도된 구체적인 값으로 고정한다.

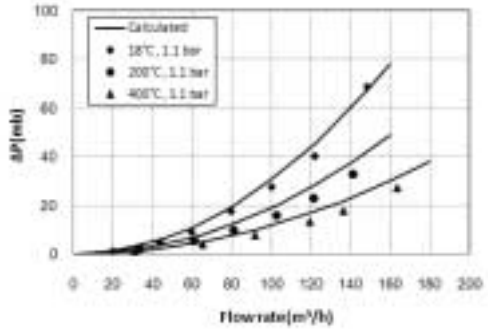



**Fig. 4.** Measured and calculated pressure drops as function of flow rate for the condition of elevated temperature.

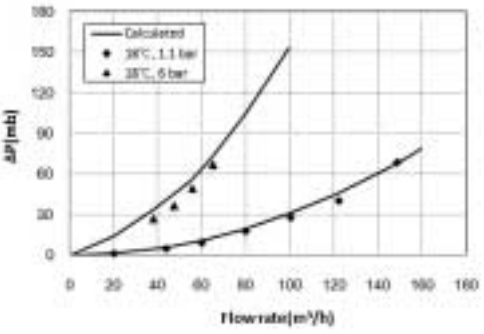
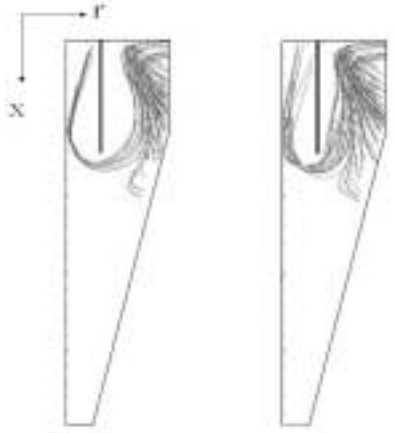



**Fig. 5.** Measured and calculated pressure drops as function of flow rate for the condition of elevated pressure.

## 3. 연구 결과

먼저 개발한 프로그램 검증을 위하여 싸이클론 내의 압력강하 결과를 실험데이터와 비교하여 검증을 수행하였다. 프로그램 검증에 사용한 실험 데이터는 독일 Braunschweig 공과대학의 화학공정연구실에 설치되어 있는 싸이클론을 이용하여 고온 및 고압의 조건에서 압력강하와 집진효율에 대하여 수행한 연구결과를 활용하였다. 입자의 집진효율은 싸이클론의 입구와 출구에서 가스내의 입자크기 분포와 입자농도




(a) T=15℃($\eta$=90%) (b) T=400℃($\eta$=84%)

**Fig. 6.** Particle trajectory of various particles (1~10 ㎛) with changing temperature (,P=1.1bar, Q=60 m³/h)

를 측정하여 산정할 수 있다. 이들 데이터는 2대의 'light scattering aerosol counter'를 컴퓨터에 연결하여 동시에 측정 하였다.[6)]

수치해석과 실험에 수행한 싸이클론의 제원은 Fig. 3과 Table 2에 나타내었다.

Table 3은 수치해석에 사용된 운전조건을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 위의 싸이클론에 대해 일정 압력조건에서 유량변화 및 온도변화에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. 결과에 나타나 있듯이 유량이 증가함에 따라 유입속도가 증가하므로 압력강하는 증가하였다. 온도증가에 따른 유량증가의 영향을 배제하기 위해 유량은 온도에 따라 보정하였다. 이 경우 온도가 증가함에 따라 압력강하는 감소하였는데 이는 온도가 증가함에 따라 가스의 밀도가 감소하고 가스의 동점도가 증가하는 데서 기인하는 것이다. 실험결과와 계산결과가 비교적 잘 일치하였으며 온도에 대한 영향을 잘 반영하고 있으며 온도가 높을 때 수치해석과 실험결과가 더욱 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

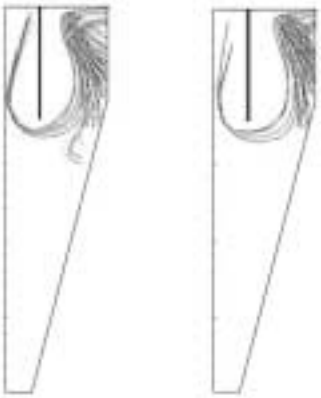
Fig. 5는 일정온도에서 입구에서 주입되는 압력 변화에 따

**Table 2.** Cyclone dimensions

| Geometry | |
|---|---|
| le [mm] | 245 |
| Dc [mm] | 150 |
| De [mm] | 50 |
| Du [mm] | 50 |
| H [mm] | 387 |
| h [mm] | 104 |
| S [mm] | 110 |
| a [mm] | 80 |
| b [mm] | 20 |

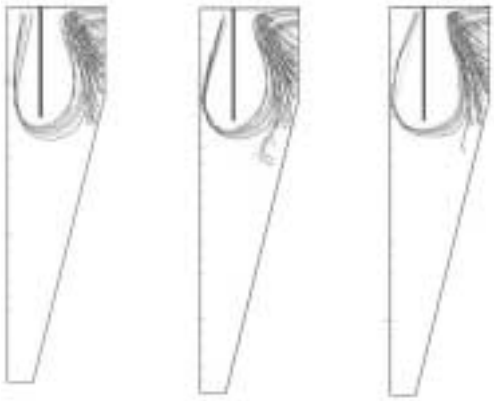
**Table 3.** The specification of cyclone operating condition used in calculation

| Variables | |
|---|---|
| Flow rate (m³/h) | 10~160 (reference flow rate : 60) |
| De/Dc | 0.2, 0.33, 0.6 |
| S/Dc | 0.2, 0.5, 0.73, 1.0 |
| Tangential velocity (vane algle) | 1.01 m/s (30°), 1.75 m/s (45°), 3.03 m/s (60°) |
| Temperature (℃) | 15~400 |
| Pressure (bar) | 1~6 |
| dp (㎛) | 1~10 |



(a) P=1.1bar($\eta$=90%) (b) P=6.0bar($\eta$=93%)

**Fig. 7.** Particle trajectory of various particles (1~10 ㎛) with changing pressure (,T=15℃, Q=60 m$^3$/h)



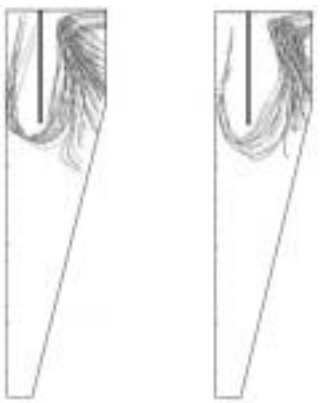
(a) Q=40 m$^3$/h($\eta$=89%) (b) Q=60 m$^3$/h($\eta$=90%) (c) Q=80 m$^3$/h($\eta$=91%)

**Fig. 8.** Particle trajectory of various particles (1~10 ㎛) with changing flow rate (T=15℃, P=1.1bar)

른 압력강하를 나타낸 것이다. 압력이 증가할수록 압력강하가 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6~Fig. 9는 고온 고압 조건 및 유량변화에 따른 집진효율의 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 입자는 각각 1~10 $\mu$m의 10개의 입자그룹을 가정하고 싸이클론 입구 너비를 동일하게 10등분하여 고르게 주입된 것을 가정하였다. 각 주입위치마다 10개의 입자를 주입하여 총 100개의 입자를 주입하여 개략적인 집진효율의 경향을 확인해 보고자 하였다.

Fig. 6은 동일한 유량, 압력 하에서 온도의 변화에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 온도가 증가함에 따라 압력강하는 감소하였지만 결과에 나타나 있듯이 집진효율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 처리가스의 온도가 높아짐에 따라 입자의 집진효율이 감소하는 것은 온도가 높아짐에 따라 기체의 밀도는 작아져 상대적으로 원심력이 감소하게 되고 기체 점성의 증가에 따라 직경방향의 속도 감소에 기인하는 것이다. 온도변화에 따른 물성 변화의 효과를 검토하기 위해 직경방향의 속도



(a) T=400℃, P=1.1bar($\eta$=84%) (b) T=400℃, P=6.0bar($\eta$=88%)

**Fig. 9.** Particle trajectory of various particles (1~10 ㎛) with high temperature and pressure (Q=60 m$^3$/h).

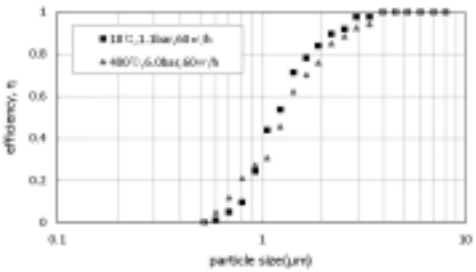



**Fig. 10.** The combined effect of increased pressure and temperature on the measured collection efficiency as a function of particle size.

를 나타내는 식 (7)에 아래의 공기저항계수($C_D$)를 나타내는 식 (8)을 대입하여 공기물성에 관한 식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

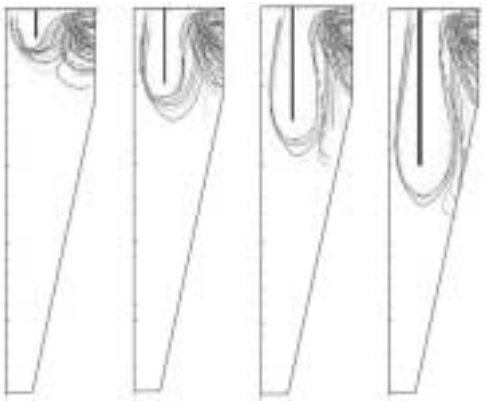
$$\frac{d\overrightarrow{\upsilon_p}}{dt} = a(\upsilon_g - \upsilon_p) + \frac{w_p^2}{r_p} \tag{7}$$

$$a = \frac{18\mu_g C_D}{\rho_p d_p^2}\frac{Re}{24} \tag{8}$$

$$C_D = 0.22 + \frac{24}{Re}[1+0.15\,(Re)^{0.6}]\frac{dV_p}{dt} \sim ap_g + b\left(\frac{p_g}{\mu_g}\right)^{0.6} \tag{9}$$

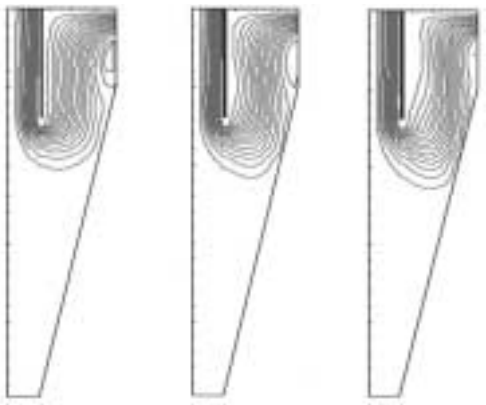
식 (9)에 나타나 있듯이 처리가스 온도가 높아짐에 따라 공기의 역학점성계수 $\mu_g$는 커지고 공기의 밀도 $P_g$는 작아져 분진의 직경방향 속도 $V_p$는 작아진다.

Fig. 7은 압력변화에 따른 입자의 집진효율을 나타낸 것이다. 압력이 증가함에 따라 압력강하는 증가하였지만 입자의



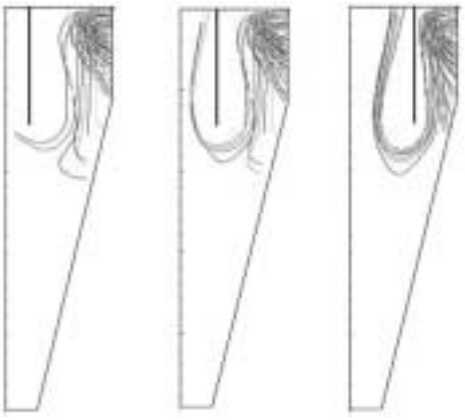
(a) S/Dc=0.2 (b) S/Dc=0.5 (c) S/Dc=0.73 (d) S/Dc=1.0

**Fig. 11.** Trajectory of particles (1~10 ㎛) with the increase of S/Dc.



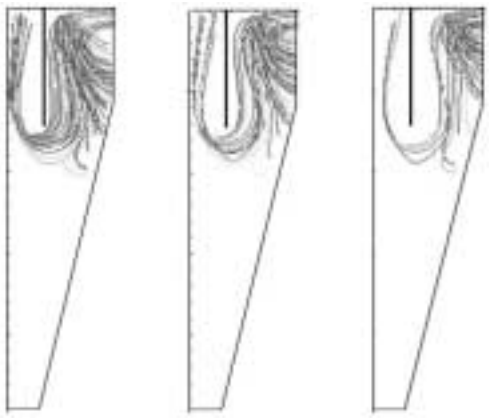
(a) w=1.57 m/s(30°) (b) w=2.72 m/s(45°) (c) w=4.71 m/s(60°)

**Fig. 13.** Stream line Contours with the increase of tangential velocity.



(a) De/Dc=0.2 (b) De/Dc=0.33 (c) De/Dc=0.6

**Fig. 12.** Trajectory of particles (1~10㎛) with the increase of De/Dc.



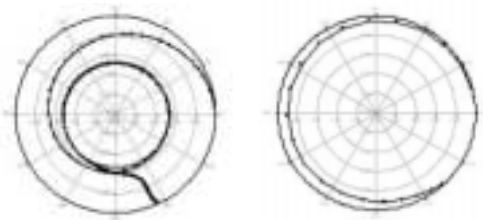
(a) w=1.57 m/s(30°) (b) w=2.72 m/s(45°) (c) w=4.71 m/s(60°)

**Fig. 14.** Trajectory of particles (1~10 ㎛) with the increase of tangential velocity.

집진효율은 증가하였다. Fig. 8은 유량 증가에 따른 입자의 집진효율을 나타낸 결과인데 유량이 증가할수록 유속증가에 따라 원심력이 증가하므로 결과적으로 집진효율이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 압력 및 온도변화에 따른 입자의 궤적을 통한 집진효율을 나타낸 것이다. 압력증가는 입자의 집진효율을 향상시키고 온도증가는 입자의 집진효율을 감소시키는 방향으로 작용하므로 이는 서로 상반된 영향을 나타내는 인자들로 인해 일관된 결과를 나타내지 않았다. 그러나 고온의 조건에서 집진효율이 현저히 감소하는 부분은 상압이 아닌 고압의 조건에서 운전할 때 어느 정도 보완이 되는 결과를 얻을 수 있었다. 고온, 고압 조건에서 좀 더 세부적으로 입경별 집진효율을 살펴보기 위해 실험결과를 Fig. 10에 나타냈는데 입자가 1 ㎛ 이하의 작은 입자 영역에서는 압력증가에 따른 집진효율의 증가가 지배적으로 나타났고, 1 ㎛ 이상의 입자 크기 영역에서는 온도에 따른 영향이 지배적으로 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 싸이클론의 제원(dimension)에 따른 일반적인 수치해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 11은 출구 보텍스 파인더의 길이 변화에 따른 입자의 궤적을 나타낸 결과이다. 결과에 나타나 있듯이 보텍스 파인더의 길이가 길어질수록 집진효율이 다소 증가하였다. 그러나 $S/D_c$의 비가 0.5 이상이 되면 집진효율에 별로 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그러나 지나치게 짧을 때는 집진효율이 낮아지는 것으로 나타났다. Fig. 12는 싸이클론 출구 직경(보텍스 파인더 직경) 변화에 따른 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 출구의 직경이 증가함에 따라 집진효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 보텍스 파인더 직경 증가로 인한 보텍스 파인더 내부로의 유입 강화와 원심운동의 증가 등의 복합적인 영향으로 설명할 수 있다. 이러한 비슷한 현상은 Bryant et al 의 논문에도 나



(a) w=1.57 m/s(30°) (b) w=4.71 m/s(60°)

**Fig. 15.** Trajectory of particle (5 $\mu$m) with the change of tangential velocity in $r$-$\theta$ plane.

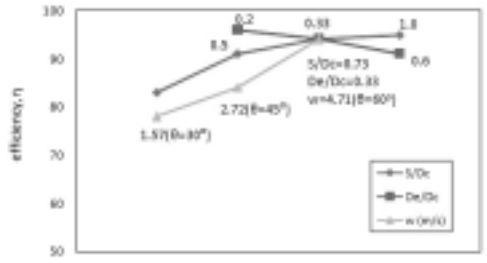



**Fig. 16.** Calculated fractional collection efficiencies as a function of $\frac{S}{D_c}$, $\frac{D_e}{D_c}$, and $w$

타나 있는데 출구부분의 직경이 감소함에 따라 집진효율이 증가하였다고 보고하였다.[7~9]

Fig. 13와 Fig. 14는 접선방향 속도(tangential velocity) 변화에 따른 유동분포와 입자궤적을 나타낸 것이다. 접선방향 속도가 클수록 원심력이 강화되어 집진효율이 매우 좋아지는 것을 볼 수 있다. 접선방향의 속도가 증가할수록 유동의 분포도 싸이클론 벽쪽에 가깝게 분포되어 집진 가능성을 높이고 있는 것을 볼 수 있다. 입자궤적은 주입각이 60° 정도로 강한 선회 유동인 경우 1 $\mu$m 이하의 입자도 포집되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 접선방향의 유입속도가 싸이클론의 집진효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 작용하는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 입자의 궤적 특성을 좀 더 명확하게 살펴보기 위해서 r–$\theta$ 방향으로 살펴본 것이다. 접선방향의 속도가 클수록 입자가 원심력을 크게 받아 벽쪽에 가깝게 회전하다가 벽에 부딪쳐 쉽게 포집되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 16은 싸이클론의 몸통직경에 대한 다른 제원의 상대적인 비를 바탕으로 개략적인 집진효율을 계산한 결과이다. 그림에 나타나 있듯이 접선방향의 속도가 증가할수록 집진효율이 현저히 증가하였고, 보텍스 파인더의 길이가 증가할수록 집진효율이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 또한 싸이클론의 출구 직경이 증가하면 집진효율이 저하되는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 수치해석적 연구를 수행하여 프로그램을 비교적 성공적으로 검증할 수 있었으며, 싸이클론 설계시 고려되어야 할 가장 중요한 사항인 압력강하와 집진효율에 대하여 결과를 얻을 수 있었다. 압력강하는 유량이 증가할수록 온도가 감소할수록 입구 압력이 증가할수록 증가하였으며, 집진효율은 유량이 증가할수록 온도가 감소할수록 압력이 증가할수록 증가하였다.

대부분의 공정에서 발생하는 고온의 배기가스 중 입자상 물질 집진시 집진효율이 급격히 떨어지는 것은 고압으로 운전하면 일부 극복이 될 것으로 판단된다.

싸이클론의 일반적인 설계 표준에 대한 계산결과를 살펴보면 싸이클론의 출구직경이 증가할수록 집진효율은 감소하였으며, 보텍스 파인더의 길이는 집진효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 운전변수에 따른 영향을 살펴보면 여러 가지 변수 중 접선방향의 주입속도가 싸이클론의 집진효율에 가장 큰 영향을 나타내는 것으로 나타났다.

향후 고온 고압 조건에서 안정적 집진효율을 갖는 싸이클론의 연구를 지속한다면 산업용 보일러의 고온 영역, 석탄가스화 복합발전 플랜트나 가압유동층 복합 발전 기술 등 차세대 석탄이용 발전시스템에 고가의 세라믹 캔들 필터 등의 대용으로 사용 가능하리라 판단된다.

**KSEE**

## 사 사

본 연구는 2008 충남대학교 학술연구비 지원사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Morweiser, M. & Bohnet, M., "Hot gas cleaning with aerocyclones under pressure conditions," PARTEC 95, 3rd European Symposium, (1995)
2. Triesch, O. & Bohnet, M., "Measurement and CFD prediction of velocity and concentration profiles in a deceleration gas-solid flow," World Filtration Congress 8, (2000).
3. Bohnet, M. & Morweiser, M., "In-line measurement of cyclone separation efficiency using light scattering aerosol counters," World Filtration Congress 8, (2000).
4. Patankar, S. V., Numerical heat transfer and fluid flow, McGraw-

Hill Company (1980).

5. Wallis, G. B., "One-dimensional and two-phase flow," McGraw-Hill, New York(1969).
6. Morweiser, M. & Bohnet, M., "Influence of operating conditions on grade efficiency and pressure drop of aerocyclones," Third International Conference on Multiphase Flow, ICMF '98, (1998).
7. Rongbiao Xiang, S. H., Park, K. W., and Lee, K. W., "Effects of cone dimension on cyclone performance," Aerosol Science, 32, 549-561 (2001).
8. Zhu, Y., and Lee, K. W., "Experimental study on small cyclones operating at high flow rates," Journal of Aerosol Science, 30, 1303-1315 (1999).
9. Bryant, H. S., Silverman, R. W.&Zenz, F. A., "How dust in gas affects cyclone pressure drop," Hydrocarbon Processing,62, 87-90,(1983).