

전산유체역학을 이용한 사이클론의 해석 및 실공정에의 적용

(Modelling of cyclone using CFD technique and its application to the field)

주지선 · 이민우* · 이현수 · 홍창식

〈동양중앙연구소 공정연구실〉

1. 연구배경 및 목적

소성공정에 대한 공정엔지니어링은 30여년 전에 사이클론 예열공정, 즉 건식공정을 도입함으로써 획기적인 발전을 이룩하였다. 이 예열공정은 상승단과 4~6의 다단으로 조합된 사이클론으로 구성된다. 그러므로 각 단 사이클론에서의 집진효율 및 압력손실은 연소공정 전체에서의 열 및 전기에너지 소비에 결정적인 영향을 미치며, 킬른공정에 대한 대부분의 최적화 작업은 이 사이클론을 대상으로 이루어졌다. 특히, 고온의 가스로부터 원료입자의 최종 분리가 행해지는 최상단 사이클론에서는 그의 집진성능이 중요한 역할을 한다.

최근에는 엄격해진 환경규제에 대응하며 동시에 생산성 향상을 위해 압력손실을 적게 하는 동시에 집진효율이 높은 고성능 사이클론의 개발이 강력하게 요구되고 있다. 사이클론의 성능은 조업조건 및 형상구조에 따라서 크게 달라지는데, 특히 입구의 형상이나 유입속도는 그의 주요 변수이다.

사이클론은 비록 구조적으로는 단순하지만 유체역학적인 관점에서는 큰 선회류와 다중의 축방향 반대흐름을 포함하는 아주 복잡한 시스템이다. 기존의 사이클론에 대한 연구는 주로 실험에 의존하여 왔고, 압력손실과 집진효율에 대한 수많은 실험식이 존재한다. 또 이론적으로 사이클론 내부의 속도나 압력 분포 등을 물질이나 운동량 수지식 등을 통해 구하고자 하는 연구가 최근 진행되고 있으나 이 역시 실험식과 마찬가지로 여러 가지의 다분히 불합리한 가정들을 내포하고

있어서 새로운 사이클론의 설계에 적용하기에는 한계가 있다.

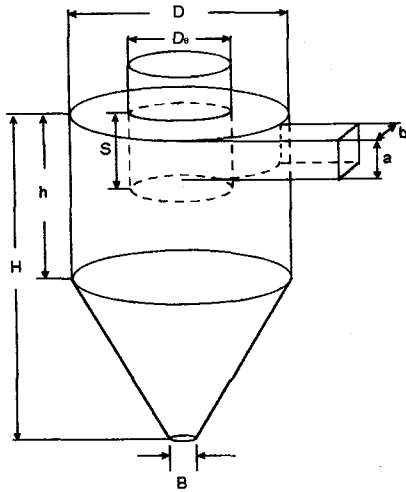
최근에는 컴퓨터의 급격한 발달과 더불어 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 기술이 공정연구 분야에서 각광을 받고 있다. 특히 사이클론과 같은 유체 프로세스 내부에서의 유체 및 입자 거동을 컴퓨터를 이용하여 전산모사하는 기술이 공정연구에 광범위하게 이용되고 있다. 이렇게 실험을 대신한 전산모사에 의한 연구방법은 적은 비용으로 또한 빠른 시간내에 사이클론 등의 공정 내부의 모든 부분에서의 압력 및 속도 분포, 입자의 거동 등을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구팀에서는 상용 CFD code의 하나인 CFX 4.1을 이용하여 사이클론 해석을 위한 전산모사 방법을 확립하고, 표준 사이클론을 통하여 그의 모사 방법의 타당성을 검증하였다. 최종적으로, 당사 삼척공장 1,2호 킬른 최상단 사이클론을 대상으로 전산유체해석을 수행하였으며 연구한 결과를 현장에 적용하였다.

2. 사이클론

2-1. 사이클론 내부의 흐름

〈Fig. 1〉로 개념적으로 표현되는 사이클론은 원심력을 이용하여 입자와 기체를 분리하는 장치이다. 입구덕트로 유입된 유체는 3~5회 선회하며 아래로 향하고, 어느 위치가 되면 나선형으로 하향하던 가스는 역류하여 상승하는 반대흐름을 만든다.



〈Fig. 1〉 Schematics of cyclone air separator

정화된 가스는 내통을 통해 위로 배출되고, 입자는 원심력과 중력에 의해 사이클론 내벽을 따라 아래로 이동되어 하부의 원추부 출구에서 집진된다.

2-2. 입자의 집진 이론

사이클론의 집진효율은 사이클론에서 집진된 입자와 유입되는 입자의 총질량의 비로 정의되며 오래 전부터 사이클론의 집진효율을 예측하기 위한 다양한 식들이 제안되었다. 제안된 대부분의 식들은 입자의 직경과 밀도, 그리고 유체의 속도 및 점도 등의 영향을 고려하고 있지만, 사이클론 구조의 영향에 대해서는 상당히 다양한 형태의 식들이 제안되고 있다.

사이클론 내에서 입자는 접선방향으로 유입되는 기체 흐름에 기인하는 원심력에 의해서 분리된다. 이 원심력은 입자를 사이클론 벽쪽으로 향하게 하는데, 이 힘에 반대되는 항력(drag force)이 발생한다. 집진효율에 관계된 모든 이론식들은 이 두 힘의 평형식으로 표현된다. 사이클론을 통과하는 유체에 대한 몇몇 가정들로 이 수치식들을 간단하게 표현할 수 있다. 이런 가정된 항들의 상대적인 중요성은 사이클론의 구조나 운전 방식에 따라 달라지므로, 몇몇 가정들로부터 도출된 집진효율 식을 모든 사이클론에 적용할 수는 없다. 이들을 그 방법에 따라 분류하면 다음과 같다.

(i) 정시비행 접근법(Timed Flight Approach)

이 방법은 집진되기 위한 입자는 일정한 거리를 선회하여 벽쪽으로 이동하여야 한다는 가정에서 출발한다. 임계입경(critical particle size)은 사이클론 내에서 체류하는 동안에 이 거리를 이동할 수 있는 입자의 크기를 말한다. 입자가 유입되는 지점과 체류시간이 다르면 임계입경이 달라진다.

Lapple[5]의 절단직경이론(cut diameter theory)은 이 접근법의 전형인데, 사이클론으로 들어가는 입자는 유입 단면에 골고루 분포하고 있다고 가정되었다. 그는 50%의 집진효율을 보이는 입자의 크기인 d_{50} 을 다음과 같이 계산하였다.

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi(\rho_p - \rho)v_i N}} \quad (1)$$

N 은 사이클론 내에서의 기체 회전수이다. 그는 실험적으로 d_{50} 을 측정하여 위 식으로부터 $N=5$ 임을 계산하였다.

식 (1)에서 알 수 있듯이 집진효율은 가스의 점도, 유입구의 폭과 비례관계에 있으며 기체의 회전수, 기체유입속도, 입자와 가스와의 밀도차이에 반비례한다.

(ii) 정지입자 접근법(Static Particle Approach)

이 방법에서는 원심력과 항력이 평형을 이루는 입자의 직경을 찾아낸다. 이것은 선회류 출구 아래의 중심부 근처에서 영원히 회전하는 입자의 크기에 해당한다. 항력이 원심력보다 크게 작용하는 직경이 작은 입자는 집진되지 않는다. 큰 입자는 바깥쪽으로 향하여 사이클론 벽에서 집진된다. 이 방법에서는 임계입경보다 작은 입자에 대한 집진효율 0으로부터 큰 입자의 1까지 집진효율의 급격한 변화를 예측한다. 그러나, 실제로는 사이클론 전체 높이에 걸쳐 반경방향과 접선방향 기체 속도의 요동으로 인하여 이러한 급격한 변화는 관찰되지 않는다. 유럽의 연구 문헌들에서 자주 인용되는 Barth[1]의 이론이 이 접근법의 한 예이다.

(iii) 부분효율 접근법(Fractional Efficiency Approach)

최근에는 어떤 모양의 사이클론에 대해서도 그

의 집진효율을 곧바로 계산할 수 있는 식을 개발하려는 시도가 있었다. Leith와 Licht(6)의 이론식과 Dietz(3)에 의해 제안된 식들이 이 범주에 속한다.

2-3. 압력강하

사이클론의 가장 큰 단점은 압력손실이 커서 동력비가 많이 든다는 점이다. 일반적으로 높은 집진효율은 사이클론을 고속으로 운전할 경우 얻어지나 이로 인한 압력의 손실도 커지므로 송풍기에서의 전력손실에 의한 경제성을 고려하여야 한다.

압력손실은 입구에서의 속도의 제곱에 비례하는 다음과 같은 식으로 표현된다 :

$$\Delta P = \Delta H \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

여기서 압력손실 계수 ΔH 는 입구속도에 무관하고 각 사이클론의 구조에 대해서 상수값을 가지는 무차원 수이다. 압력손실 계수를 계산하고자 하는 여러 가지 시도가 Barth(1), Dirigo(4), Shepherd와 Lapple(7), Stairmand(8) 등에 의해 이루어졌다.

3. 사이클론의 전산모사

3-1. 전산유체역학을 이용한 사이클론의 연구

사이클론은 그 설치가 비교적 단순하면서도 성능의 우수함으로 인해 사용되어왔던 기간이 매우 오래되었음에도 불구하고 이론적인 발전은 매우 미미하였다. 그것은 내부의 복잡한 유체장의 형성과 입구 유속을 기준으로 한 레이놀즈 수가 매우 높은 난류성에 기인한다.

그러나 컴퓨터의 급격한 발달과 난류에 대한 이해가 깊어짐에 따라서 전산유체역학을 이용한 보다 엄밀하고 과학적인 연구가 이루어지고 있다. 전산유체역학을 이용한 사이클론에 대한 최초의 연구로서 Boysan 등(8)은 여러 종류의 사이클론에 대한 해석을 통하여 압력과 집진효율을 예측하여 대수 응력 모델이 사이클론의 유체장을 가장 잘 표현하고 있음을 제시하였으나 3차원 비대칭적인 형태의 사이클론을 2차원으로 가정하였

기 때문에 정확한 해를 구하는 데에는 한계가 있었다.

3-2. 지배방정식

수치해석적으로 유체현상을 해석할 경우 기본적으로 사용되는 지배방정식은 연속 방정식과 운동방정식(Navier-Stokes식), 에너지 식으로서 다음의 식(3)~(5)으로 나타낼 수 있다 :

<연속방정식>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (3)$$

<운동방정식>

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = \rho \vec{g} - \nabla p \delta + \mu (\nabla^2 \vec{U} + \nabla^2 \vec{U}^T) \quad (4)$$

<에너지식>

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} H) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (5)$$

각 식에서 ρ , μ , λ 는 각각 유체의 밀도, 점도, 열전도도이다. 식(5)에서 H는 엔탈피로서 $H = h + \frac{1}{2} \vec{U}^2$ 와 같이 정적 엔탈피 (static enthalpy)와 운동에너지 (kinetic energy)로 나타낼 수 있다.

3-3. 난류모델

사이클론의 경우에는 입구 덕트를 기준으로 한 레이놀즈 수가 약 10^6 의 크기를 가지게 되어 심한 난류의 거동을 보인다. 또한 난류의 비등방성을 동반하는 복잡한 흐름장이 형성되는 것이 실험적으로 알려지고 있다. 그러나 재순환 영역, 강한 선회류, 난류, 복잡한 사이클론의 형상이라는 여러 가지 요소가 간섭해 만나는 현상은 아직 충분히 해명되고 있지 않으며 여러 실험적인 연구와 컴퓨터의 발달에 힘입은 이론적인 연구가 계속되고 있다.

공학적인 난류계산의 취급에서는 기초방정식 단계에서 8통계처리를 하고 나서 계산을 실행한다.

즉, 난류의 공학계산에서는 시간 평균을 취해 불규칙적인 변동을 제외시키고 나서 계산을 수행하게 되는데, 운동방정식 및 연속방정식에 시간 평균을 취한 레이놀즈 방정식은 다음과 같다:

$$\frac{\partial \rho \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{U}} \otimes \bar{\mathbf{U}}) = -\nabla p' + \nabla \cdot \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}} + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{U}}) = 0 \quad (7)$$

식(6)에서 $\overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}$ 은 Navier-Stokes식에 시간 평균을 취해줌으로써 생성된 항으로서 난류에 의한 운동량 수송의 증가분, 즉 난류응력(레이놀즈 응력)항이다. 이 난류 응력항은 모두 9개의 성분을 갖게 되나 대칭성으로 인해 6개만이 독립적이다. Navier-stokes식을 다시 조작하면 레이놀즈 응력항에 대한 수송방정식을 얻을 수 있으나 그 방정식은 매우 복잡해지며 시간 평균 조작 과정에서 더 높은 차수의 미지수가 나타나기 때문에 방정식계가 닫혀지지 않는다. 이미 나타난 양을 사용하여 경험관계식으로 미지의 고차 상관량을 표시함으로써 이와 같은 무한식을 닫을 수 있다.

여러 연구자들에 의하여 와류 점성 모델(Eddy viscosity model), k-ε, RNG k-ε, 레이놀즈 응력 모델 등이 제시되었고 이 모델들은 여러 해에 걸쳐서 다양한 계에 적용, 검증되었다. 따라서 이러한 모델의 적용은 대상 계의 특성에 따라 적절히 선택함이 중요하다.

사이클론과 같이 강한 와류도를 가진 유체의 경우에는 레이놀즈 응력 모델의 적용이 비교적 적절한 것으로 보고되고 있으며 이의 적용이 확산되고 있는 추세이나, 레이놀즈 응력 모델의 경우 k-ε 모델에 비하여 수렴성이 좋지 못하고 그 정확성에 비해 전산시간의 소모가 너무 크게 되므로 본 연구에서는 전통적인 k-ε 모델을 사용하였다. 이 모델에서 사용된 경험적인 상수들을 <Table 1>에 제시하였다.

Constants in the turbulent equations

<Table 1>

계 수	C ₁	C ₂	C _μ	σ _k	σ _ε
사용값	1.44	1.92	0.09	1.0	0.16

3-4. 입자운동모델

입자의 거동을 예측하는 방법에는 오일러(Eulerian) 접근법과 라그랑지(Lagrangian) 접근법이 있다. 오일러 접근법은 유체장과 입자상을 별개의 상으로 보고 입자상에 대해 부가적인 대류-확산식을 푸는 방식으로서 시스템은 다상모델이 된다. 이에 반해 본 연구에서 채택한 라그랑지 접근법은 입자상을 대표적인 몇 개의 그룹으로 상미분 방정식을 품으로서 유체내 입자의 궤적을 구하는 방식이다.

3-5. 경계조건

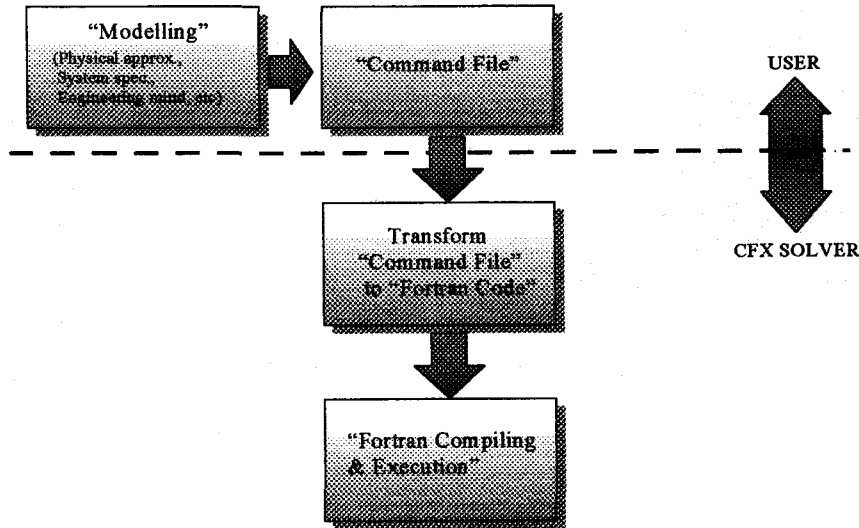
유체가 시스템으로 들어가거나 나오는 부위는 흐름의 경계로 표시할 수 있다. 유체의 출구경계는 질량흐름경계(mass flow boundary) 및 압력경계(pressure boundary)의 두가지 형태로 나누어 구분된다. 질량흐름경계는 전체 경계를 떠나는 총질량의 크기를 알거나 성분들의 질량분율을 아는 경우 적용하며 압력 경계에서는 압력의 값이 지정된다.

질량경계 조건의 경우에는 출구에서 계를 떠나는 유량의 값에 도달할 때까지 유속을 변화시키는 방법이며 내부로부터 난류 변수와 압력을 계산한다. 반면 압력경계 조건은 출구의 압력을 설정하고 이로부터 압력장을 계산하게 된다. 두 조건 모두 임의의 변수 ϕ 에 대해서 다음과 같은 노이만 경계조건을 사용한다:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

식(8)을 출구 경계조건으로 주기 때문에 계산범위를 설정하는 것이 중요하다. 즉 출구에 직각인 성분에 대하여 변수의 변화율이 0이라는 식(8)의 경계조건을 주기 위해서는 유체의 흐름의 변화가 심한 부분으로부터 많이 떨어진 부분에 경계조건을 설정해야만 한다. 그렇지 않으면 노이만 경계조건이 흐름에 크게 영향을 주어 물리적으로 비현실적인 결과가 나오게 된다. 그러나 이것에 집착하여 너무 크게 검사 체적을 설정하게 되면 기억용량과 전산 소모시간이 증대하게 되므로 적절한 곳에 경계를 설정하는 것이 중요한 문제이다.

3-6. CFX의 구성



<Fig.2> Procedure of computer simulation using CFX 4.1

4. 당사 사이클론에의 적용

4-1. 계산의 수렴을 위한 전략

유체역학적인 측면에서 사이클론과 같이 매우 복잡한 구조를 가진 계의 경우에는 다중 블록형태의 구조로 계산을 수행하여야 한다. 구조가 복잡한 경우에 대해서는 ICCG나 Stone과 같이 CFX 4.1에서 기본으로 제공하는 선형 해법으로는 발산하는 경우가 많으며 정확한 초기값을 주기 어려워지므로 본 연구에서는 압력식이나 U, V, W 속도계산식에 대한 초기 50~500회의 반복계산은 AMG 선형해법을 이용하여 계산을 수행하였다. 이 해법은 해의 정확성과 수렴성이 좋지만 CPU의 소모가 크게 되어 초기의 유체장에 대한 기본적인 값들을 얻는 데에만 사용하고 이를 다시 ICCG나 Stone 선형해법의 초기 가정값으로 하여 계산을 수행하였다. 또한 각 변수마다 under relaxation factor를 주어서 반복 계산시 발산하는 것을 방지하였다.

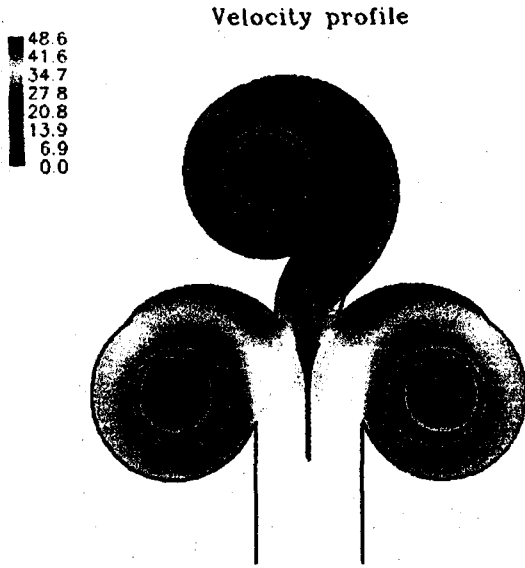
4-2. 격자의 생성

사이클론과 같이 유입부분이 편향되어 비대칭

적인 경우에는 2차원으로 풀기에는 매우 불합리한 가정들이 따르게 되므로, 3차원으로 격자를 생성하였다. 사이클론 내부의 흐름은 반경방향으로의 구배가 매우 크기 때문에 반경방향으로 상대적으로 매우 조밀한 격자를 구성하였으며, 접선방향으로의 구배는 상대적으로 사이클론 하부로부터 출구 덕트까지 그리 큰 값을 갖지 않으므로 상대적으로 조밀하지 않은 격자를 구성하였다. 또한 유입 덕트와 사이클론의 본체부분이 접하는 부분과 같이 갑작스런 확장이 일어나는 부분이나 사이클론 본체에서 출구로 빠져나가는 부분과 같이 갑작스런 축소가 일어나는 부분에서는 일반적으로 압력손실이 매우 크게 일어나며 속도 등 유체변수들의 변화가 상당히 심하므로 조밀하게 격자를 나누어주었다.

4-3. 적용 및 고찰

당사 삼척공장 1,2호 킬른의 최상단 사이클론들은 하나의 덕트로부터 유입된 흐름이 세 개의 사이클론으로 분배되는 형태로서, 유입덕트내에 분산판을 설치하여 각 사이클론으로의 흐름을 균일하게 분배하고 있었으나, 그의 집진효율이 89~91%로 매우 낮게 나타나고 있는 실정이다.



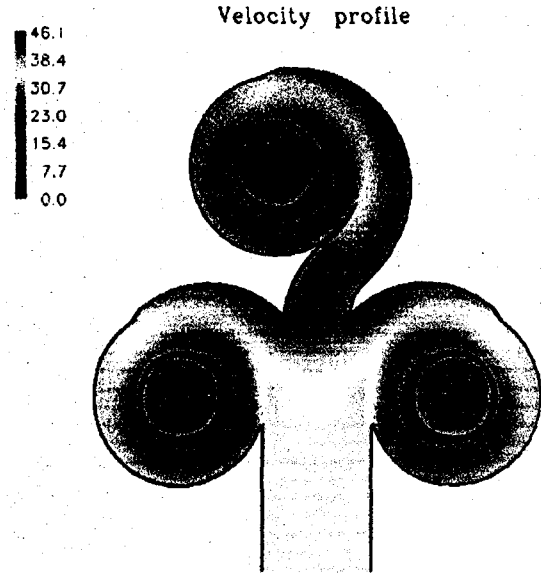
〈Fig. 3〉 #2k Top cyclone (Original structure)

전산모사를 통하여 내부의 흐름을 관찰한 결과, 3개 사이클론으로의 풍량이 균일하게 분배되지 못하는 현상을 확인하였으며, 또한 가운데 사이클론으로 들어가는 흐름은 집진방향으로 유입되지 못하여 집진효율이 나빠진 것으로 해석되었다. (〈Fig. 3〉) 이에 그의 구조를 적절하게 조절하여 집진효율을 향상시킬 수 있는 설계치를 도출하였다. 그 설계치의 타당성을 전산모사를 통하여 검증(〈Fig. 4〉)하였고, 이를 바탕으로 당사 1호 킬른의 최상단 사이클론을 개조하였다.

시멘트 제조공정은 많은 분진을 함유한 고온의 기체이므로 문제 발생시 실제 공정의 측정이 어려운 특성을 가지고 있는데, 전산유체역학은 이를 보조하는 좋은 도구를 제공할 것이다.

〈참 고 문 헌〉

1. Barth, W., Evaluation of design of cyclone separators, Staub Reinhalt Luft, 24, pp. 41~55 (1956)
2. Boysan, F., W. H. Ayers and J. Swithenbank, A fundamental mathematical



〈Fig. 4〉 #2k Top cyclone (Modified structure)

modelling approach to cyclone design, Trans. IChemE, 60, pp. 222~230 (1982)

3. Dietz, P. W., Collection efficiency of cyclone separators, AIChE, 27, P. 888 (1981)
4. Dirgo, J., Relationships between Cyclone Dimensions and Performance, Doctoral Thesis, Harvard University (1988)
5. Lapple, C. E., Processes use many collector types, Chem. Engng., 58, pp. 144~151 (1950)
6. Leith, D. and W. Licht, Collection efficiency of cyclone type particle collectors—a new theoretical approach, Am. Inst. Chem. Engng. Symp. Ser. (Air-1971), 68, pp. 196~206 (1972)
7. Shepherd, G. B. and C. E. Lapple, Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors, Ind. Engng. Chem., 31, p. 972 (1939)
8. Stairmand, C. J., The design and performance of modern gas cleaning equipment, J. Inst. Fuel, 29, pp. 58~76 (1951)