

싸이클론 집진기 설계의 일반화

Numerical Study for the Universal Design of Cyclone Separator

류승민 · 신미수 · 장동순 · 진경태* · 박재현*

충남대학교 환경공학과

* 한국에너지기술연구소 유동충기술연구센터

I. 서론

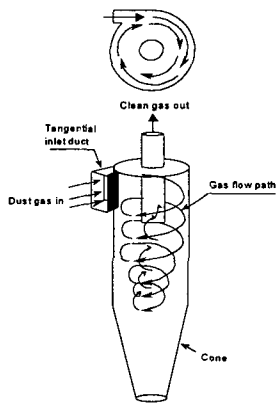
싸이클론은 구조가 간단하며, 움직이는 부분이 없어 구조적으로 비교적 튼튼한 경제적인 장치이기 때문에 분진 제어뿐만 아니라 다양한 산업공정 전반에 걸쳐 사용되고 있다. 싸이클론은 강한 접선방향 운동에 의한 고-기 분리 집진 작용 뿐 만 아니라 선회유동(swirling flow)에 의한 효율적인 혼합과 긴 체류시간을 가지므로 PCB나 미연탄소와 같은 발생하는 대기오염 물질로 인한 잉여공기가 극히 억제되는 컴팩트한 싸이클론 연소로의 설계등에 응용될 수 있다. <그림. 1>은 접선유입식 싸이클론의 모형을 나타낸다. 주입구를 통해 들어온 기체가 싸이클론의 외벽에서 회전운동을 할 때 아래 큰 부분으로 갈수록 직경이 좁아지므로 하향선회류 속도가 빨라지고, 미세한 분진은 원심력에 의해 충분한 집진 판성력을 얻게 된다. 일반적으로 집진 효율은 싸이클론의 10여개 이상의 제반 변수(주입기체의 운동량: 속도와 유량, 유입되는 기체의 온도와 밀도 그리고 분진의 함량, 싸이클론의 종류 및 기타 기하학적인 제반 변수)등에 대하여 다양하게 영향을 받으나 이러한 10여개의 변수를 조직적으로 고려하고자 하는 노력은 10,000,000번 이상의 엄청난 실험횟수가 요구되므로 싸이클론에 대한 일반적인 설계를 위해서는 아직도 많은 연구를 필요로 하는 것이다.

본 실험실에서는 아래에 요약한 바와 같이 지금까지 여러 공정에 적용된 다양한 싸이클론 연구를 수행해 왔다. 이에 대해 간략히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 집진 효율 향상 및 동력 절감을 위한 고 효율 축상형 싸이클론 집진기의 설계연구이다. 이 연구에서는 싸이클론 축중심 보텍스파인더 내부에 중심체를 집어넣어 유동 및 분진의 궤적과 압력강하를 수치해석 한 결과, 중심관을 넣은 경우 그 직경과 선회강도가 커짐에 따라 집진효율이 상승됨을 보였다. 싸이클론형 석탄가스화기 연구에서는 석탄가스화 복합 발전시 분류층 가스화기내의 유동을 버너의 주입각, 선회강도 및 연소로의 종횡비 등의 영향을 살펴 보았다. 싸이클론 후연소로에 대한 연구에서는 싸이클론 연소로의 크기, 연소로 주입구에서의 속도변화, 출구면적변화 등에 따른 연소로의 유동과 선회강도에 따른 유동특성을 살펴본 결과, 보텍스 형태는 입구나 출구 쪽에서는 Rankine 형태를 가지나 콘의 위치로 갈수록 solid body 형태가 나타나며 연소로의 크기 및 유입 공기량은 전체 유동 패턴에 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있었다. 전기싸이클론에 대한 연구에서는 축상유입식싸이클론형 전기 집진기 설계를 위해 원심력과 전기장에서 입자궤적 특성을 파악하고자 가스의 유속, 분진의 직경, 분진의 비중 및 방전극의 하전량의 변화를 주요 변수로 연구 수행하였다. 이 결과, 미세한 입자에 대해서는 유입속도를 작

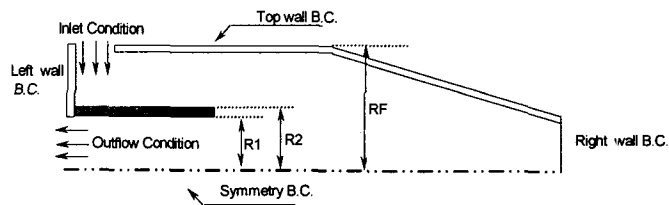
대표연구자 : 류승민, 대전광역시 유성구 궁동 220 충남대 환경공학과 전산열유체 실험실
TEL : 042) 821-6677, FAX : 042) 822-5610, E-mail : rsmiso@korea.com

게 유지한 전기사이클론이 훨씬 유리하며 비교적 큰 입자에 대해서는 사이클론이 우세함을 알 수 있었다. 보텍스 파인더가 필요하지 않은 사이클론 연소로에 대한 연구([3])에서는 특정 크기의 사이클론에서 주입속도와 선회속도의 조정에 따라 보텍스파인더가 없이도 보텍스파인더가 있는 것 같은 유동을 형성할 수 있는 점을 이용하여 사이클론의 전장과 주입속도 그리고 주입각에 따라 유동양상을 파악하였다. 또한 비산화제 사이클론 연소로에 대한 연구에서는 사이클론 연소로에서의 난류반응 성능이 선회강도와 휘발속도에 따라 크게 좌우되고 이에 따라 비산화제의 미연탄소처리 성능에 결정적인 영향을 나타냄을 보여주었다. 그 외에도 수 처리 장치에 사용되는 이차침전조의 유동패턴은 주입구와 출구의 방향이 역전된 사이클론의 유동과 같은 양상을 보여주고 있는 것으로서 사이클론 연구 결과는 하이드로사이클론 뿐 만 아니라 침전조 설계에도 원용될 수 있다.

여러 연구자들에 의해 사이클론의 표준설계에 대한 연구는 계속되고 있으나([4],[5],[6]), 유동층이나 기류수송시스템등 다양한 공정에 적용된 사이클론의 효율 저하 및 운전시 마모와 고온에서의 집진 효율 등은 여전히 문제점으로 대두되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지금까지의 연구결과를 토대로 사이클론의 몸통직경과 비례하여 일반화된 표준 사이클론의 치수를 기본으로 유입속도, 선회류 출구길이 및 몸통길이와 분진 입경 등 다양한 변수 연구와 사이클론의 내부에서 일어나는 나선운동을 토대로 하여 가장 이상적이며 일반화된 사이클론의 설계조건을 찾고자 한다.



<그림. 1> 사이클론 모형



<그림. 2> 사이클론의 경계조건

II. 수치해석 모델 및 방법

수치해석 알고리즘은 검사체적에 기초한 Patanker의 방법을 사용하였으며 압력, 속도 연계는 SIMPLEC 알고리즘을, 난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 택하였다. <그림. 2>는 본 연구에서 사용한 사이클론의 개략적인 도식도이다.

1. 일반적인 지배방정식

본 연구에서 목적으로 한 접선유입식 사이클론 집진기에서의 가스유동 및 분진 입자의 궤적을 측정하기 위해 2차원 축대칭 좌표(2-D, axi-symmetric cylindrical coordinate)를 사용했으며 정상상태, 비압축성, 뉴턴 유체를 가정했을 때 난류유동을 해석하기 위한 일반적인 지배방정식을 원통좌표계에서 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u} \bar{\phi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \bar{v} \bar{\phi}) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial r}) + S_{\phi} \quad \text{----- (1)}$$

식 (1)에서 $\bar{\phi}$ 는 일반종속변수로서 축방향(axial), 직경방향(radial), 접선방향(tangential)의 평균속도 성분과 단위 질량당의 난류에너지 k 및 그의 소산율 ϵ 을 각각 나타내고 Γ_{ϕ} 와 S_{ϕ} 는 각 종속변수 $\bar{\phi}$ 에 대한 확산계수와 생성항을 나타낸다.

2. 액적 운동방정식

액적의 운동방정식은 아래와 같은 Lagrangian 형태로 나타낼 수 있으며, 난류에 의한 액적 궤적의 영향과 에너지방정식은 본 연구에서 고려하지 않았다.

$$\frac{du_p}{dt} = \alpha(u_g - u_p) \quad \text{----- (2)}$$

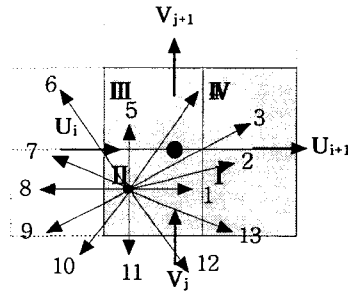
$$\frac{dv_p}{dt} = \alpha(v_g - v_p) + \frac{w_p^2}{r_p} \quad \text{----- (3)}$$

$$\frac{dw_p}{dt} = \alpha(w_g - w_p) + \frac{v_p w_p}{r_p} \quad \text{----- (4)}$$

$$\text{여기서, } \alpha = \frac{18\mu_g C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{Re}{24} \quad \text{----- (5)}$$

3. 액적궤적 추적 도식도

액적의 궤적추적을 위한 격자점내에서의 운동양상은 아래와 같은 13개의 추적을 가상하였다.



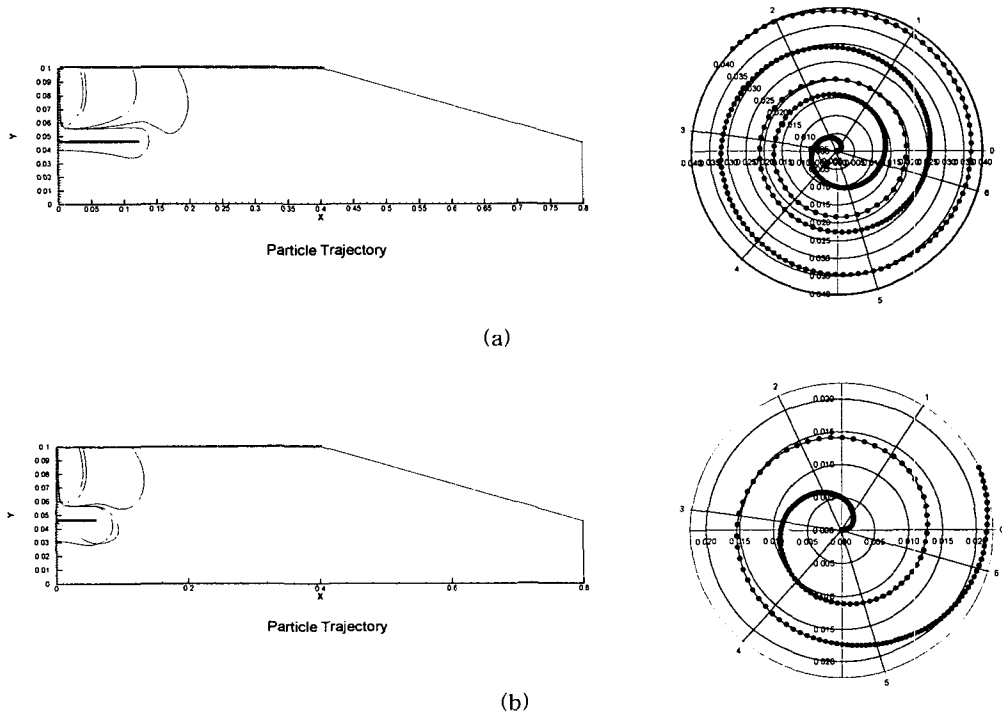
<그림. 3> 검사체적에서 액적 궤적

이 때 액적은 일차적으로 몇 개의 직경을 가진 유한개의 그룹으로 분류하였다.

III. 결과 및 고찰

일반적으로 가스밀도와 유입구폭이 클수록 포집입자의 직경이 커지며 회전유입속도와 입자와 가스의 밀도차가 클수록 포집 입자의 직경은 작아진다. 또한 사이클론의 크기가 너무 커도 가스와 포집입자의 분리가 안 되기 때문에 집진 효율이 감소하고, 사이클론의 크기가 너무 작아도 미세 입자의 생성으로 집진 효율이 감소하게 된다. 따라서 표준사이클론의 치수를 기준으로 입자궤적과 다양한 설계 변수에 따른 연구를 수행하여 보다 일반적인 사이클론 설계를 시도하였다.

<그림. 4>-(a) 는 몸통직경-20cm, 가스출구직경-10cm, 유입구높이-10cm, 선회류출구길이-12.5cm, 몸통길이-40cm, 그리고 원추길이-40cm인 표준사이클론에서 유입속도가 20m/s이고, 입경이 $0.1\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$ 일 경우, 속도장 및 입자의 궤적을 살펴 본 것이고, <그림. 4>-(b)는 선회류 출구의 길이를 반으로 줄인 후 결과를 살펴 본 것이다.



<그림. 4> 사이클론 설계 일반화 수치해석 예비 결과

참고 문헌

- [1] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington, D. C. (1980)
- [2] Cooper, C.D., and Alley, F.C., Air pollution control : A Design approach, Waveland press. (1993)
- [3] 윤장근, 열유체 수치 해석에 의한 환경에너지 시스템 고도 설계연구: SNCR 적용 스토커 소각로, 사이클론 연소로, TiO₂/UV 촉매를 이용한 NO_x 저감, 충남대학교 환경공학과 석사학위논문 (1999)
- [4] Reppenhagen, J. et al., "Fine the Optimum cyclone size with respect the fines in pneumatic conveying systems", Powder Technology, 112 (2000)
- [5] Xiang, R., et al., "Effects of cone dimension on cyclone performance", Journal of Aerosol Science, 32 (2001)
- [6] Kim, C.H., and Lee, J.W., "A New Collection Efficiency Model for Small Cyclones Considering the Boundary-layer effect", Journal of Aerosol Science, 32 (2000)