

## 싸이클론 집진장치 연구 동향

### Cyclone Dust Collector

김 용 진  
Y. J. Kim

한국기계연구원 공조기기실 선임연구원



- 1959년생
- 열유체 분야의 에어로졸 입자 운동학을 전공하였으며, 공기청정과 집진, 탈황/탈질 시스템 등의 대기오염방지기에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 서 론

싸이클론 집진기는 구조가 간단하고 설치원가 및 운전비가 저렴하기 때문에 관성력을 이용하여 분진을 처리하는 가장 대표적인 장치이다. 현재 싸이클론은 보건위생 분야에서 호흡에 의해 인체에 흡입이 가능한 Submicrometer 크기의 입자를 집진하는 본체직경 10mm이하에서 부터, 각종 산업공정에서 배출되는 오염가스로부터 입자상 물질을 집진하는 7~8 Meters의 크기로 다양하게 적용되고 있다. 그런데, 대부분의 관성력 이용 집진장치와 마찬가지로 이러한 싸이클론 집진장치는 미세입자의 집진에는 효과적이지 못하며, 중간입자 또는 큰 입자의 경우에 효과적인 집진이 가능하므로 전기집진기 또는 여과포 집진장치의 수명향상을 위한 전처리용으로 사용되고 있다.

그러나, 최근에는 싸이클론 내부의 유동 구조 변경 및 전기효과등을 통하여 미세입자의 집진에서도 고효율화에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있는데, 여기서는 이러한 싸이클론의 집진원리와 고효율화 연구 방안에 관하여 기술하고자 한다.

#### 2. 싸이클론 집진 기구(Mechanism)

##### 2.1 싸이클론 내부의 선회류

그림 1에 접선유입식 싸이클론에서의 가스선회류를 표시하고 있다. 유입가스는 점선으로 표시한 바와 같이 회전되고, 임의의 반경  $r$ 에 있는 P점에서 가스의 속도  $v$ 는 원주속도  $v_\theta$ , 축방향성분  $v_z$  및 반경방향 성분속도  $v_r$ 로 되며, 원심력에 의한 입자의 분리에 최대의 영향을 주는 것은 접선방향속도  $v_\theta$ 이다. 중앙부분 와류의 선회류는 자유와류(Free Vortex)라고 부르며,  $n$ 은 선회속도지수(0.5~0.7)로써  $v_\theta r^n = C_0$ 로 나타난다. 한편 실선으로 표시되는 상승류는 강제와류(Forced Vortex)로 부르며,  $\omega$ 는 반경  $r$ 에 무관한 일정한 각속도일 때  $v_\theta = r\omega$ 로 표시된다.

선회가스 유동중의 입자가 원심력에 의하여 분리되는 한계는 강제와류와 자유와류의 경계면 주위의 가상원통면에 존재한다. 실제로 가상원통면의 반경  $r_c$ 는 시간적, 공간적으로 변동하는데, 여기서  $r_c$ 는 그들의 평균값으로 생각하고, 분리한계 입자경을  $d_{pc}$ , 가스유동의 원주속도를  $v_\infty$ , 입자의 직경을  $d_p$ , 그리고 입자밀도  $\rho_p$ 에 비하며

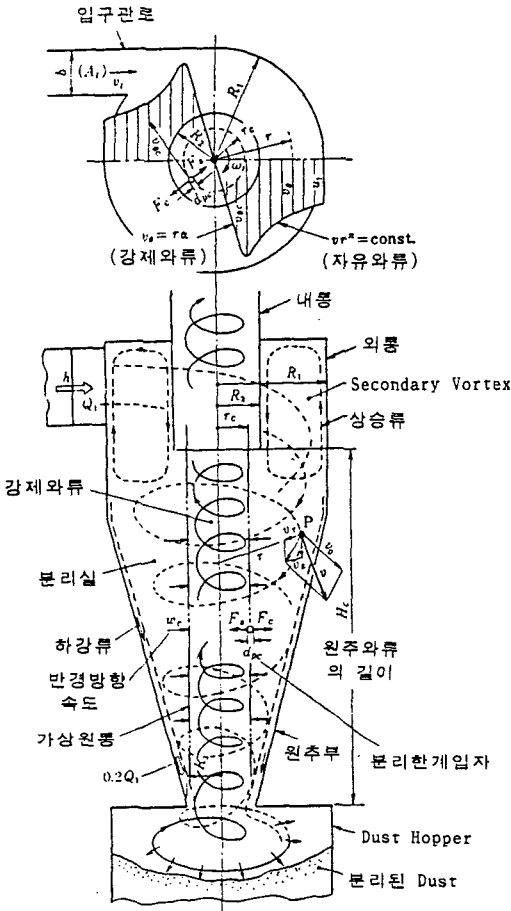


그림 1 사이클론 내의 선회유동

기체밀도를 생략할 때 입자의 작용하는 바깥방향의 원심력  $F_c$ 는 다음식으로 표현된다.

$$F_c = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{v_{\alpha}^2}{r_c} \dots \dots \dots (1)$$

한편,  $r_c$ 에서의 선회류의 안쪽방향의 반경방향 속도 성분을  $v_{rc}$ 라고 하면,  $v_{rc}$ 도 또한 축방향에 따라 그 크기가 달라질 뿐만 아니라 같은 위치에서도 시간에 따라 변동하기 때문에 그 평균값으로 표시한다. 처리가스 유량을  $Q_i$ , 가상원통의 높이(원주와류의 길이)를  $H_c$ 라고 하면,  $v_{rc}$ 는 다음식으로 표현되는데,

$$v_{rc} = \frac{Q_i}{2\pi r_c H_c} \dots \dots \dots (2)$$

즉, 이  $v_{rc}$ 에 의하여 입자를 회전시켜 바깥으로 밀어낸다. 가스유동에 의한 입자의 항력  $F_s$ 는 가스의 점도를  $\mu$ 라고하면 입자가 스토크 영역에 있을 때 다음식으로 표현되는데,

$$F_s = 3\pi\mu d_p v_{rc} \dots \dots \dots (3)$$

이것과의 방향이 서로 다른 반경방향의 힘이 평형이 되는 입자, 즉,  $F_c = F_s$ 의 조건을 만족하는 입자는 균형을 이루어  $r_c$ 의 원주상을 회전하게 된다. 그러나, 그것은 시간적인 평균치로 생각되어지며, 유동이 난류로 될때는 시간에 따라  $F_c > F_s$ , 또는  $F_c < F_s$ 로 된다.

시간 평균값으로서  $F_c = F_s$ 가 되는 입자들의 50%는 싸이클론 외통벽면으로 이동되어 분진호퍼(Dust Hopper)에 포집되며, 나머지 50%는 소용돌이의 상승기류에 혼입되어 내통을 통하여 방출하게 된다. 이와같은 입자를 싸이클론에 있어서 분리한계 입자경(Critical Cut Size)라고 부른다. 즉 50% 분리포집될 수 있는 한계 입자경을 의미한다.

싸이클론에서의 입자의 분리속도(Rate of Segregation : 반경방향속도)는 식(1)과 (2)에서 부터  $F_c = F_s$ 로 되며, 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{v_{\alpha}^2}{r_c} = 3\pi\mu d_p v_{rc} \dots \dots \dots (4)$$

$$v_{rc} = \frac{d_p^2 \cdot \rho_p \cdot v_{\alpha}^2}{18\mu r_c} \dots \dots \dots (5)$$

2.2 50% 분리한계 입자경

입구 가스 속도가 20m/s 이하의 경우에는 내통반경을  $R_2$ 라 할때 와류의 반경  $r_c = 0.7R_2$ 가 되며 유입가스량  $Q_i$ 의 약 20% 정도가 분진호퍼에 선회유입된다. 따라서 와류에 휩쓸려 유입되는 선회류의 반경방향속도  $v_{rc}$ 는 다음식으로 표현된다.

$$v_r = \frac{0.8 Q_i}{2\pi \times 0.7R_2 H_c} = \frac{1.14 A_i v_i}{\pi D_2 H_c} \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $D_2$ 는 내통직경,  $A_i$ 는 가스입구관의 단면적,  $v_i$ 는 입구가스 속도이다. 또한 자유와류를 표현하는  $v_{or} = Co.$ 에 있어서 선회속도지수  $n=0.5$ , 외통의 반경  $R_1$ 에서 가스의 원주속도를  $v_1$ 이라고 하면 식 (4)에서 50% 분리한계입자경은 다음과 같이 된다.

$$d_{pc} = \left[ \frac{5.04 \mu Q_i}{\pi \rho_p v_i H_c} \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (7a)$$

$$d_{pc} = \left[ \frac{5.04 \mu A_i}{\pi \rho_p v_i H_c} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \right]^{1/2}$$

$$= \left[ \frac{5.04 \mu A_i^2}{\pi \rho_p Q_i H_c} \left( \frac{D_2}{D_1} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (7b)$$

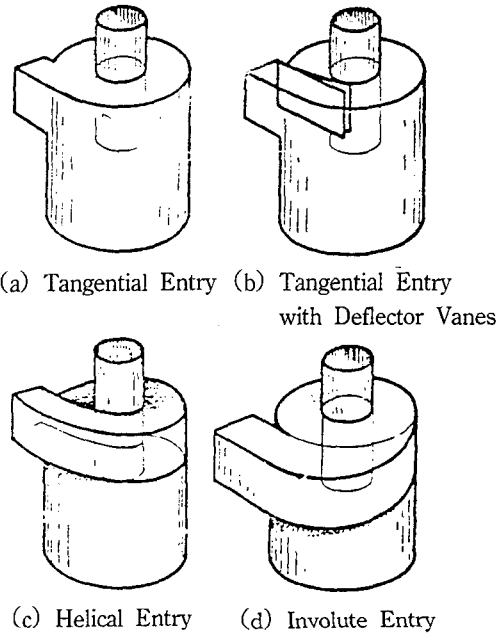
즉,  $d_{pc}$ 는 입구관의 단면적, 내통직경, 내통직경/외통직경의 값이 작을수록 또는 원주와류의 길이가 길어질수록 작아진다.

### 3. 싸이클론의 형식

싸이클론은 처리가스의 유입방법에 따라서 접선유입식과 축류식으로 대별된다.

#### 3.1 접선유입식 싸이클론

접선유입식은 그림 1에서와 같이 함진가스를 외통에 접선으로 유입되게 하는 것으로, 일반적으로 유입가스 속도는 7~15m/s로 한다. 이 범위에서는 가스속도에 의한 집진효율의 영향이 비교적 작으며, 내통직경이 성능에 중요한 영향을 미치게 된다. 압력손실은 보통 입구가스 속도가 12m/s 정도일 때 90~100mm H<sub>2</sub>O 전후가 된다. 함진가스의 싸이클론 유입시 원활한 와류를 형성하기 위하여, 그림 2에 보는 바와 같이 여러 가지의 유입부 형상이 사용되어 진다. 특히, 유입부에서의 Deflector Vane은 난류효과를 감소시켜 유동가스의 질을 향상시키기 위하여 주로 사용된다.



(a) Tangential Entry (b) Tangential Entry with Deflector Vanes  
(c) Helical Entry (d) Involute Entry

그림 2 접선유입식 싸이클론 유입부의 형상

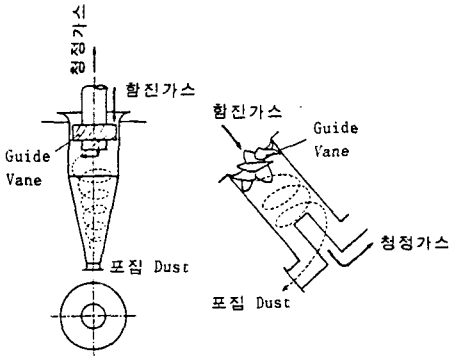
접선유입식은 Multi-Cyclone으로 사용할 때 함진가스를 균일하게 단위 싸이클론으로 분배하기가 곤란하기 때문에 단독 싸이클론으로 사용하는 것이 바람직하다.

#### 3.2 축류식 싸이클론

그림 3에 나타난 바와 같이 함진가스를 축방향으로 유입시키는 것으로, 이것은 반전형과 직진형이 있는데 현재 광범위하게 사용되어지는 것은 반전형이다. 반전형에서는 동일한 압력손실에서 접선유입식에 비하여 약 3배의 가스를 처리할 수가 있으며, 또한 함진가스를 단위 싸이클론으로 균일하게 분배하기가 용이하기 때문에 주로 Multi-Cyclone으로 사용되어 진다. 입구가스 속도 12m/s 전후에서 압력손실은 80mm H<sub>2</sub>O 정도가 된다.

#### 3.3 멀티 싸이클론(Multi-Cyclone)

싸이클론에서 분리한계 입경은 식 (7b)에서와 같이  $\sqrt{D_2}$ 에 비례하기 때문에 내통이 작을수록 미세한 입자를 포집할 수 있다. 따라서 처리가스량이 많으면서 높은 집진효율을 필요로하는



(a) 반전형 (b) 직진형

그림 3 축류 싸이클론

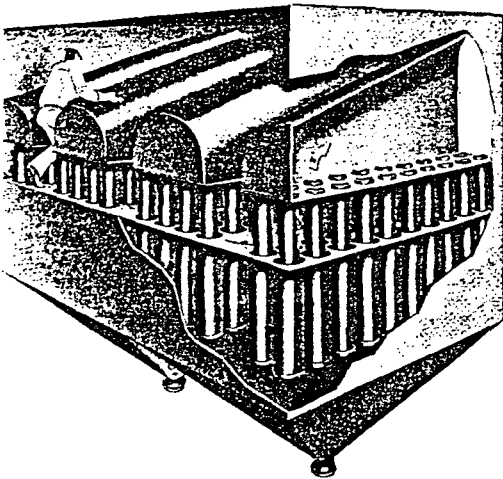


그림 4 멀티 싸이클론(Multi-Cyclone)

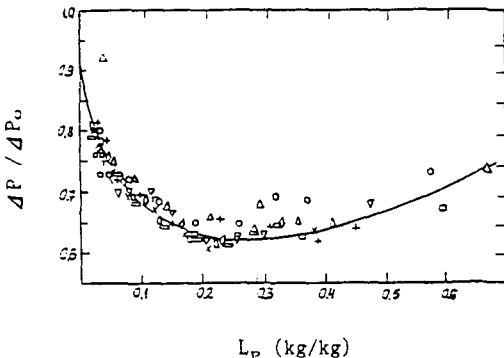


그림 5 Dust 농도에 따른 싸이클론 압력손실

경우에는 통상적으로 그림 4에 보는바와 같이, 작은 지름의 단위 싸이클론을 여러개로 병렬하여 사용하는데 이것을 Multi-Cyclone이라고 부른다. 일반적으로 단위 싸이클론의 최소 내통경은 실용적인 측면에서 먼저 연소배가스를 처리하는 경우는 100mm이며, 단 오일연소인 경우는 150mm가 한계값으로 사용되어 진다.

#### 4. 싸이클론의 압력손실

싸이클론 본체의 압력손실에 관한 실험식은 여러가지가 사용되어지고 있지만 다음의 형식으로 표시된다.

$$\Delta P = F \times \frac{Y_g v_i^2}{2g} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,  $\Delta P$ 는 압력손실,  $F$ 는 압력손실계수,  $Y_g$ 는 가스의 비중량,  $v_i$ 는 유입가스속도,  $g$ 는 중력가속도이다. 압력손실 계수에서 식 (9), 식 (10)의 실험식이 주로 사용되어 진다.

$$F = 30 \left( \frac{D_1}{H_1 + H_2} \right)^{1/2} \left( \frac{A_i}{D_2^2} \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$F = 24 \left( \frac{D_1^2}{H_1 H_2} \right)^{1/3} \left( \frac{A_i}{D_2^2} \right) \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $A_i$ 는 입구관의 단면적,  $D_1$ 은 외통경,  $D_2$ 는 내통경,  $H_1$ ,  $H_2$ 는 각각 외통의 원통부 및 원추부의 길이이다.

압력손실은 순수가스의 경우에서도 벽면의 마찰계수에 의하여 변화된다. 합진가스의 경우에는 분진에 의하여 마찰력이 증대하며, 선회속도 및 원심력은 감소하기 때문에 전체압력손실은 감소하는 경향이 있다. 그림 5는 여러가지 싸이클론의 작동조건에서 분진농도에 따른 압력손실의 영향을 실험적으로 나타내어 주며, 그림에서의 실선은 다음의 관계식에 의하여 Curve Fitting한 결과이다.

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_o} = \frac{1}{3.1 L_p^{0.7} + 1} + 0.67 L_p \dots\dots\dots (11)$$

여기서,  $\Delta P_0$ 는 분진이 없을 때의 압력손실이며,  $L_p$ 는 사이클론 유입부에서 분진의 농도부하(Mass Loading), 즉 단위부피당 순수 기체의 질량에 대한 고체분진의 질량비이다. 그림에서 보는바와 같이, 분진부하가 약 0.3까지는 분진농도의 증가에 따라 압력손실이 감소되다가, 이 이상 계속적으로 증가할 때는 마찰 운동량의 증가로 인하여 압력손실은 증가한다.

### 5. 사이클론의 고효율화 연구

사이클론은 구조가 간단하고 설치비가 저렴하며 직경 5 $\mu$ m 이상의 입자를 확실하게 포집할 수 있으므로 큰입자에서는 단독으로, 미세입자인 경우에는 소구경의 단위 사이클론으로 구성되는 Multi-Cyclone으로 광범위하게 사용되어지고 있다.

#### 5.1 한계입자경을 작게하는 조건

50% 분리한계 입자경에 관한 식 (7b)에서, 사이클론의 치수를 그림 1의 기호에서  $D_1=2D_2$ ,  $A_1=bh=0.4D_2^2$ ,  $H_c=6.5D_2$ 로 하면  $d_{pc}$ 는 다음과 같이 된다.

$$d_{pc} = \left[ \frac{5.04 \times 0.5}{\pi \times 6.5 \times 2} \left( \frac{\mu D_2}{\rho_p v_i} \right)^{1/2} \right] \approx 0.22 \left( \frac{\mu D_2}{\rho_p v_i} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (12)$$

즉, 분리한계 입자경은 내통경과 가스점도가 작을수록 또는 입구가스 속도와 입자밀도가 클수록 작아진다. 여기서 가장 큰 영향을 미치는 것은 내통경이다. 그동안 여러연구자들이 사용하는 사이클론의 치수비에 따라 다소 다르지만, 대체로  $d_{pc}$ 는  $D_2$ 의 제곱근에 비례하는 결과식에 인용되고 있다. 더구나 사이클론의 치수비에서는 내통경/외통경의 비가 작을수록 또는 외통이 길고 원주와류가 길수록 분리한계 입자경은 감소한다.

### 5.2 호퍼에서의 분진재비산량의 감소방안 연구

종래의 사이클론 유동에 관한 연구의 대부분이 본체부(원통부와 원추부) 연구에 국한되어 왔는데, 포집분진의 재비산에 의한 효율 감소 등의 연구에서 호퍼부 내부의 유동에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 분진호퍼 부에서의 유동은 주유동과 2차유동(부유동, Secondary Flow)이 복합된 매우 복잡한 유동으로 나타난다. 분진호퍼에 침적된 분진은 이 내부에 유입되는 기류에 의하여 교란되어 안쪽으로 향하는 2차유동에 의하여 중심축으로 집중되어 상승류로 되어 내통으로 유출함으로써 분진의 재비산이 발생하고, 이리하여 집진효율은 현저히 감소하게 된다. 그림 6은 분진호퍼 내의 기류의 유동상태와 분진의 재비산 현상을 보여주고 있다.

따라서, 분진호퍼부에서 처리가스량의 일부를 유출시켜 2차유동을 방지하여 집진효율을 높이는 방법을 블로우 다운(Blow Down)방식이라 부른다. 이 방식은 주로 단독 사이클론, 접선유입식 사이클론에 사용되는 것으로 유출가스량은 일반적으로 처리가스량의 5~15% 정도이다. 한편, 이와 반대로 공기등이 사이클론 내에 유입하는 현상을 블로우 업(Blow up)이라고 부른다. 그림 7은 이것의 집진효율에 대한 영향을 보여 주는 실험결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 블로우 업 현상에서는 사이클론 선회기류가 난류로 되어 집진효율이 급격히 저하된다. 사이클론에서의 분진호퍼에서의 압력은 대기압보다도 한층 낮으므로 조금이라도 사이클론의 벽면 또는 용접부분에 공간이 있으면, 그곳에서 외기가 유입되어 선회유동을 현저히 교란시켜, 집진효율을 현저히 저하시킨다.

그리고 이외에도, 분진호퍼 상부에 와류의 중심을 차단할 수 있는 원추체를 설치하면, 분진호퍼 내부로의 기류 유입을 막을 수 있기 때문에 집진효율의 다소(약 5% 가량) 증가의 효과를 가져온다고 보고되어 있다.

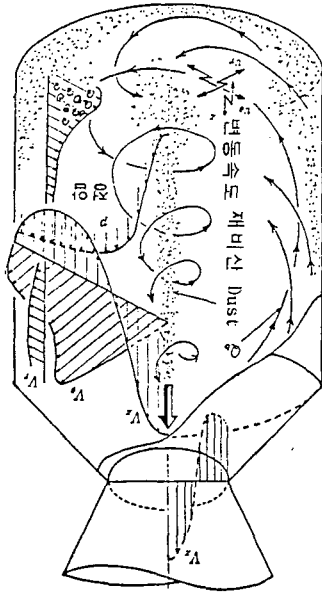


그림 6 Dust Hopper 내에서의 유동상태 및 분진 재비산

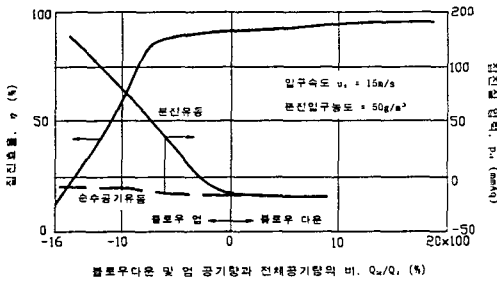


그림 7 블로우 다운과 블로우 업의 영향

### 5.3 2차 기류형 사이클론

그림 8은 사이클론의 하단부에 함진가스의 선회유입부와 상단부에 2차 선회유입부로 구성된 2차 기류형 사이클론의 한 형식을 보여주고 있다. 먼저, 주 선회유동  $Q_1$ 은 Guide Vane을 통하여 상류측으로의 난류 회전운동을 이루며, 반면에 2차 하강운동  $Q_2$ 는 상단부에서 회전하면서 주 선회유동의 세기를 한층 강화시키면서 분진입자를 분리시켜, 분진회퍼로 떨어지게 한다. 이러한 방식의 사이클론은  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 적절한 분할 공급에 의하여 함진가스의 분진농도 및 유량에 관

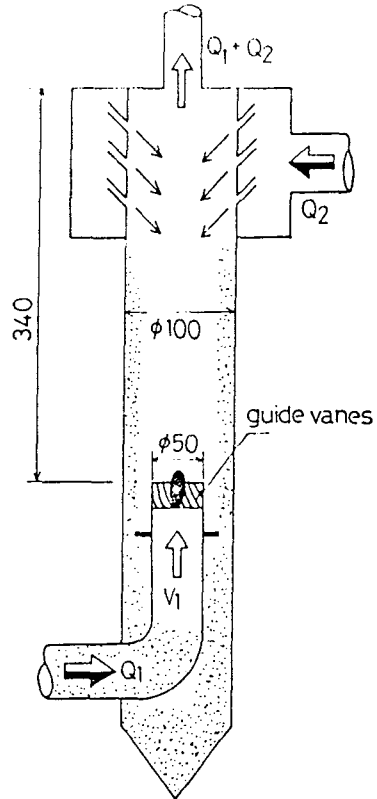


그림 8 2차기류형 사이클론 예

계없이 항상 고효율의 분진분리 특성을 가질 수 있기 때문에 전조장치 및 입자 분급기 등의 프로세스 공학에 널리 이용되고 있다.

이 밖에도, 미국 및 일본 등을 중심으로 기존의 사이클론에 코로나 전극을 설치하여 이온유동 및 입자하전의 효과에 의한 서브 미크론(Submicron) 입자의 경우에도 고집진효율을 얻을 수 있는 전기사이클론 등에 관한 연구도 1980년대 이후 지속적으로 수행되고 있으며, 국내에서도 한국기계연구원 등에서 이러한 전기사이클론 등의 사이클론의 고효율화를 위한 연구가 수행중에 있다.

## 6. 결 론

이상에서 언급된 바와 같이, 사이클론 집진기는 구조가 간단하고 설치 및 운전비용이 적으므로,

현재 가장 널리 사용되어 지고 있는 집진장치인데, 이에 반하여 내부의 유동은 가장 복잡한 3차원 난류 선회유동이며, 최소한의 설계변수가 6개 이상이 되므로, 아직도 각각의 적용 경우에 따라 실험 데이터에 의존하여 설계, 설치되어 지고 있다. 따라서 환경규제치의 강화에 따라, 정확하고 신뢰성 있는 집진장치의 설계가 요구되어 지며, 이러한 설계를 위하여는 내부의 유동을 컴퓨터를 이용하여 전체 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 전산유체역학적인 기법과 함께, 내부의 유동 형상 및 정전기 등의 원심력 이외의 힘을 조합하여 효율화를 달성하기 위한 연구가 지속적으로 수행되어져야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. Leith, D., 1979, "Cyclones", *Handbook of environmental Engineering*, Vol.1, Wang, L. K. and Pereira, N. C. eds., Humana Press, Clifton, NJ.
2. Licht, W., 1988, *Air Pollution Control Engineering*, 2nd ed., Marcel Dekker.
3. Clift, R., Ghadiri, M. and Hoffman, A. C., 1991, "A Critique of Two Models for Cyclone Performance", *AIChE Journal*, Vol.37, No.2, pp.285-289.
4. Yoshida, H., Saeki, T., Hashimoto, K. and Fujioka, T., 1991, "Size Classification of Submicron Powder by Air Cyclone and Three-Dimensional Analysis", *J. of Chemical Engineering of Japan*, Vol.24, No.5, pp.640-647.
5. Baskakov, A. P., Dolgov, V. N. and Goldobin, Yu. M., 1990, "Aerodynamics and Heat Transfer in Cyclones with Particle-Laden Gas Flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.3, pp.597-602.
6. Comas, M., Comas, J., Chetrit, C. and Casal, J., 1991, "Cyclone Pressure Drop and Efficiency with and without an Inlet Vane", *Powder Technology*, Vol.66, pp.143-148.
7. Zhou, L. X. and Soo S. L., 1990, "Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator", *Powder Technology*, Vol.63, pp.45-53.