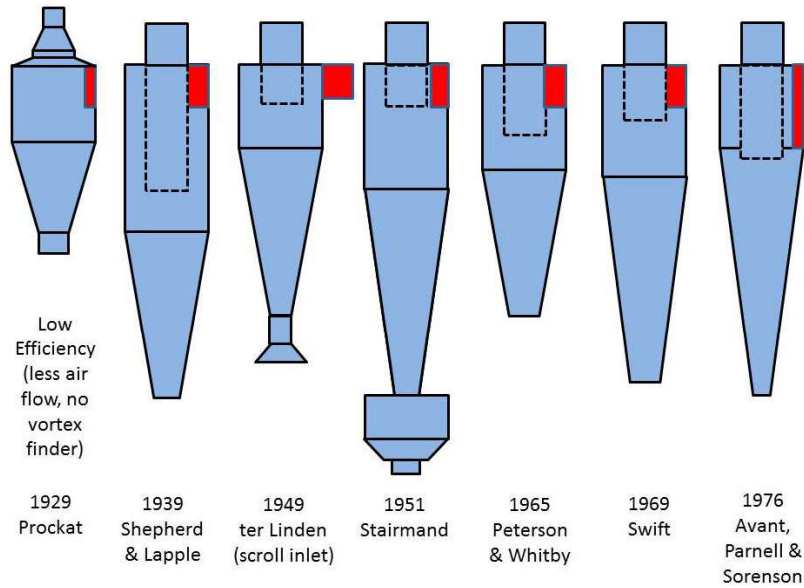


# 사이클론(Cyclone)

사이클론의 특유의 기하학적 형상과 유입되는 유체흐름의 운동에너지에 의해 발생하는 원심력으로 유체흐름에 혼합되어 실려온 입자들을 분리하는 장치로써 다양한 산업분야에서 Particles Collector, Separator 또는 Classifier로 폭 넓게 사용되고 있습니다.

## 1. 사이클론의 역사



그림에서와 같이 초기 모델인 Prockat 이후 100여년 동안 기본형태와 기능은 크게 변하지 않았습니다.

1939년 Shepherd & Lapple의 디자인이 도입된 이래로 다양한 모델들이 혁신적인 성능차이도 보이지 않고 현재까지 사용되고 있습니다.

뉴메틱으로 재료를 취급하는 경우가 증가하면서 대두되었던 공기오염문제의 해결을 위해 개발된 Shepherd & Lapple 모델은 사이클론의 효율이 유입속도에 비례하는 원리에 구성요소의 크기에 따른 효율향상을 최초로 보여주었습니다.

사이클론의 Barrel(Cylinder)와 Cone의 높이가 Barrel 직경(D)의 2배가 되는 2D2D 모델로 20미크론 이상의 입자들에 대한 분리효율이 100%가 된다는 것을 다수의 전문가들에 의해 1968~1972년 즈음에 실증적으로 확인 되었습니다.

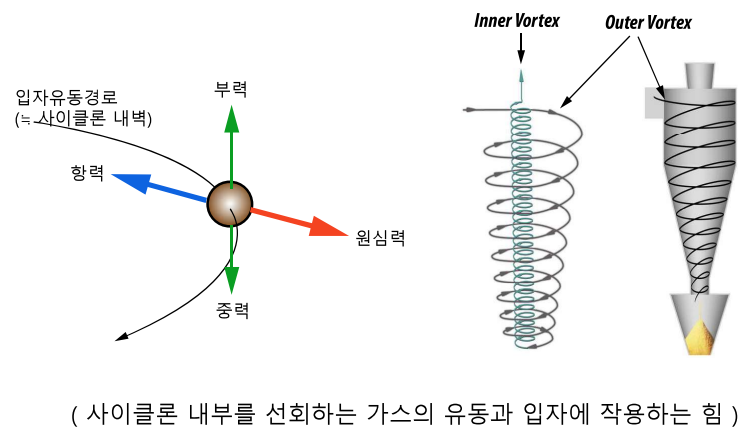
## 2. 사이클론에서의 입자거동 및 유동 해석

항력 :  $F_D = 3\pi\mu d V_r$

원심력 :  $F_C = m \frac{V_t^2}{r} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_p \frac{V_t^2}{r}$

부력 :  $F_B = V_p \rho_f \frac{V_t^2}{r} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_f \frac{V_t^2}{r}$

$V_i$  : 유입속도,  $r$  : 기체의 선회반경(= 사이클론 바렐의 반경)  
 $V_t$  : 접선속도(Tangential Velocity),  
 $V_r$  : 원주선회속도(Radial Velocity)  
 $d$  : 입자의 직경,  $V_p$  : 입자의 체적



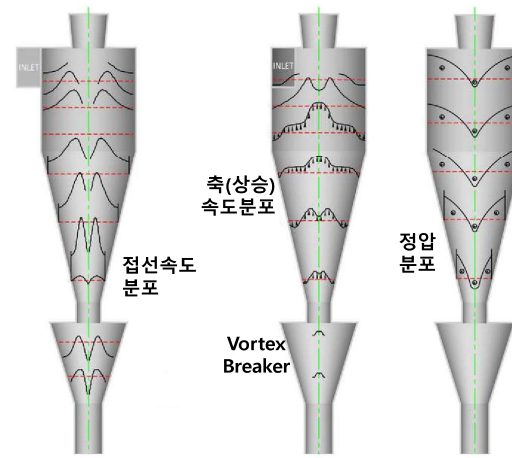
(사이클론 내부를 선회하는 가스의 유동과 입자에 작용하는 힘)

사이클론 내부로 유입된 입자들의 원주방향 운동은 뉴턴의 운동 제2법칙에 의해 입자에 작용하는 모든 힘의 합은 같아지는 것으로 정의될 수 있습니다. 반경속도가 원심력과 부력을 상쇄할 만큼의 충분한 항력을 발생시키는 입자종말속도(Particle Terminal Velocity)에 도달하게 되면 가속도가 0가 되어 입자는 Outer Vortex를 타고 하강하게 됩니다.

$$F_C = F_D + F_B \rightarrow \frac{\pi d^3}{6} \rho_p \frac{V_t^2}{r} = 3\pi\mu d V_r + \frac{\pi d^3}{6} \rho_f \frac{V_t^2}{r} \rightarrow d^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_f)} \left( \frac{r}{V_t^2} \right) V_r$$

사이클론으로 유입된 기체의 흐름이 중앙 배출구를 향하여 균일한 유동을 하는 것으로 가정하고 기체의 선회반경이 사이클론 바렐의 반경과 같아지는 것( $r=D/2$ )으로 가정한다면, 유입속도  $V_i = V_t$ (접선속도), 기체유동률  $q = 2\pi r L_b V_r$ ( $L_b$  = 사이클론 바렐의 길이)에서 원주선회속도  $V_r$ 을 구할 수 있어 상기식의 입자직경  $d$ 를 계산할 수 있습니다.

이때 계산되는 입자직경  $d$ 는 사이클론에서 분리될 수 있는 임계직경으로 이 값보다 작은 입자들은 분리되지 않고 기체와 함께 배출구로 빠져나가며 이 값보다 큰 모든 입자들은 사이클론에서 기체와 분리되는 것으로 보는 이론적 효율의 기준되는 직경입니다. 실제 효율상의 임계직경과는 다소간의 차이를 나타내므로 설계과정에서 참고값으로 고려할 뿐입니다.



표준형 사이클론의 종류별 치수비	사이클론 종류					
	고효율		재래식		고풍량	
	Stairmand	Swift	Lapple	Swift	Stairmand	Swift
D/D, Barrel의 직경	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
H/D, 인입구 높이	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
W/D, 인입구 폭	0.2	0.21	0.25	0.25	0.325	0.35
De/D, 유체출구 직경	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
S/D, Vortex Finder's length	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Lb/D, Barrel의 길이	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Lc/D, Cone의 길이	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Dd/D, 입자배출구 직경	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

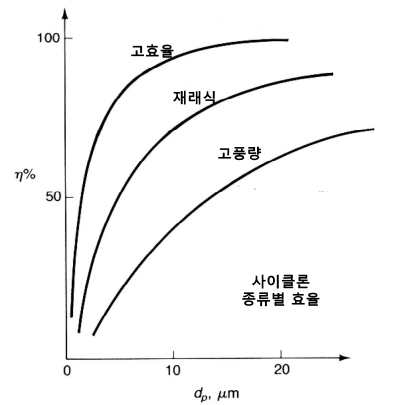
## 3. 사이클론 기본설계

- 사이클론 효율에 작용하는 2대 항목 : 입자체류시간, 입자의 체류시간
- 사이클론 성능의 2대 척도 : 압력강하, 입자크기별 효율

1) 입자체류시간( $\Delta t$ ) : Gas Residence Time, 가스가 선회하강까지 소요되는 시간(sec)

$$\Delta t = \pi D N_e / V_i \quad \leftarrow \quad N_e = \frac{1}{H} \left( L_b + \frac{L_c}{2} \right)$$

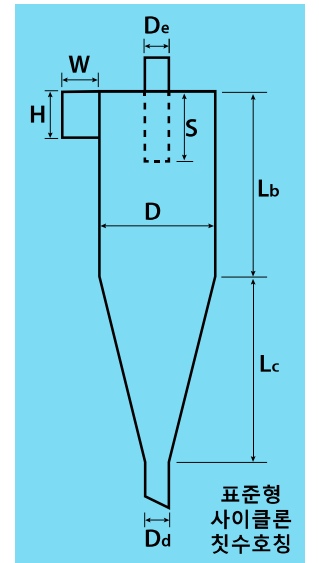
$N_e$  : 유입된 가스가 Outer Vortex로 사이클론 하단까지 내려가는 회전수  
 $V_i$  : 유입속도(m/s) =  $Q/WH$  ( $Q$  : 유입풍량( $m^3/s$ ),  $WH$  : 유입구 단면적( $m^2$ ))  
 $D$  : 사이클론 바렐의 직경(m),  $L_b$  : 바렐의 길이(m),  $L_c$  : 콘의 길이(m)



2) 입자종말속도( $V_{ter}$ ) : 원주방향의 입자침강속도(m/s)

$$V_{ter} = \frac{d^2(\rho_p - \rho_f) V_i^2}{9\mu D} \quad \leftarrow \quad \begin{matrix} d : \text{입자직경}, & \rho_p : \text{입자의 밀도}(kg/m^3) & V_i : \text{유입속도}(m/s) \\ \rho_f : \text{가스의 밀도}(kg/m^3) & & \mu : \text{가스의 점도}(kg/m.s) \end{matrix}$$

입자종말속도는 입자크기( $d$ )의 함수입니다. 사이클론에 유입되는 가스와 입자의 유동을 레이놀즈수가 작은 구상의 입자에 작용하는 원심력과 항력(Drag Force :  $F_D = 3\pi\mu d V_r$ )이 평형을 이루는 Stokes Flow로 가정하면 입자에 작용하는 중력과 부력의 평형에서는 가스의 점도가 낮고 입자와의 밀도차이가 매우 커서 부력은 거의 무시할 수준인 관계로 입자의 중력에 따라 등속 침강하게 됩니다.



3) 50%-Cut Diameter( $d_{pc}$ )에 의한효율( $\eta_j$ ) 계산

$$\eta = \frac{\sum \eta_j m_j}{M} \quad \leftarrow \quad \eta_j = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{pc}}{d_{pj}} \right)^2} \quad \leftarrow \quad d_{pc} = \left[ \frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_f)} \right]^{0.5}$$

$d_{pc}$  : 50% 효율로 수집되는 입자의 직경(m),  $\eta_j$  : j번째 크기범위에 드는 입자들의 수집효율( $0 < \eta_j < 1$ )  
 $d_{pj}$  : j번째 크기범위에 해당되는 입자의 직경( $\mu m$ ),  $m_j$  : j번째 크기범위에 드는 입자들의 질량(kg)  
 $\eta$  : 목표크기 입자의 수집효율( $0 < \eta < 1$ ),  $M$  : 입자들의 총질량

Lapple(1951)은 사이클론의 실용적인 효율계산을 위해 50%효율로 수집되는 입자들의 직경인 50%-Cut Diameter( $d_{pc}$ )를 계산하기 위해 반경험적인 관계성과 특정크기의 입자에 대한 수집효율을 예측하기 위해 재래식 표준 사이클론에 대한 보편적인 곡선을 개발하였습니다. 이후 입자크기 분포를 알고 있다면 컴퓨터를 이용하기에 편리하고 Lapple이 개발한 이 관계성을 보다 정확하게 계산할 수 있는 대수식을 Theodore & Depaola(1980)가 j번째 입자크기 범위에서 있는 입자들의 수집효율( $\eta_j$ )계산식으로 수정하였습니다.

4) 압력강하 : Shepherd & Lapple's Design의 식에 의한 계산

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_f V_i^2 H_v \quad H_v = K \frac{HW}{D_e^2} \quad \leftarrow \quad \begin{matrix} \text{유입속도수두로 압력강하를 표현한 Shepherd \& Lapple의 계산식(무차원, 상수)} \\ K : \text{사이클론 종류 설정과 운전조건에 따른 상수(일반적인 접선유입구의 경우 K=16)} \end{matrix}$$

5) 사이클론의 수집효율에 미치는 변수들

- 사이클론의 기하학적 제원(Cyclone Geometry)
- 사이클론에 유입되는 풍량(Flow Rate of Gas)
- 유입입자의 밀도(Density of Particle)
- 유입가스의 점도(Viscosity of Gas)
- 유입입자의 부하(Dust Load)