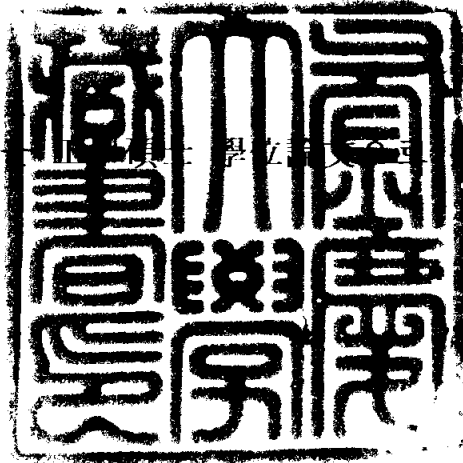


工學碩士 學位論文

단일 원통형 습식 전기집진기의
집진효율에 관한 연구

指導教授 金 永 守

이 論文은 釜慶大學校 大學院 冷凍空調工學科 鄭鍾驩 提出함



2004年 8月

釜慶大學校 大學院

冷凍空調工學科

鄭 鍾 驩

鄭鍾驩의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 6月

主審 工學博士

김 종 수



委員 工學博士

김 영 수



委員 工學博士

김 은 필

(印)

목 차

Abstract	I
List of Tables, Figures and Photographs	III
Nomenclature	V
제 1 장 서 론	1
제 2 장 기초 이론	4
2.1 오염물질 제거장치의 종류	4
2.2 STT 기초이론	7
제 3 장 집진 효율 실험	14
3.1 실험방법	14
3.2 실험결론	23
제 4 장 수치해석	25
4.1 집진기 유동 수치해석	25
4.2 집진기 집진효율 해석	40
제 5 장 결론	50
참고문헌	51
감사의 글	54

Research on the Collection Efficiency for Single Tubular Type Wet ESP

Jong-Hwan, Jeung

**Department of Refrigeration and Air conditioning Engineering
Graduate School
Pukyong National University**

Abstract

The fabric bag filter and electrostatic precipitator which are highly effective to treat the particle pollutants emitted from combustion and incineration process, etc have been widely applied in the industry due to its high collection performance. However, it is necessarily required to make a technical development for the improvement of following problem because, the fabric bag filter has the main problem of high pressure drop. It is estimated that the development of collection equipment combined two separated systems into one unique system is desirable since, in case of installation of a cyclone for pretreatment to overcome the above problem(high pressure drop), it cause the enlargement of installation area and increment of installation scale operation cost. But Single Tubular Type Condensing wet ESP with simple design, which are able to treat the large quantity of flue gas without significant pressure drop.

Thus, in this study, it is a main object to investigate collection

efficiency, gas flowfield and mechanism of particle movement by numerical simulation. Tubulent flow field was modeled by the Standard $k-\varepsilon$ model and solved with an FVM code FLUENT 6.0. Particle motion and charging were simultaneous solved by a Lagrangian integration with time.

The result showed that the influence of the inlet-velocity to the collection efficiency was important in the same electricfield. The rate of particle deposition was getting higher with the applied voltage increasing.

List of Tables, Figures and Photographs

Tables

Table 2.1 Type of dust collector

Table 3.1 Date log of STT

Table 3.2 Collection efficient of STT (in the year 2003)

Table 4.1 Geometric parameters and boundary conditions of analysis
cases which were investigated numerically

Table 4.2 Average velocity for various inlet velocity in the STT

Table 4.3 Average pressure for various inlet velocity in STT

Figures

Fig. 2.1 Simple expansion chamber

Fig. 2.2 Cyclone

Fig. 2.3 Wet cyclone

Fig. 2.4 Discharge of corona electricity

Fig. 2.5 The mechanism of the STT

Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental system

Fig. 3.2 Collection efficient for various particle diameter

Fig. 3.3 Collection efficient for various particle diameter
(Pass velocity : 2 m/s. Applied voltage : 85 kV)

Fig. 4.1 Schematic diagram of analysis model

Fig. 4.2 Grid configuration for the total STT

Fig. 4.3 Path line by velocity magnitude (m/s) at the STT (3 m/s)

Fig. 4.4 Path line by velocity magnitude (m/s) at the inlet duct (3 m/s)

Fig. 4.5 Contours of velocity magnitude (m/s) at the STT (3 m/s)

Fig. 4.6 Velocity magnitude at line a, b, c (3 m/s)

Fig. 4.7 Pressure contour (Pa) at STT (3 m/s)

- Fig. 4.8 Contours of pressure magnitude (Pa) at STT (3 m/s)
- Fig. 4.9 Static pressure at line a, b, c (3 m/s)
- Fig. 4.10 Velocity magnitude for various inlet velocity in the STT
and electric precipitation
- Fig. 4.11 Velocity magnitude in inlet duct & tangent duct
- Fig. 4.12 Grid configuration for the STT
- Fig. 4.13 Particle ($1\ \mu\text{m}$) tracks at the STT
(Applied voltage : 0 kV)
- Fig. 4.14 Particle ($1\ \mu\text{m}$) tracks at the STT
(Applied voltage : 85 kV)
- Fig. 4.15 Collection efficiency for analysis vs. experiment data
(Applied voltage : 85 kV)
- Fig. 4.16 Collection efficiency for various pass velocities
(Applied voltage : 0 kV)
- Fig. 4.17 Collection efficiency for various pass velocities
(Applied voltage : 85 kV)
- Fig. 4.18 Collection efficiency for various applied voltage
(Pass velocity : 3 m/s)

Photographs

- Photo. 2.1 Photograph of the STT
- Photo. 3.1 Dust density of inlet vs. outlet
- Photo. 3.2 Stack sample
- Photo. 3.3 Digital air counter
- Photo. 3.4 Partical counter
- Photo. 3.5 Current meter
- Photo. 3.6 Collection efficient experiment of STT

Nomenclature

Symbols

$\bar{c}$	: Average velocity of ion	[m/s]
d	: Particle diameter	[m]
D_i	: Inlet duct area	[m ²]
e	: Electric charge quantity of electron	[C]
E	: Electricfield strength	[V/m]
F_e	: Electric charging force	[N]
k	: Turbulent energy	[m ² /s ²]
N	: Density of ion	
q	: Quantity of electric charge	[C]
r	: Radius of electric precipitation	[m]
Re_p	: Relative Reynolds number	
t	: Particle charging time	[s]
T	: Particle temperature	[K]
u	: Gas velocity	[m/s]
u_p	: Particle velocity	[m/s]
We	: Migration velocity of Particle	[m/s]
Z	: Mobility of ion	[m ² /V · s]

Greek Symbols

ε	: Dissipation rate	[m ² /s ³]
ε_p	: Particle permittivity	[C ² /N · m ²]
μ	: Dynamic viscosity	[N · s/m ²]
μ_t	: Turbulent viscosity	[N · s/m ²]

ρ : Gas density [kg/m³]

Subscripts

i : At inlet of electric precipitation

fi : Field charging

di : Diffusion chargings

p : Particle of charge

제 1 장 서론

급속한 산업 사회의 발전으로 대기오염 문제가 심화되고 국가적으로 환경규제치의 강화 등으로 산업현장의 각 분야에서 집진장치의 수요가 급증하고 있다. 그러나 각기 다른 배출가스의 특성상 집진장치는 배출가스의 종류에 따라 각기의 장치를 설치해야 하므로 경제적으로 볼 때 기업의 생산활동에 어려움이 예상되고 집진장치의 최적설계 및 제어기술이 적용되지 않을 경우 설비의 과대한 초기투자에도 불구하고 환경개선효과는 환경규제치를 만족하지 못하여 실패로 끝날 수 있으므로 이를 방지하기 위한 적절한 방지기술이 요구되고 있다.

일반적으로 건식 전기집진기는 오일/석탄을 연료로 하는 대형 화력발전소(thermal power plant)의 배기가스 처리용으로 주로 이용되고 있다. 그러나 부유미립자가 액상의 경우에는 전기집진기의 운전시 방전극 표면에 얇은 막이 형성되어 방전효율을 저하시키기도 하고 집진판의 역코로나(back corona)를 발생시키는 등 처리에 어려움이 내재되어있다. 또한 성분이 여러 종류가 복합된 액상입자(액적)의 경우 전기저항율(resistivity)이 다양하고 타르(tar)와 같이 집진판 표면에 흘러내리다 고형화되어 집진 효율을 급격히 감소시키기도 하며 또한 화재의 원인이 되기도 한다.

현재까지 전세계적으로 악성오염물질에 대한 처리방법으로 습식 전기집진기를 사용하고 있는바 이는 높은 장치비와 설치장소의 제약으로 중소형 집진장치로는 채택하기 어렵고 국내 기술도 초보적인 단계에 있다고 할 수 있다.

국내에서는 습식 전기집진기와 건식 멀티싸이크론형 전기집진기가 개발된 적은 있으나 본 기술과 같이 복합적인 처리능력을 갖고 통과유속이 빠른 전기집진기는 개발된 적이 없으며 지금까지 대부분

분 습식 전기집진기는 풍량에 비해 장치크기가 크고 설비투자가 과다해 일반 중소기업에서는 외면 당해 왔으며 건식 멀티싸이크론형 전기집진기는 건식으로 분진만 처리가 가능했기 때문에 적용에 한계가 있었다. 특히 대부분 산업 현장에서는 오일 및 흙 그리고 더스트가 함유된 배출가스에 백필터 및 흡착탑을 설치해 매디아 표면에 타르형 미스트가 표피층을 형성하면서 과다한 압력손실로 인하여 경제적인 손실을 감수하고 결국엔 장치가 무용지물이 되는 안타까운 현실을 보여주고 있다.

본 논문에서 연구하고자 하는 단일 원통형 습식 전기집진기 (이하 STT)는 기존 전기집진기의 핵심인 전원공급장치(power supply)를 1/20 수준으로 크기와 중량을 획기적으로 줄여 제작원가를 낮출 수 있으며 특히 기존 전기집진기의 멀티형 집진 및 방전부(multi-point)는 여러 개의 집진부와 방전부가 개별적으로 배열되고 유지됨으로 성능유지가 가능하나 본 장치는 1개의 절연애자(insulator)와 1개의 방사체로 높은 효율을 보장함과 동시에 배출가스의 통과유속을 1~6 m/s까지 획기적으로 높일 수 있어 장치 크기가 콤팩트한 구조로 되어 있다. 즉, 본 연구집진기 STT의 장점은 적은 설치 면적으로 많은 집진 용량을 처리함에 있다고 하겠다.

본 논문에서는 이러한 STT를 기존의 건식·습식 전기집진기와의 운전 효율 및 집진 용량 비교에 대해 연구 서술하였으며, 본 논문에서 실험 측정된 시제품 STT는 시제품설계에 앞서 집진 용량과 관계된 입·출구 덕트크기, 집진 주원통의 지름, 입구속도 등 많은 조건에 대하여 수치 유동해석을 수행 설계되었다.

시제품 STT의 실험 운전 시에 발생하는 제약적 실험 요건에 대해서는 STT에 대한 운전 특성을 파악하기 위하여 다양한 유입속도 및 인가 전압 등의 주된 영향인자를 변화 시켜가면서 수치적으로 해석하였고, 이 인자들의 상호작용을 통하여 집진효율과 속도분포·압력손실등의 결과를 제시하였다. 이러한 수치해석 자료는 고효율 전기

집진장치의 개발에 대한 최적의 설계 조건의 기초자료로 제공할 뿐 아니라, 입자의 거동예측이나 해석 모델의 개발에 매우 유용하게 사용되어질 것으로 사료되어진다.

제 2 장 기초 이론

2.1 오염물질 제거장치의 종류

대기오염물질은 입상오염물질(분진)과 기상오염물질로 구분된다. 입상오염물질 제거에 유용한 형태로는 건식제거 장치와 습식제거 장치로 나눌 수 있으며, 기상오염물질 제거 공정으로는 물리적 공정인 흡수, 흡착, 응축 장치의 화학적 공정인 연소장치의 열전환과 촉매 작용전환 설비 등으로 분류할 수 있다.

2.2.1 입상오염물질 제거장치

1) 건식 제거장치

건식제거 장치에 의하여 포집된 입상오염물질(분진)은 건조상태이기 때문에 분진의 폭발 위험성을 내포하고 있다. 그러므로 분진의 폭발을 막고 압력의 방출에 대비한 장치가 필요하다. 건식분진제거 장치는 다음 세 가지 형태로 나누어진다.

- ① 질량적 분리기 : 중강침강장치, 사이클론
- ② 점착력 분리기 : 백필터(bag filter), 포켓 필터
- ③ 전기 분리기 : 전기 집진기

2) 습식 제거장치

입상오염물질에 함유된 기체흐름에 주입된 액적(liquid droplet)에 의하여 포획되므로 대기오염문제가 수질오염문제로 전환된다. 그러므로 오염된 물의 부피가 적고 폐수처리 시설이 구비될 때 유용하다. 습식분진제거 장치로는 여러 가지가 있으나 다음 세가지가 주로 사용된다.

- ① 분무세정기(spray scrubber)
- ② 습식 사이클론 세정기(wet cyclone scrubber)

③ 벤투리 스크러버(venturi scrubber)

Table 2.1 Type of dust collector

집진기 형태	특징	제거입경 (μm)	압력손실 (cm H ₂ O)
중력침강장치	침강탱크에서 중력에 의한 침강으로 집진	10 ~ 50	10
원심집진기	공기흐름으로부터 원심력으로 오염물질들을 분리	10 ~ 50	2.5 ~ 10
습식 사이클론	사이클론실 안에서 원심력 및 물분무에 의한 집진	5	10
백필터	여과재 사용에 의한 집진	1 ~ 10	10
전기집진기	입자의 전기적 대전에 의한 집진	0.1 ~ 10	1 ~ 10

2.2.2 기상오염물질 제거장치

- 1) 흡착(adsorption) : 오염물질이 기상에서 고체상으로 이전된다.
- 2) 흡수(absorption) : 오염물질이 기상에서 액상으로 이전된다.
- 3) 응축(condensation)
- 4) 연소(combustion)

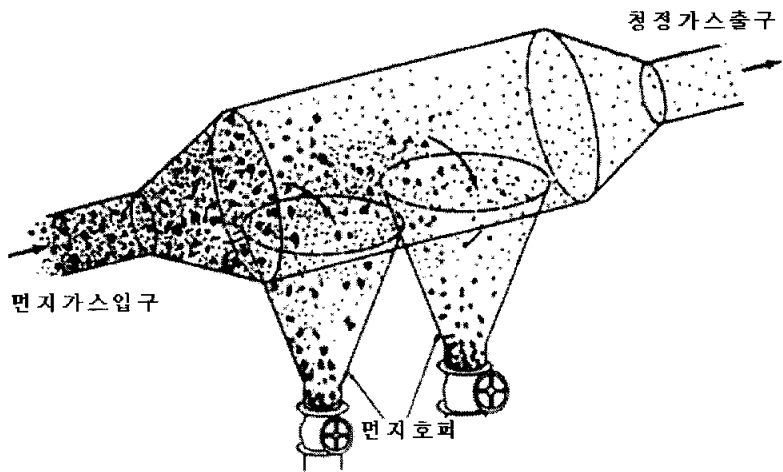


Fig. 2.1 Simple expansion chamber

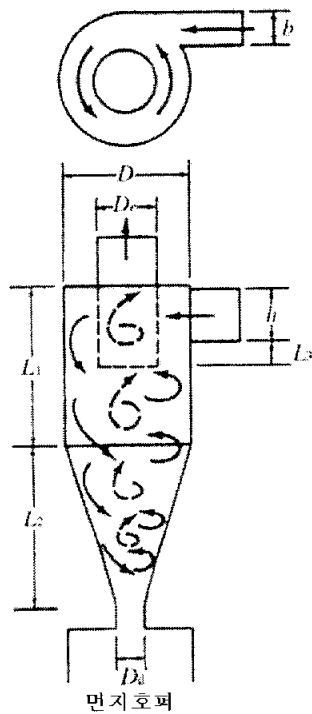


Fig. 2.2 Cyclone

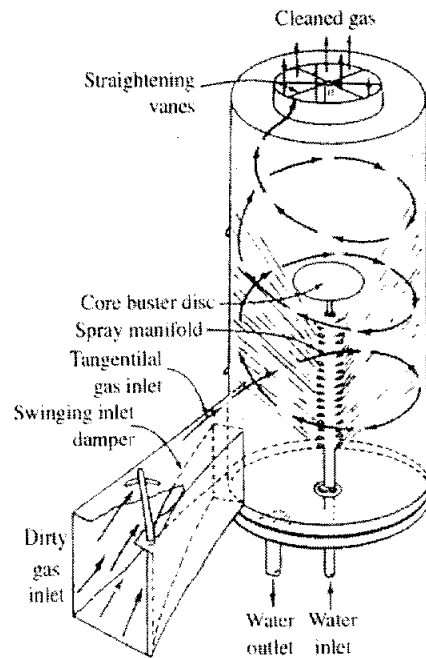


Fig. 2.3 Wet cyclone

2.2 STT 기초이론

2.2.1 전기집진기 집진원리

전기집진기란 직류고전압에 의하여 코로나 방전을 발생시켜 배기 가스 중에 부유하는 미세한 입자상 물질을 대전토록 하여 대전된 입자를 전장내에서 전기력에 의해 가스와 분리하는 작용 즉, 입자를 정전기력에 의해 포집하는 방식이다.

1) 코로나 발생에 의한 가스의 이온화

집진극을 접지하고 방전극에 고전압을 인가하면 방전극으로부터 왕성한 코로나 방전이 발생하고 집진공간은 이온과 전자에 의해 채워진다.

2) 대 전

집진공간에 오염가스를 유도하면 가스 중 dust는 (-)로 대전된다.

3) 집 진

대전된 dust는 정전응집작용을 동반하면서 coulomb력에 의해 집진극으로 이동하고 집진극상에 부착된다.

4) 탈 락

부착된 dust는 집진극에서 (-)전하를 잃고, 수막 또는 수세 등으로 습식포집하여 깨끗한 가스로 배출된다. 습식 전기집진기가 도입되기 전에 건식 전기집진기는 분진의 비저항이 높거나 낮은데서 기인하는 분진의 재비산(re-entrainment)으로 말미암아 집진효율의 감소문제를 겪어왔다. 비저항이 높은 분진은 쉽게 하전이 되지만 유사한 다른 하전된 분진 입자들을 집진전극으로부터 이탈시키고 효율적인 이동속도에 악영향을 미치는 경향이 있다. 또한 비저항이 낮은 분진 입자들은 집진전극에서 쉽게 자신의 전하를 잃어버리고 가스의 유

동에 휩쓸려 되돌아가기가 쉽다. 습식 전기집진기는 분진입자가 집진전극에 형성된 수막에 포집되고 습식 전기집진기의 하부에 흘러 내려감으로써 분진의 재비산문제를 최소화 시켜준다. 습식운전방식의 출현으로 말미암아 설계가 다양화됨으로써 분진의 비저항 문제를 해결하여 전기집진방식의 적용처가 한층 더 확대되었다. 더욱이 습식 전기집진기는 유입가스의 온도를 떨어뜨려 오염물질을 농축시킴으로써 가스흐름으로부터 제거시키도록 작동된다.

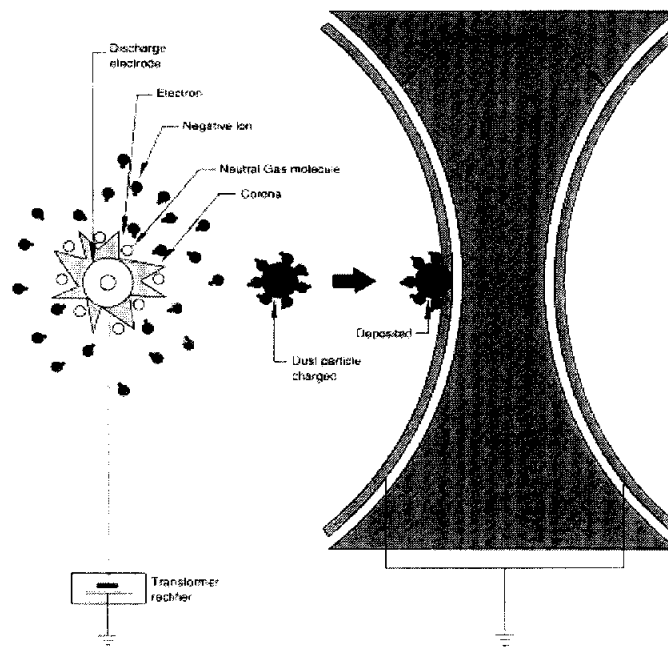


Fig. 2.4 Discharge of corona electricity

2.2.2 STT 집진원리

오염된 가스 입자는 먼저 inlet장치에서 fogging에 의해 상당한 유전율을 가진다. 전기집진부로 유입된 가스 즉, 전단부에서 포집되지 않은 약 $5\mu\text{m}$ 이하의 미세입자(sub micron)를 포함한 가스가 침상형 방전침이 장착된 원통형튜브를 따라 풍속 3.4 m/s의 저속으로 회전하면서 상승한다. 이때 중심부에 설치된 방전침에서 발생된 corona에 의해 공간은 이온과 전자로 채워지고 미세분진은 정전응집작용을 동반하면서 집진원통 내벽면으로 이동 부착하게 된다.

집진원통 내벽에 부착된 분진은 내벽을 타고 흐르는 세정수에 의해 하부 recirculation tank로 이동되어 포집하게 된다.

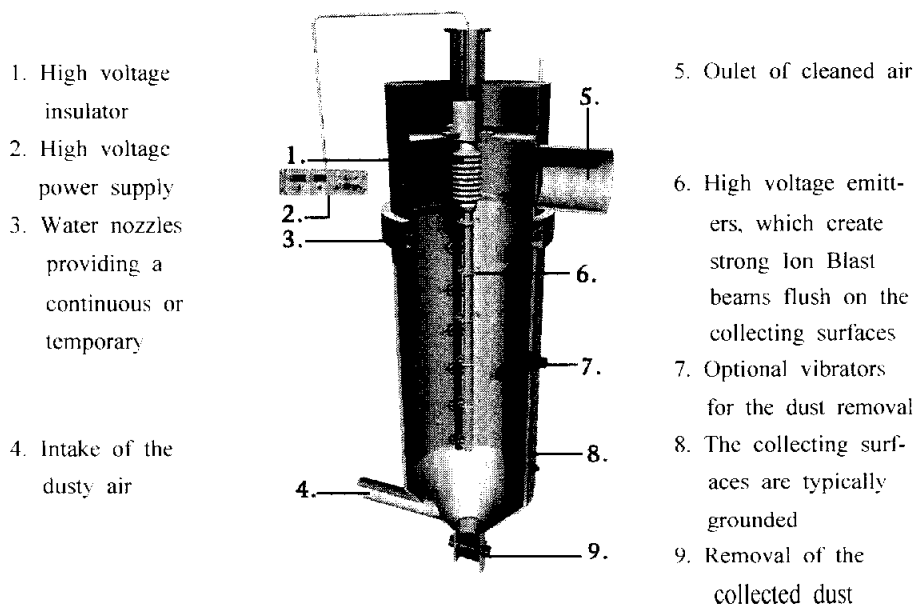


Fig. 2.5 The mechanism of the STT

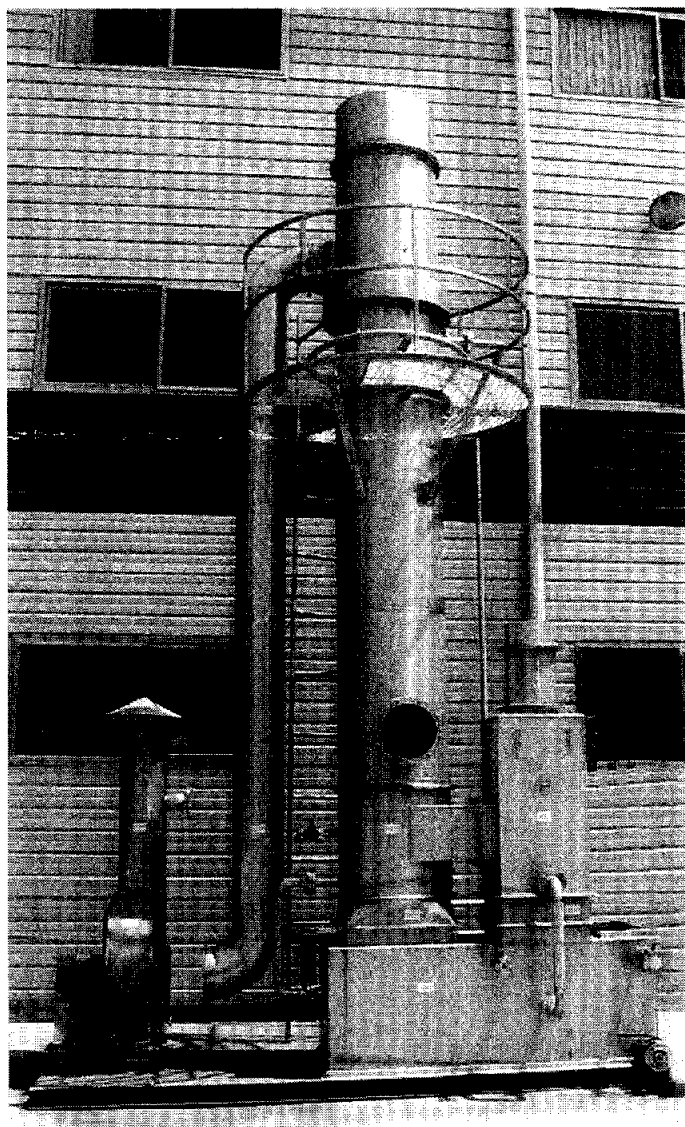


Photo. 2.1 Photograph of the STT

2.2.3 STT 설계 조건 및 설계효율

1) 설계조건 (DESIGN CONDITION)

- KIND OF EQUIPMENT : Single Tubular Type Condensing 습식 전기집진기
- MODEL NO. : HD - 60
- GAS 조건 INLET
 - 1) VOLUME : 60 Nm³/min
 - 2) TEMPERATURE : 50℃
 - 3) GAS 체류시간 : 10 sec
- DUST 체지입자 : 0.01 ~ 1 μ m
- 내통 통과 속도 : 2 ~ 3.4 m/sec
- 압력손실 : 50 mmAq이하
- 인가전압 : 0 ~ 150 KV
- 전류 : 1 ~ 20 mA
- 집진효율 : 95 %
- HOUSING SIZE : 630 Φ x 5950H

2) 설계효율

① 이동속도(drift velocity)

분진 이동속도는 대전된 입자가 집진극을 이동해 가는 속도로써 이것은 집진효율 및 집진면적 등을 산정하는데 중요한 인자이고, 정전인력에 의하여 분진이 집진전극에 이끌려 가는 이동속도를 의미한다. 분진이 미세할수록 이동속도는 느려지게 된다. 포집 효율은 이동속도를 증가시킴으로써 증대될 수 있다. 이동속도는 코로나전력(corona power)에 직접적으로 비례관계에 있다. 코로나전력은 방전부와 집진전극 사이의 코로나전류(corona current)와 코로나전압(corona voltage)과의 곱으로써 구해질 수 있다. 코로나전류는 방전부와 집진전극 사이의 공간에 존재한다.

이동속도는 분진의 입자경, 전계강도, 가스점도, 가스온도, 분진의 형상 등에 따라 좌우되는 것으로 이에 대한 정상적인 공식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$W = \frac{1.1 \times 10^{-14} \times P \times E^3 \times dP}{\mu g} \quad (2-1)$$

W : 분진이동속도 (m/sec)

dP : 입자경 (μm)

E : 입자가 대전 또는 포집된 곳의 전계강도(V/m)

μg : 가스점도

② GAS 이동속도

$$\text{최대이동속도(m/s)} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{60}{\frac{\pi}{4} 0.6382^2} \times 60 = 3.25 \quad (2-2)$$

$$\text{접촉시간(sec)} = \frac{3.2 \text{ m}}{3.25 \text{ m/s}} = 0.98 \approx 1 \quad (2-3)$$

③ 설계 집진효율 (η)

E.P(원통형)의 실용상 설계법으로 Deutsch-Anderson의 식을 이용한다.⁽⁷⁾

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2 \times We \times L}{R \times U}} \quad (2-4)$$

* R : 집진극의 반경 = 0.319m

* U : 가스의 집진극 통과유속 = 2m/s

* We : 입자의 집진극 이동속도 (m/sec)

※ 입자의 집진극 이동속도

$$We = \frac{1.1 \times 10^{-14} \times P \times E^2 \times dP}{\mu g}$$

$$= \frac{1.1 \times 10^{-14} \times 2.4 \times 407,523.511^2 \times 0.5}{0.0067} = 0.3272 \text{ (m/s)} \quad (2-5)$$

E : 충전장의 세기, $\frac{130 \text{ KV}}{31.9 \text{ cm}} = 407,523.511 \text{ (V/m)}$

P : 입자의 유전율에 관한 계수 (cunninghum 보정계수 = 2.4)

dP : 포집가능한 최소입자경 (μm)

μg : 공기의 점성계수 = 0.0067 kg/m · h (25℃, 1기압)

※ L : 최소입자경 $0.5 \mu\text{m}$ 이상의 입자를 집진하기 위한 집진극의 길이 (m)

$$L = \frac{S \times V}{We} = \frac{0.319 \times 2}{0.3272} = 1.95 \text{ m 이상} \quad (2-6)$$

S : 집진극과 방전극의 거리 (m) = 0.319

V : 가스속도 (m/s) = 2

We : 입자의 이동속도 (m/s) = 0.327

※ 집진극의 길이가 $0.5 \mu\text{m}$ 의 95% 이상 제거효율을 위해 최소 1.95 m 이상되어야 한다. 하지만, $0.5 \mu\text{m}$ 이하의 입경도 제거되어야하므로 실험을 위해서 집진극 길이를 3.2 m로 제작함.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{2 \times 3.2 \times 0.3272}{0.319 \times 2}} = 1 - e^{-3.282257} = 0.96 = 96\% \quad (2-7)$$

제 3 장 집진 효율 실험

3.1 실험방법

3.1.1 실험평가 항목

1) 집진성능평가

- 평가대상오염물질 : 먼지(분진)
- 정의 : 물질의 파쇄, 선별, 퇴적, 이적 기타 기계적 처리 또는 연소, 합성 분해 시 연돌에서 배출되는 먼지측정. 단, 먼지 농도 표시는 표준 상태(0℃, 1기압)의 건조배출가스 1 Sm³중에 함유된 먼지의 중량
- 측정위치 : 원칙적으로 굴뚝의 굴곡부분이나 단면 모양이 급격히 변하는 부분을 피하여 배출가스 흐름이 안정되고 측정작업이 쉽고 안전한 곳을 선정한다. 측정자의 안정성 등을 고려 하부 내경의 2배 이상과 상부 내경의 1/2배 이상 되는 지점에 측정 위치를 선정한다.
- 평가방법(중량법)

$$\text{제거효율} = \frac{\text{입구에서의 먼지농도} - \text{출구에서의 먼지농도}}{\text{입구에서의 먼지농도}} \times 100\%$$

2) 압력손실평가

- 평가내용 : 집진기 본체 inlet과 outlet의 압력차
- 측정방법 : Anemomaster사용
- 정의 : 일반적으로 집진기는 자체 압력손실을 갖는다. 압력손실은 동력과 직접적인 관계가 있고 결국 유지관리비와 관련이 있기 때문에 저압에서 운전되는 것이 중요하다. 따라서 전기집진 50 mmAq이하에서 운전되는 것을 원칙으로 설계하였음
- 측정위치 : 집진기 입구, 집진기 출구

- 평가방법 : 집진기 출구 압력 - 집진기 입구 압력

$$\text{집진기 자체 압력} = \text{출구 압력(mmAq)} - \text{입구 압력(mmAq)}$$

3) 통과풍속

- 평가대상 : 집진기 본체 내부
- 측정방법 : 디지털 풍속계
- 정의 : 현재 기존의 전기 집진기는 집진기내 통과 풍속이 0.5~1 m/s 이내고 한정되어 설계된다. 하지만 STT는 최소 2 m/s로 설계되며 이 factor로 집진기 size는 결정되고 대단히 중요한 요소이다.
- 측정위치 : 집진기 본체의 중앙 일부
- 평가방법[속도 : m/s] : 디지털 풍속계로 음공진 효율을 측정 95%이상의 효율을 유지하고 풍속을 측정한다.

4) 제거입경

- 평가대상 : 인입 오염물질의 입경별 제거효율
- 측정방법 : Particle Counter(계수법)
- 정의 : 대부분의 분진은 0.5 μm 이상의 입경크기를 유지한다. 따라서 STT는 0.5 μm 이상의 분진에서는 95% 이상의 높은 집진 효율을 나타내는 것이 목표이다. 그러나 0.01 μm 의 입경을 가진 아주 미세한 입경은 제거할 수 있을 것으로 판단되며 이것은 집진기의 사용처를 결정짓는 요소가 될 것이다.
- 측정위치 : 집진기 본체의 입구 입경량과 집진기 본체의 출구 입경량을 비교
- 평가방법 (계수법)

입경 제거효율 =

$$\frac{\text{입구에서의 입경의 개수} - \text{출구에서의 입경의 개수}}{\text{입구에서의 입경의 개수}} \times 100 (\%)$$

5) 사용전류(mA) 평가

- 평가대상 : 집진기 power park에 사용되는 전류
- 측정방법 : Ampere meter
- 정의 : 전류로 집진효율과 안전 관련이 있기 때문에 중요한 요소 중의 하나다. 따라서 저전류에서 고효율의 집진능력이 있는지를 알기 위함이다.
- 측정위치 : Power supply control panel에 내장되어 필요할 때 직독이 가능하다.
- 평가방법 : 제거효율에 따른 전류 사용량 측정.

6) 사용전력 (200 CMM 기준)

- 평가대상 : 집진기 200 CMM을 기준으로 집진기에 사용되는 총 전력 측정 및 계산
- 측정방법 : 이론적인 계산
- 정의 : 개발되는 집진기가 소비전력이 적은 상태에서 고효율의 집진이 가능한지를 알기 위함이다. 이것은 압력손실과 직접적인 관련이 있기 때문에 압력손실이 평가되며 이론적으로 소비전력을 계산할 수 있다
- 평가방법 : 수식에 의한 계산

$$\text{소요동력} = \frac{200(\text{CMM}) \times \Delta p(\text{mmAq})}{6120 \times \text{송풍기의 정압효율}} \quad (\text{kW})$$

3.1.2 실험설계

본 STT의 압력강하 · 통과유속 · 집진성능 · 사용전류를 측정하기 위하여 Fig. 3.1과 같은 집진기 구간에 측정기를 사용하여 측정하였다.

집진기 내부 통과유속과 사용전류는 집진기 내부에 측정기를 삽입하여 측정하였고 집진성능과 운전압력강하는 집진기 입 · 출구덕트에서 측정 비교하였다.

사용된 측정항목별 기계사양은 Table 3.1과 같으며, 집진 분진측정을 위해 연막탄을 사용하였다.

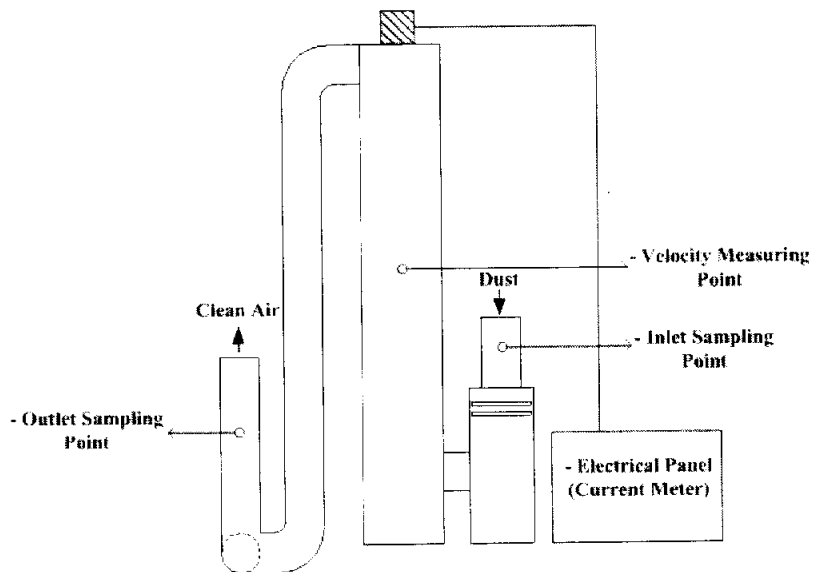


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental system

Table 3.1 Date log of STT

측 정 항 목	기 계 명	Model No.	제 작 회 사
분 진	Stack Sample	CE-22AS , AAS	정엔지니어링 (한국)
압 력 손 실	Anemomaster	350M/xc-454	Testo(독일)
통 과 풍 속	Digital Air Counter	350M/xc-455	Testo(독일)
제 거 입 경	Partical Counter	GT-321	Met One(미국)
사 용 전 류	Current Meter	-	VSI(한국)

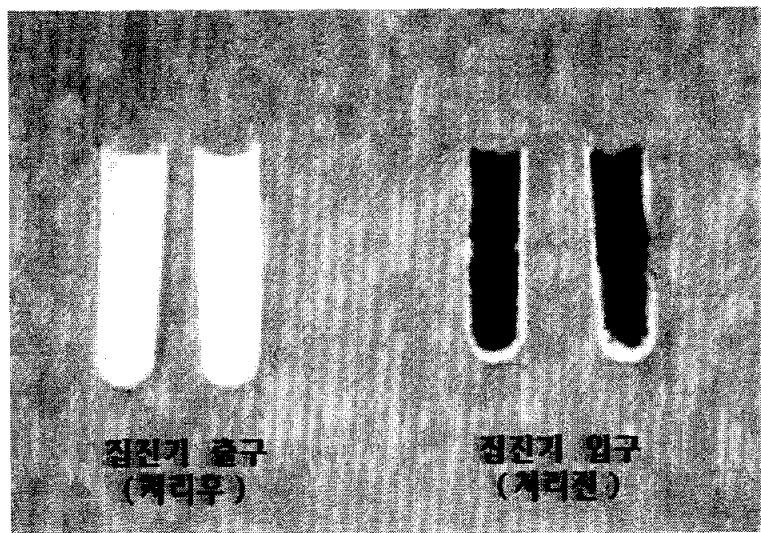


Photo. 3.1 Dust density of inlet vs. outlet

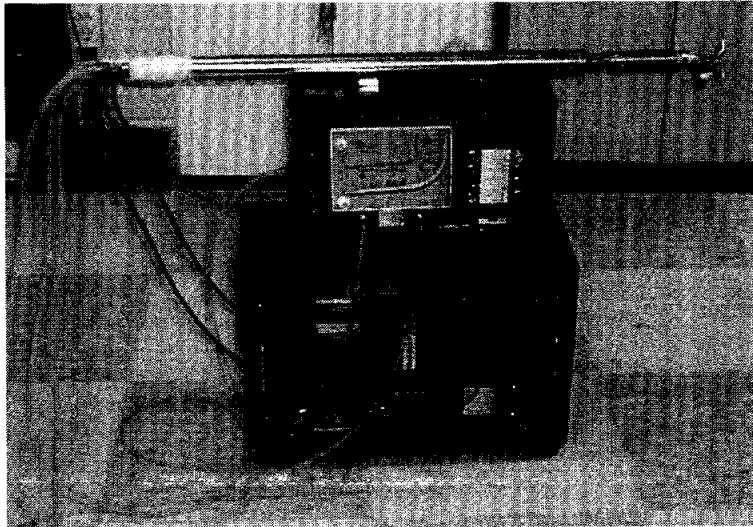


Photo. 3.2 Stack sample

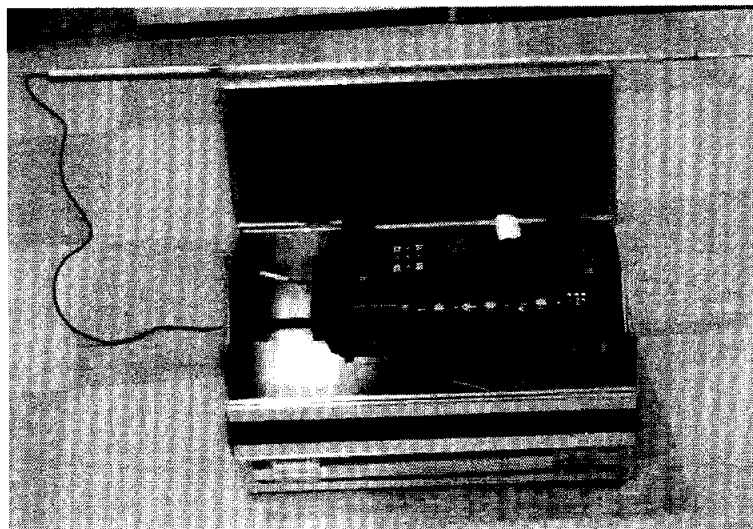


Photo. 3.3 Digital air counter



Photo. 3.4 Partical counter



Photo. 3.5 Current meter

3.1.3 실험방법

모든 집진장치는 입자 크기에 따라 집진효율이 다른데, 특히 Sub micron 입자의 집진이 가장 어려우며, 이러한 입자가 인체로 흡입되면 몸 속에 축적되어 건강에 매우 해롭다.

Fig. 3.2의 그래프는 더 높은 인가전압이 Sub micron 이하의 입자의 분리 효율에 크게 영향을 미치는 것을 보여주고 있다.

전기집진기 입자크기별 집진효율 측정에서 $0.3\ \mu m$ 이상의 입자는 필드자장에 의한 장대전으로 대전이 잘되며, $0.3\ \mu m$ 이하의 입자에서는 작은 입자에 대한 확산대전으로 Fig 3.2와 같이 $0.3\ \mu m$ 범위의 입자보다 집진효율이 높다.

이런 원리로 일반적인 전기 집진기 성능측정에서 브라운운동 및 입자 대전률이 낮아 집진효율이 가장 적은 $0.3\ \mu m$ 범위의 입자를 측정기준으로 설정한다. 본 측정에서도 최소 집진 입자크기로 $0.3\ \mu m$ 를 설정하여 성능측정을 하였다.

실험방법은 인위적인 오염물질(ash)발생을 위하여 Photo. 3.6과 같이 연막탄을 사용하여 분진을 생성하였으며 STT 시제품의 시험운전을 통한 각기 다른 날의 9번의 반복실험을 수행하였다.

실험조건은 본 논문 2장 설계조건에서 방전봉에 100 kV 이상의 전압 인가가 그 설계조건이나 본 시제품 실험에서는 100kV 이상의 전압을 인가할 경우 집진기 내부 불꽃방전에 의한 화재의 위험이 극복되지 않아 사용전압 85 kV, 내부 통과 풍속 2 m/s인 경우 각 입자별 집진효율 및 분진 집진효율, 전류, 압력강하, 사용전력을 측정하였다.

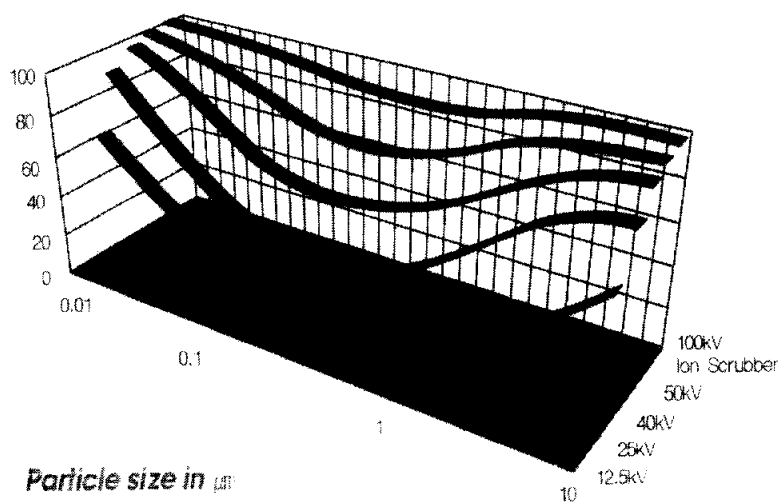


Fig. 3.2 Collection efficiency for various particle diameter

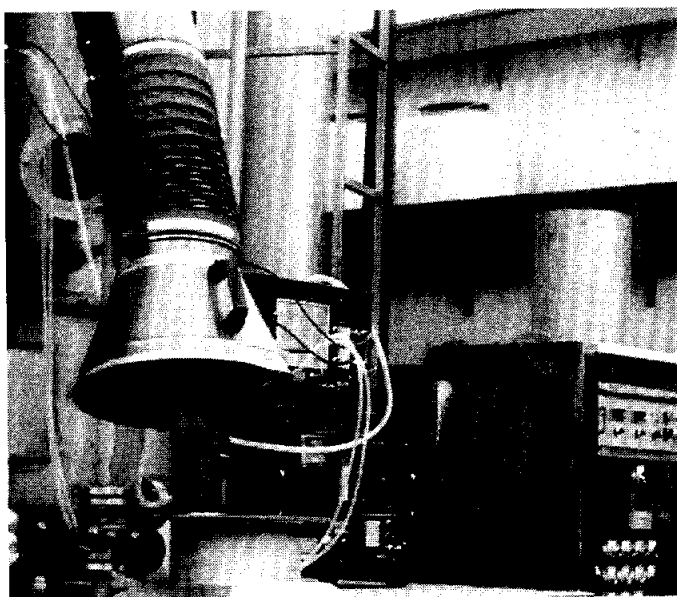


Photo. 3.6 Collection efficiency experiment of STT

3.2 실험결론

3.2.1 실험결과

Table 3.2 Collection efficiency of STT (in the year 2003)

측 정 항 목	단 위	7월 19일	7월 21일	7월 22일	7월 24일	7월 26일	7월 28일	7월 30일	7월 31일	8월 01일
분진	%	97.1	97.0	96.9	96.7	96.6	96.1	96.9	96.8	96.7
압력손실	mm Aq	13	12	12	12	12	12	12	13	12
통과속도	m/s	2	2	2	2	2	2	2	2	2
제거 입자	0.3(μm)	%	95.2	94.3	94.6	95.5	94.6	93.2	94.9	95.5
	0.5(μm)	%	99.2	98.7	98.4	99.4	98.8	98.5	98.4	99.9
	1(μm)	%	99.9	99.9	99.9	99.7	99.9	99.8	99.9	99.9
	2(μm)	%	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
사용전류	mA	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
소요동력 (200CMM)	kW	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2	29.2

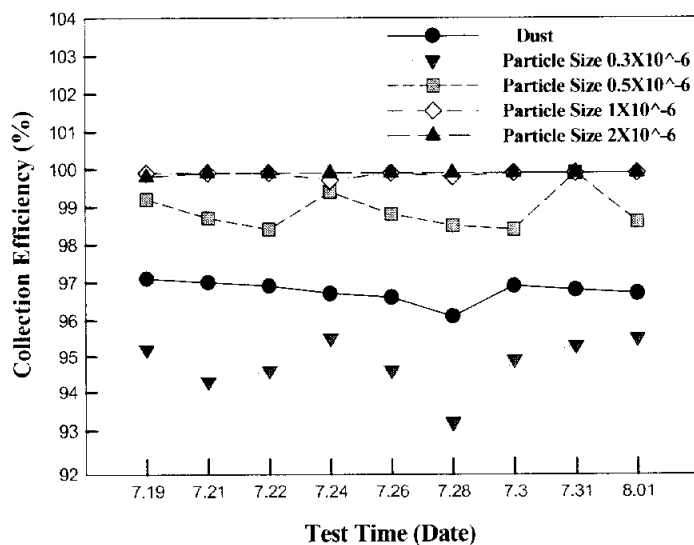


Fig. 3.3 Collection efficiency for various particle diameter
(Pass velocity : 2 m/s, Applied voltage : 85 kV)

3.2.2 실험결론

1) 집진성능(분진)

기존의 동종 전기집진기들은 95% 이상의 집진효율을 얻기 위해서는 통과유속을 0.5~1 m/s로 설계해야 한다. 하지만, STT 통과유속은 2.0 m/s로 운전하여도 95% 이상의 효율을 얻었다.

따라서 통과유속이 일반 전기집진기에 비해 2배에서 4배정도 빠르기 때문에 STT를 절반이상 콤팩트하게 제작 설치할 수 있다.

2) 압력손실

기존의 동종 집진기 자체 압력손실은 50 mmAq정도이다. 하지만 STTC는 10~15 mmAq의 압력손실이 전부다. 이는 집진기 내부에 원통형으로 방전극 1개만 들어있어 속도압외 압력손실이 전혀 일어나지 않는다.

3) 통과유속

실험을 위해서 통과유속은 항상 2.0 m/s가 되도록 운전하였다. 통과유속이 2.0 m/s일 때 집진효율과 압력손실을 검토한 결과 기존의 집진기 통과 유속 0.5~1 m/s와 같은 효율을 얻을 수 있었다.

4) 제거입경

Partial Counter로 처리 전후의 입경을 측정한 결과 대부분 측정 입경의 95% 이상의 제거효율을 얻을 수 있었다. 특히 0.3 μm 는 입자중에 제일 제거하기 어려운 입경이다. 따라서 0.3 μm 의 입경이 제거되면 그 이하·이상의 입경은 0.3 μm 보다 높은 효율을 나타내는 것으로 본다.

제 4 장 수치해석

4.1 집진기 유동 수치해석

4.1.1 수치해석 가정 및 이론해석

1) 수치해석 가정

본 연구에서 STT의 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

가. 유체의 열역학적 물성치(밀도, 점성계수)는 상수로 가정한다.

나. 오염에 의한 유동저항은 무시한다.

다. 유로에서의 유동 분산을 동일하게 이루어진다.

2) 지배방정식

Fluent는 유체 유동의 기본식인 Navier-Stokes 방정식을 운동량 및 질량보존법칙을 만족시키기 위해 용이하도록 적분으로 기초방정식을 이산화하는 방법인 FVM(Finite Volume Method)을 이용하여 이산화를 수행한다. 또한 연속방정식과 운동량 방정식의 결합을 위해 압력 보정식을 사용한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation)해법을 도입했다.

사용된 난류 해석모델로는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

3) Standard $k-\epsilon$ 모델

① Standard $k-\epsilon$ 모델

난류 모델 중 가장 단순하면서도 완전한 모델은 2개의 수송방정식의 해가 난류속도(turbulent velocity)와 난류특성길이(length scale)를 독립적으로 결정되어지게 하는 2차 방정식(two equation) 모델이다. 표준 $k-\epsilon$ 모델이 이런 형태의 난류모델이고, Jones와 Launder가 제안한 이래로, 실제적인 공학 유동 계산에서 가치 있는 난류모델이 되어 왔다. 수치적으로 튼튼하고, 경제적이며 넓은 범위에서도 합리적

인 정확성을 지니고 있어서, 산업체 응용분야와 열전달 simulation에서도 널리 사용되어지고 있다. Standard k- ϵ 모델은 반경험적 모델(semi-empirical)이고, 방정식의 유도는 현상학적인 고찰과 경험론에 의존한다.

ϵ 에 대한 수송방정식은 물리적 증명을 사용하여 얻어지는 반면, k에 대한 수송방정식은 완전 방정식으로부터 유도된다. k- ϵ 모델의 유도에서 유동은 완전 발달된 난류이며, 분자점성도(Molecular Viscosity)의 영향은 무시한다는 것을 가정한다. 따라서 Standard k- ϵ 모델은 완전 발달된 난류 유동의 경우만 적합하다.

② Standard k- ϵ 모델에 대한 수송방정식

난류 운동에너지와 소산율은 아래의 수송방정식으로부터 유도된다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4-1)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4-2)$$

G_k : 평균 속도 구배로 인한 난류 운동에너지의 생성

G_b : 부력에 의한 난류 운동에너지의 생성

Y_M : 총괄 소산율에 대한 압축성 난류 변동에 대한 기여도

$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$: 경험 상수

σ : 난류 Prandtl 수

③ 난류 점성(Turbulent Viscosity)의 모델링

와류, 혹은 난류 점성도, μ_t 는 아래와 같은 k와 ϵ 의 조합으로 계산된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4-3)$$

C_μ : 상수

④ 모델 상수

모델 상수의 값은 다음과 같다.

$$C_{1k}=1.44, \quad C_{2k}=1.92, \quad C_\mu=0.09, \quad \sigma_k=1.0, \quad \sigma_\varepsilon=1.3$$

4) 경계조건

① 입구조건

본 연구에서는 공기를 유체로 사용하여 완전발달된 난류유동을 해석하였다. STT에 대해 입구측의 공기는 각각 집진기 내부통과 속도가 1~6 m/s에 이르는 속도(m/s)로 유입되며, 유입 압력조건은 101325 Pa이다. 이상의 조건에 대해 모든 유동은 난류 유동이며 입구의 난류강도는 5%를 적용하였다. 입구 난류운동에너지 및 난류소난율은 난류 특성길이 및 난류강도를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = 0.07L, \quad k = \frac{3}{2}(u_i L)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (4-4)$$

여기서, l 은 난류 특성길이, L 은 전기집진기의 입구측 특성길이(= D_i), u_i 는 유체의 유입속도를 의미한다. D_i 는 입구측 면적을 $\pi D_i^2/4$ 와 같이 놓고, D_i 를 구하여 대입하였다.

② 벽면의 경계조건

벽면에서의 유체유동조건은 점착조건(no slip condition) 및 Neumann

형 경계조건을 적용하였다.

$$u=v=w=0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial n}=0 \quad (4-5)$$

여기서, n 은 경계면에 수직한 방향을 의미하며, Φ 는 k , ε 및 T 등을 포함한다.

③. 출구조건

STT의 입·출구측 사이에 질량보존법칙이 유지되도록 하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0 \quad (4-6)$$

여기서, n 은 출구 경계면에 수직한 방향을 의미한다.

4.1.2 수치해석 모델 및 방법

일반적인 전기 싸이클론 집진기 내부 통과 입자의 집진효율이 입자가 싸이클을 통과하는데 필요한 잔류시간(residence time)과 입자가 집진되는 벽면까지 이동하는데 필요한 횡단시간(migration time)의 비로써 결정된다. 즉, 집진기 집진효율에 집진기 내부통과 속도분포에 의한 영향을 많이 받는다.

Figure 4.1은 집진기 내부 상부 절연애자를 제외한 부분과 하부 유입부분을 제외한 실제 집진이 이루어지는 집진기 내부 1~3.5 m 구간에 집진기 통과풍속의 데이터 획득을 위한 surface를 해석 격자내부에 만들어 두었다. 또한, 집진 내부 공기 유동형태를 파악하기 위해 데이터획득을 위한 line a, b, c도 해석 격자 내부에 만들어 두었다.

Table 4.1에 본 해석에 사용된 STT의 기하학적 파라메타 및 수치해석해야 할 내부 속도분포 크기 등이 나타나 있다.

일반적인 전기 집진기의 내부 통과 풍속 0.5~1 m/s이나 본 수치해석에서는 집진기 본체에 평균속도분포가 1~6 m/s인 속도분포를 일으키는 입구속도를 유입하였다.

모든 해석은 직교 좌표계에서 body-fitted grid의 3-D axis로 수행하였다. 해석모델은 집진기 전구간에 대해 선화유동이 아니므로 Standard k- ϵ 모델을 사용하였다.

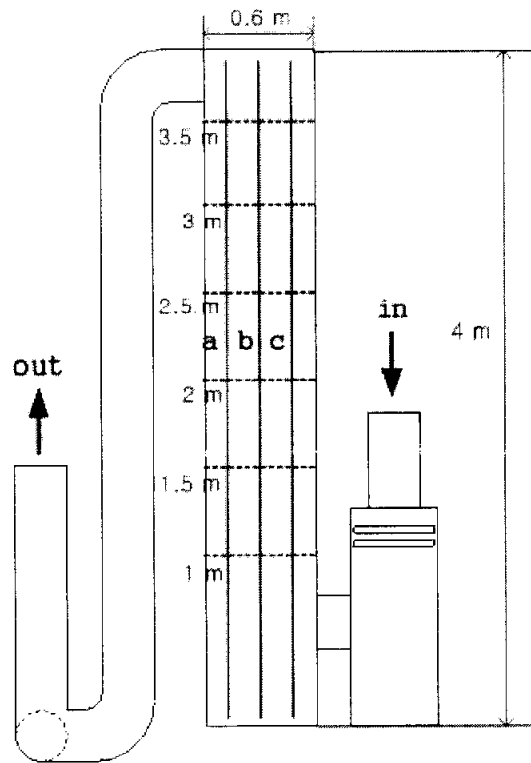


Fig. 4.1 Schematic diagram of analysis model

Table 4.1 Geometric parameters and boundary conditions of analysis cases which were investigated numerically

집진기 주 원통 높이 [m]	4
집진기 주 원통 지름 [m]	0.6
집진기 입구 덕트 지름 [m]	0.3
집진기 출구 덕트 지름 [m]	0.3
내부 속도 분포 범위 [m/s]	1~6

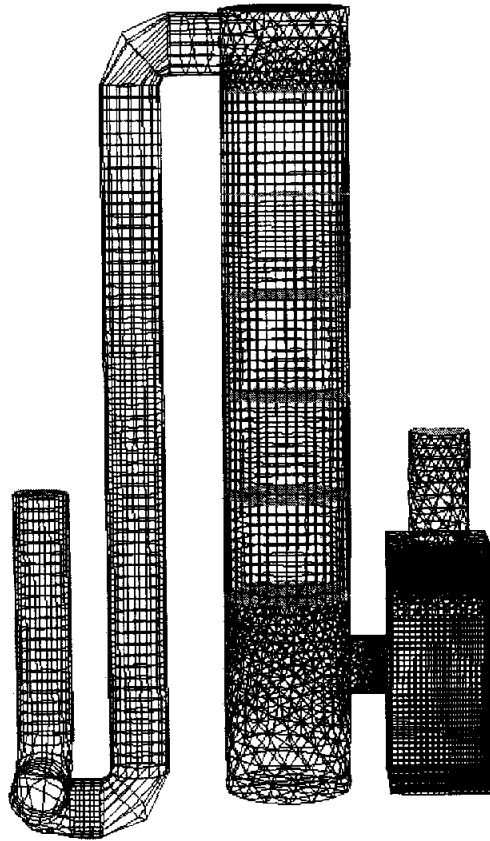


Fig. 4.2 Grid configuration for the total STT

4.1.3 해석결과 및 고찰

1) 속도분포

STT 내부 속도 분포크기가 1~6 m/s일 때 집진기 입구 유입속도는 3~18 m/s로 나타났다.

집진기 하단부 속도분포를 살펴보면, 흡입측에서 들어온 공기 중 일부는 하단부를 한 번 회전한 후 다시 흡입되고 있는 공기와 충돌하여 와류를 생성한 후 집진기의 외벽을 따라 회전하면서 상승하고 있는 것을 알 수 있다.

전반적인 집진기 내부의 속도분포는 모든 입구속도에 대하여 Fig 4.3과 거의 유사하며, 선회(swirl)의 형태를 나타내고 있다. 선회(swirl)라는 현상은 구조적으로 forced vortex와 free vortex로 이루어진다. 중심축에서 선회속도가 zero이고 반경방향으로 어느 부분까지 선회속도가 증가하는 forced vortex 영역이 존재한다. 그리고 반경방향의 선회속도의 최대 위치에서부터는 벽면에서 다시 선회속도가 zero로 되는 free vortex 영역이 형성된다. Forced vortex는 유체역학적으로 외부교란에 대하여 원래상태로 돌아가려는 복원력이 있는 안정성을 지니고 있다. 반면에 free vortex는 외부 교란이 주어지면 교란이 증폭되려는 경향을 지니고 있어서 유체역학적으로 불안정한 유동의 영역이다.

Figure 4.6을 살펴보면 공기가 집진기 내부로 유입되면서 속도가 거의 반 이하로 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 a와 c 지점은 집진기 중심축을 기준으로 반대 방향에 위치하여 있기 때문에 속도분포 또한 반대의 경향을 나타내고 있다.

각 유입속도에 대한 집진기 내부의 평균 속도감소를 Table 4.2에 제시하였으며, 그 결과를 Fig. 4.7에 나타내었다.

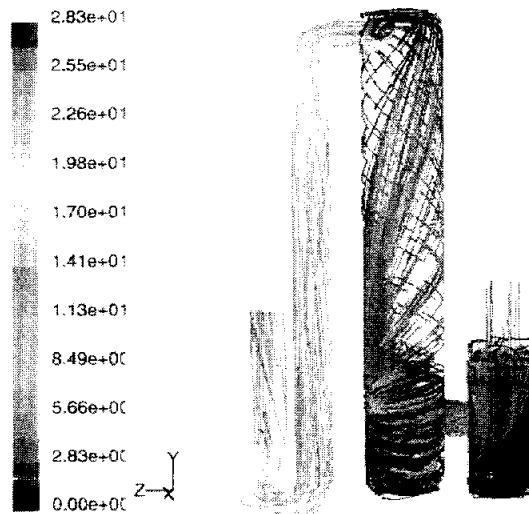


Fig. 4.3 Path line by velocity magnitude (m/s)
at the STT (3 m/s)

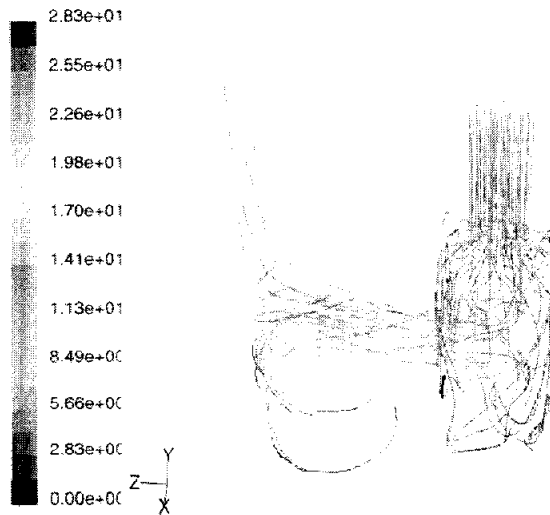


Fig. 4.4 Path line by velocity magnitude (m/s)
at the inlet duct (3 m/s)

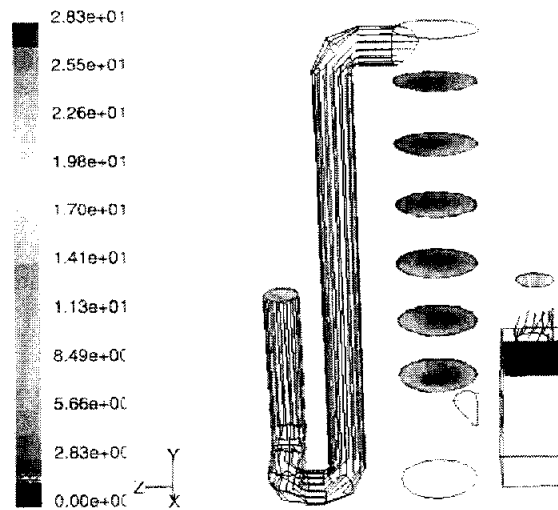


Fig. 4.5 Contours of velocity magnitude (m/s)
at the STT (3 m/s)

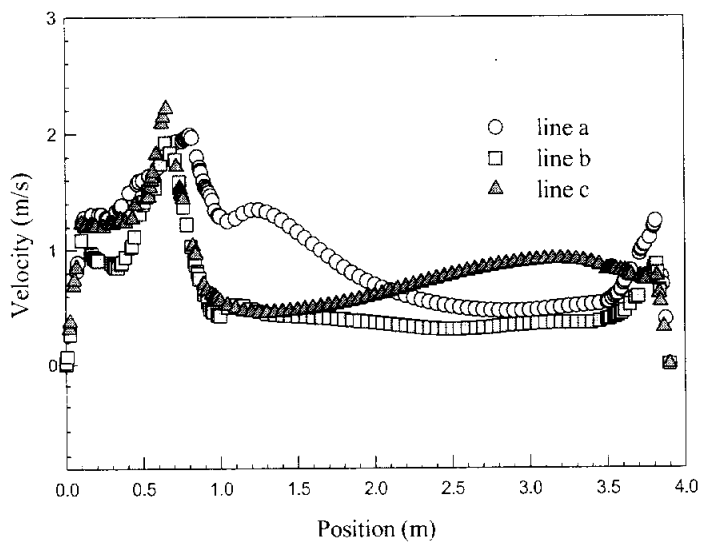


Fig. 4.6 Velocity magnitude at line a, b, c (3 m/s)

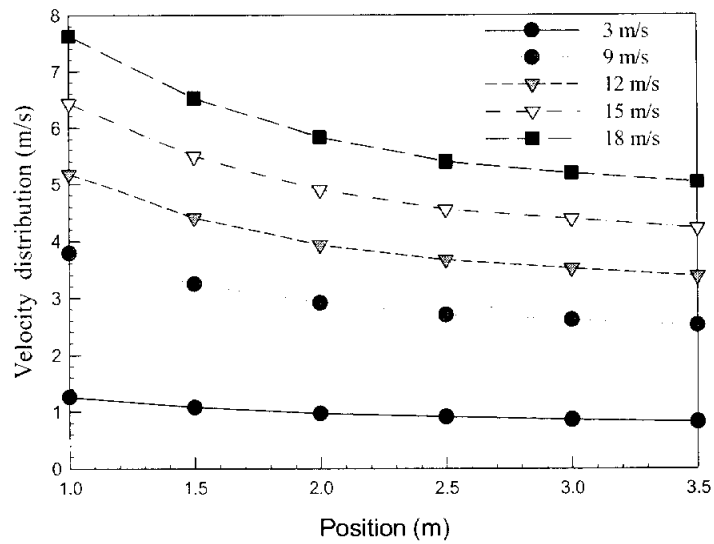


Fig. 4.7 Velocity magnitude at surface
(1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m, 3.5m)

Table 4.2 Average velocity for various inlet velocity in the STT

유입 속도	1 m	1.5 m	2 m	2.5 m	3 m	3.5 m	평균속도 분포
3 m/s	1.2632	1.0765	0.9695	0.9107	0.8610	0.8243	0.9847
9 m/s	3.7900	3.2484	2.9110	2.6996	2.6107	2.5158	2.9626
12 m/s	5.1865	4.4081	3.9283	3.6636	3.5089	3.3775	4.0121
15 m/s	6.4386	5.4872	4.8928	4.5516	4.3877	4.2166	4.9958
18 m/s	7.6312	6.5265	5.8325	5.3903	5.1949	5.0301	5.9343

2) 압력분포

Figure 4.8은 유입 속도가 3 m/s일 때 집진기 내부의 압력분포 크기를 나타낸 것이다. 각 입구덕트 유입속도 3, 9, 12, 15, 18 m/s는 압력강하 크기만 차이가 날뿐 비슷한 압력분포형태를 나타내었다.

전반적인 집진기 내부의 압력분포형태는 속도분포와 마찬가지로 모든 경우에 대하여 거의 유사하였다. 또한, 집진기 내부 압력 분포는 일정한 형태를 보였다.

Table 4.3은 집진기 내부 속도분포가 1~6 m/s를 일으키는 입구속도 범위에 대한 압력강하를 나타낸 것이다. 원통내부 압력강하는 집진기 본체 내부에서 압력강하를 말하고, 전 시스템 압력강하는 집진기 전체 모델에서 입·출구 사이의 압력강하를 말한다. 압력강하는 출구에서 0 Pascal로 두어 시스템 입구에 걸리는 상대적인 압력수치로 압력강하를 계산하였다.

집진기 본체 및 전 시스템의 압력강하는 입구속도가 증가할수록 증가하였다.

압력강하를 고려한 운전에서는 일반 전기집진기가 100~1000 Pa이고, 접선유입식 싸이클론집진기의 유입가스 속도가 7~15 m/s에서 압력강하 900~1000 Pa로 운전한다.⁽¹¹⁾ 전기집진기의 전기적 방전이 되는 잔류시간을 감안한 효율과 전 시스템의 압력강하를 생각할 때, 1 kPa이상의 압력강하가 일어나는 일정 속도이상의 공기유입은 집진 용량은 늘어나지만, 송풍기 선정과 팬동력 소비에 문제가 있을 수 있다.

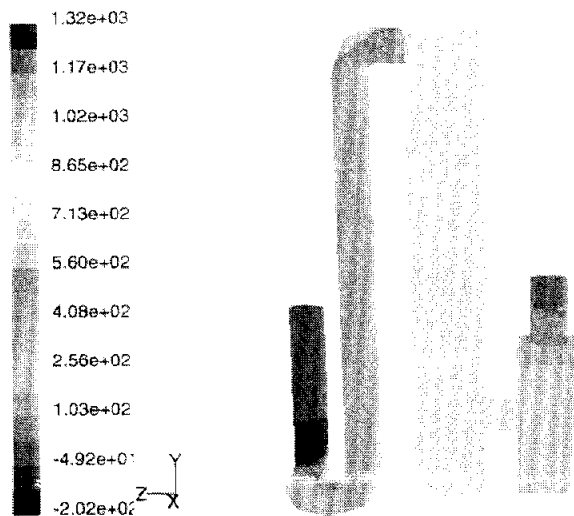


Fig. 4.8 Pressure contour (Pa) at STT (3 m/s)

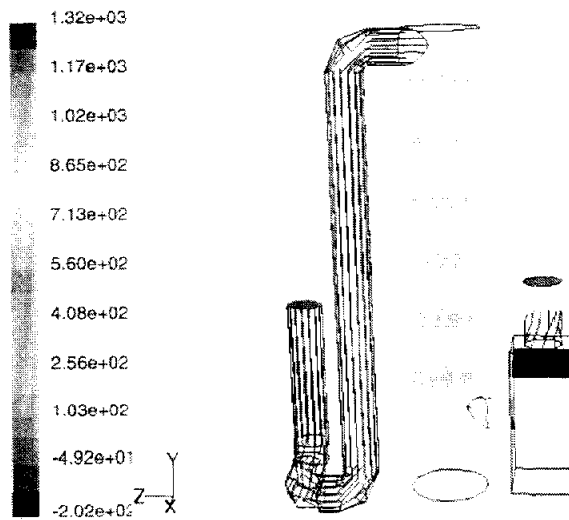


Fig. 4.9 Contours of pressure magnitude (Pa) at STT (3 m/s)

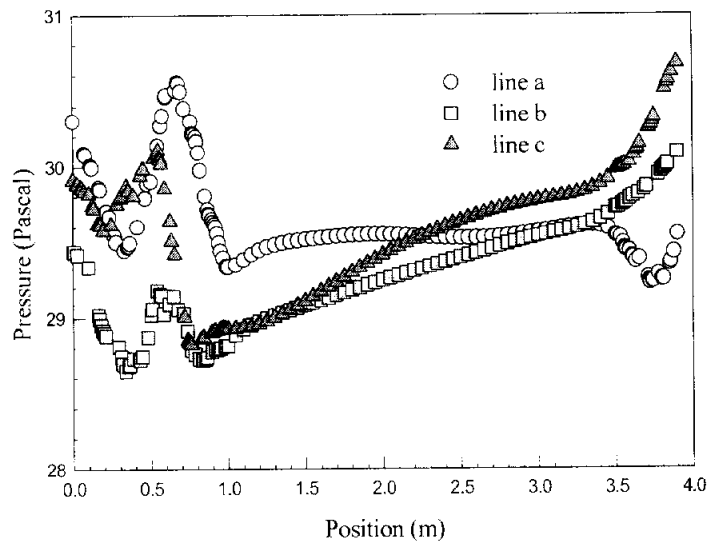


Fig. 4.10 Static pressure at line a, b, c (3 m/s)

Table 4.3 Average pressure for various inlet velocity in STT

유입 속도	주 원통 입구압력	주 원통 출구압력	원통내부 압력강하	전 시스템 압력강하
3 m/s	30.41	21.99	8.41	47.80
9 m/s	268.97	194.35	74.61	424.52
12 m/s	477.27	343.24	134.03	752.95
15 m/s	743.64	535.50	208.13	1173.39
18 m/s	1068.52	768.87	299.65	1685.69

3) 일반집진기와 풍량에 따른 내부 통과 속도 비교

Figure 4.11은 STT 풍량과 일반전기 집진기 사용 풍량을 STT도입 덕트 단면적(0.07 m^2)로 환산하여 집진기 집진용량을 각 유입 속도 별로 비교한 그래프이다.

일반 습식 전기집진기의 풍량은 집진극 면적 1 m^2 당 $1.5 \sim 4.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 이고 그 때 평균 내부통과 풍속이 $1 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 이다.⁽¹²⁾ 이를 계산하면 STT 모델 입구면적 0.07 m^2 에 대한 평균 내부 통과 풍속이 $1 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 구간에 드는 습식 전기집진기 입구속도는 $1.6 \sim 5 \text{ m/s}$ 이다. STT는 일반 전기집진기 내부 통과풍속 $1 \sim 2.5 \text{ m/s}$ 구간에 서 입구속도가 $3 \sim 7 \text{ m/s}$ 이므로 이는 같은 집진 가스용량 일 때 일반 습식 집진기보다 집진 통과풍속이 작아 전기장이 걸린 경우 하전량의 증가로 공기 유동 포집측면에서는 유동분포가 잘 나타남을 알 수 있다.

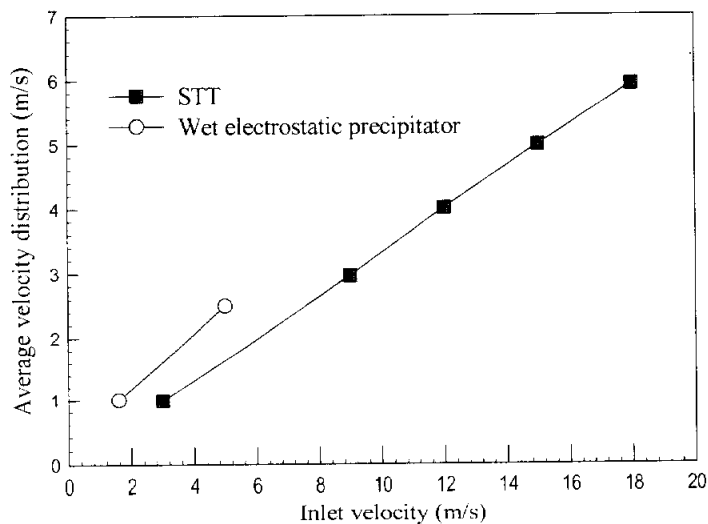


Fig. 4.11 Velocity magnitude for various inlet velocity in the STT and electric precipitation

4.2 집진기 집진효율 해석

4.2.1 수치해석 가정 및 이론해석

1) 전장

전장(electic field)은 하전물체 주위에 존재하고, 전장 내의 하전입자에는 정전기력이 가해진다. 전장강도(field strength)는 입자의 단위 하전량당 형성되는 힘 F_E 의 크기로 표현된다. 전장의 강도, 즉 전계강도는 E 는 다음 식으로 나타난다.⁽⁷⁾

$$E = \frac{F_E}{q} \quad (4-7)$$

여기서, q 는 입자의 하전량이다. 보통 하전량 q 는 최소하전량, 즉 전자의 전하량(1.60218×10^{-19} C)의 n 배로 나타내어 진다.

따라서, 강도 E 의 전장 내에서 n 개의 전자 축적을 갖는 입자에 작용하는 힘은 다음 식으로 주어진다.

$$q = ne \quad (4-8)$$

$$F_E = neE \quad (4-9)$$

식 (4-9)은 에어로졸에 작용하는 정전기력을 나타내는 식이다.

2) 입자의 대전

전기집진기 내의 입자의 대전되는 원리는 크게 전기장 대전과 확산 대전이라는 두 가지의 대전 메커니즘으로 구분된다. 이 두 대전 메커니즘의 적용은 입자의 직경에 따라서 달라지는데, 일반적으로 입자 직경이 $0.5 \mu m$ 이상인 경우에는 전기장 대전이 주된 대전 메커니즘이 되고, 입자 직경이 $0.2 \mu m$ 이하인 경우에는 확산 대전이 주

된 대전 메커니즘이 된다. 그리고 입자 직경이 $0.2 \sim 0.5 \mu m$ 인 경우에는 위 두 대전 메커니즘이 동시에 고려되어야 한다. 전기장 대전은 코로나 방전에 의해 형성된 전기장 선을 따라서 이동하는 가스 이온들과 가스 중의 입자와의 충돌에 의해 이온이 입자에 부착되어 대전되는 원리이며, 이 확산 대전은 이온의 가스 이온의 자유열 운동(random thermal motion)에 의한 이온과 입자들의 충돌에 의하여 입자가 대전되는 원리이며, 이론적으로 전기장의 존재 유·무에 무관하게 대전이 일어난다.

직경이 d 의 입자가 t 초간에 확산하전에 의하여 하전된 하전수(number of charges) n 은, 근사적으로 다음 식으로 나타내어진다.⁽⁸⁾

$$n_{di} = \frac{dkT}{2e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi d \bar{c} e^2 N t}{2kT} \right] \quad (4-10)$$

여기서, k 는 Boltzmann 상수, T 는 하전 입자의 온도, e 는 전자의 전하량, d 는 입자의 반경, $\bar{c}$ 는 이온의 평균 속도($\bar{c}=2.4 \times 10^4$ cm/s), N 은 이온의 농도이다.

그리고 장대전 경우는 다음 식으로 입자에 하전하는 하전수를 구할 수 있다.

$$n_{fi} = \left(\frac{3 \epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \left(\frac{E d^2}{4e} \right) \left(\frac{\pi e Z N t}{1 + \pi e Z N t} \right) \quad (4-11)$$

여기서, Z 는 이온의 전기이동도이고 ϵ_p 는 입자의 유전율로 본 연구에서는 $\epsilon_p = \infty$ 인 경우, 즉 고전도성 입자의 경우로 가정하여 계산하였다.

3) 입자운동방정식

유체의 운동을 기술할 경우에 일반적으로 유체를 연속상으로 가정하고 고정좌표계(Eulerian coordinate)에 대하여 기술하는 반면에, 입자의 운동에 대해서는 이동좌표계(Lagrangian coordinate)를 사용하는 입자궤적의 해석방법이 물리적으로 의미가 있다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 분진입자에 대한 운동방정식은 입자궤개에 대하여 뉴우튼의 운동방정식을 적용하여 해석하는 Lagrangian 궤적 모델을 적용하였다. 지배방정식을 유도하기에 앞서, 본 연구에서 입자의 운동을 기술하기 위해 사용된 가정은 다음과 같다.

- 입자간의 상호작용이 무시 가능한 희박농도 분포이다.
- 입자의 형상은 구형이다.
- 입자에 대전된 전하에 의한 전기장 변화는 무시하고 원통 내부 전가장 세기는 전구간에 대해 일정하다.

단일 입자에 대한 운동방정식을 직교좌표계에서 입자에 대해 x 방향으로 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{d u_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p + F_x \quad (4-12)$$

여기서, $F_D(u - u_p)$ 는 입자에 작용하는 항력으로 다음과 같다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d^2} \frac{C_D Re_p}{24} \quad (4-13)$$

u 는 유체의 속도, u_p 는 입자의 속도, μ 는 유체의 점성, ρ 는 유체의 밀도, ρ_p 는 입자의 밀도, d 는 입자의 지름, C_D 는 유체저항계수이다. Re_p 는 입자 레이놀즈로 다음과 같이 정의된다.

$$Re_p = \rho d |u_p - u| / \mu \quad (4-14)$$

본 연구에서는 식 4-12에서 시간에 대한 F_x 수치를 구하여 입자 개개의 운동궤적을 추적하여 집진 벽면에서 부착 정도를 판단하였다.

4) 수치해석 방법

STTC 집진효율 해석을 위하여 Fig. 4.13과 같은 실제 전기력의 영향력을 받는 부분인 집진 원통을 모델링하였다.

본 해석 모델의 입구 조건은 Fig. 4.12에서 보듯이 4.1 절의 전체 모델해석에서 입구덕트 유입 속도와 집진원통 접선 유입 덕트의 평균속도가 같음을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 4.13의 해석모델의 하부 접선 덕트의 입구 유입속도 크기는 전체모델 해석 입구덕트 유입 속도크기와 같이 설정하였고 입자가 포집이 되는 집진기 내부 0~3.5 m 구간의 벽조건은 trap조건으로 출구는 압력조건을 주었다.

전기장의 세기에 대하여는 다음과 같이 집진기 반경방향으로 단순구배라고 가정하였다.

$$V_0 - V_R = \int_0^r E \, dy = E \int_0^r dy = Er \quad (4-15)$$

난류 모델은 전기장에 의한 유동분포는 영향이 없을 것이라는 가정에 전체 유동 해석과 같이 Standard k- ϵ 모델을 사용하였다.

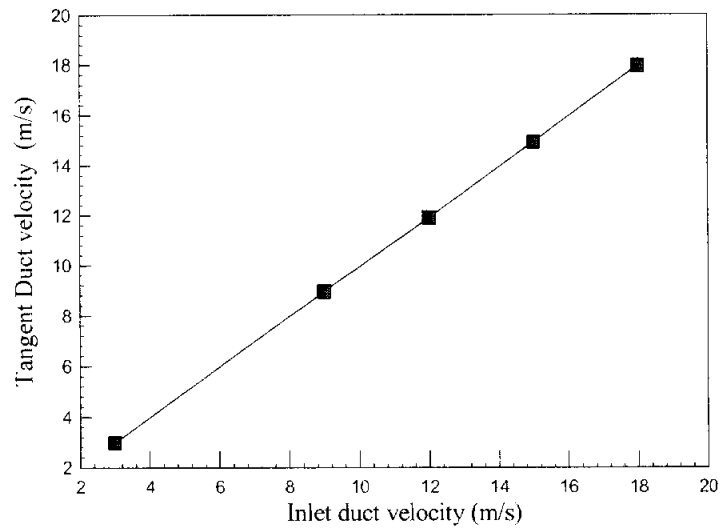


Fig. 4.12 Velocity magnitude in inlet duct & tangent duct

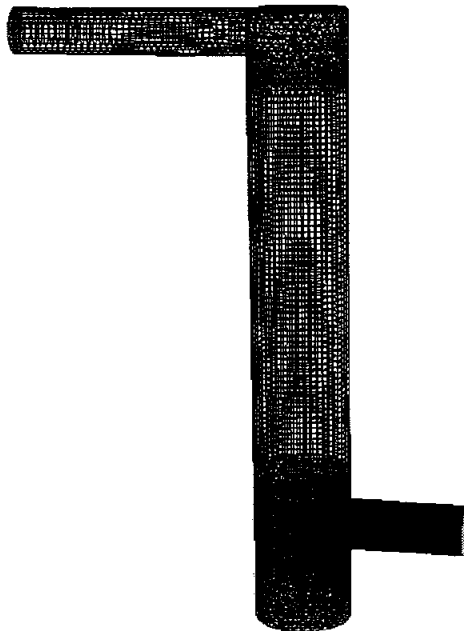


Fig. 4.13 Grid configuration for the STT

4.2.2. 해석결과 및 고찰

1) 집진 효율실험과 수치해석의 비교

Figure 4.16은 본 논문 제 3 장의 STT 집진 효율실험결과와 수치 해석 결과를 비교한 그래프이다. 실제 실험에서는 입자 크기 $0.3\ \mu\text{m}$ 에서 조금 낮은 집진 효율을 보이나 전반적으로 해석결과와 실험수치 간 5% 이내의 오차 값을 보이고 있다.

2) 전기장을 고려하지 않은 경우 STT 집진 효율 해석

Figure 4.17은 전기장을 고려하지 않은 단순 원심력만의 STT 집진 효율을 해석한 그래프이다. 전기장이 걸리지 않았을 때 입자의 포집 효율은 내부 통과속도가 증가할수록 증가한다. 이는 입자의 포집 효율이 입자가 싸이클론을 통과하는데 필요한 잔류시간(residence time)과 입자가 집진되는 벽면까지 이동하는데 필요한 횡단시간(migration time)의 비로써 결정되기 때문이다.

입자 크기별 집진 효율에서 $10\ \mu\text{m}$ 이상의 유입 입자들은 입자질량의 증가에 따른 원심력의 크기가 커져 상당한 집진이 이루어지며, $0.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 입경 입자들에 비해 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 입경 입자집진효율이 큰 이유는 가벼운 입자에 따라 집진기 원통 내부 벽면 전반에 비산에 의한 집진 증가가 사료된다.

고효율 싸이클론의 집진효율이 입경 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 입자에서 30~50%임을 감안하면,⁽¹³⁾ STT의 미소 입경 입자의 집진 효율은 상당히 크다고 하겠다.

3) 유입유속에 따른 집진효율

Figure 4.18은 전기장(85 kV)을 고려한 집진기 내부 통과속도에 따른 STT 집진 효율을 해석한 그래프이다.

전기장이 존재할 경우에는 입자의 횡단시간이 원심력 외에 전기

력의 크기에도 반비례한다. 입자에 미치는 전기력이 원심력에 비해 클 때, 횡단시간은 집진기 입구의 속도에 대해 잔류시간만 증가하므로, 이 경우 집진효율은 증가한다. 입자의 하전이 싸이클로 내에서 이루어지는 경우를 고려하더라도, 유체속도가 낮아서 잔류시간이 클수록 입자의 입자의 하전량이 증가거나 포화하전상태로 머무는 시간이 증가하므로, 이 경우에도 집진기 입구속도의 감소는 효율을 더 증가시키는 방향으로 증가한다.

Figure 4-18에서 STT의 인가전압이 85 kV일 때 전기집진기의 원래 기능인 입경 $0.1 \sim 1 \mu m$ 입자의 95% 이상의 효율이 필요함을 감안하면 집진 원통 내부 통과 속도가 2 m/s 이상에서의 집진기 운전은 효율측면에서는 무리라고 사료된다.

입자 크기별 집진 효율에서 전반적으로 전기장을 고려하지 않은 경우보다 집진효율이 향상됨을 알 수 있고, 집진 원통 내부 통과 속도가 2 m/s 이상의 경우 입경 $10 \sim 50 \mu m$ 입자의 상당한 효율상승은 전기력뿐만 아니라 원심력에 의한 영향도 크다고 하겠다.

4) 인가전압에 따른 집진효율

Figure 4.19는 집진기 설계조건(내부 통과 속도 2 m/s 이상)에 부합하게 내부 통과 속도 3 m/s 일 때, 인가전압에 따른 STT 집진효율을 해석한 그래프이다. 전반적인 집진효율은 인가전압이 클수록 입자에 작용하는 전기력이 증가되어 집진효율은 높아진다.

본 STT의 설계 집진원통 내부 통과 목표가 일반 습식 전기집진기 내부통과 속도 $1 \sim 2.5$ m/s 보다 크게 설계하여 많은 집진 풍량 처리함을 감안하면 인가전압이 130 kV인 경우 집진 원통 내부 통과 풍속이 3 m/s인 경우에도 입경 $0.3 \mu m$ 입자를 제외한 집진효율은 99%에 가까움을 알 수 있다.



Fig. 4.14 Particle ($1\ \mu\text{m}$) tracks at the STT
(Applied voltage : 0 kV)



Fig. 4.15 Particle ($1\ \mu\text{m}$) tracks at the STT
(Applied voltage : 85 kV)

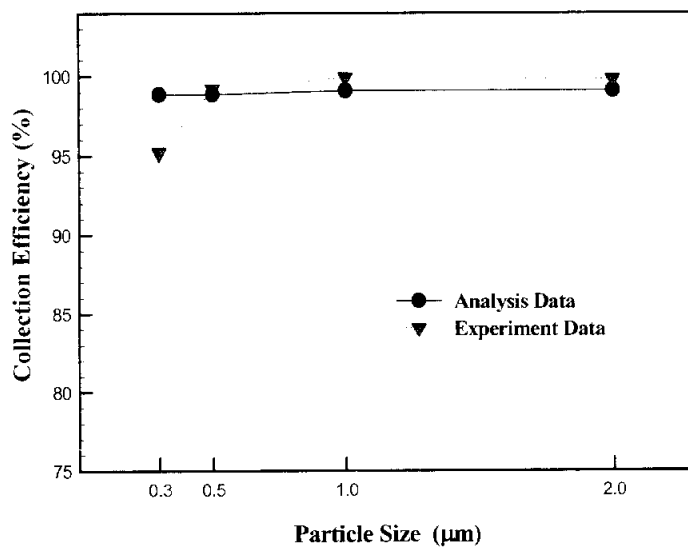


Fig. 4.16 Collection efficiency for analysis vs. experiment data (Applied voltage : 85 kV)

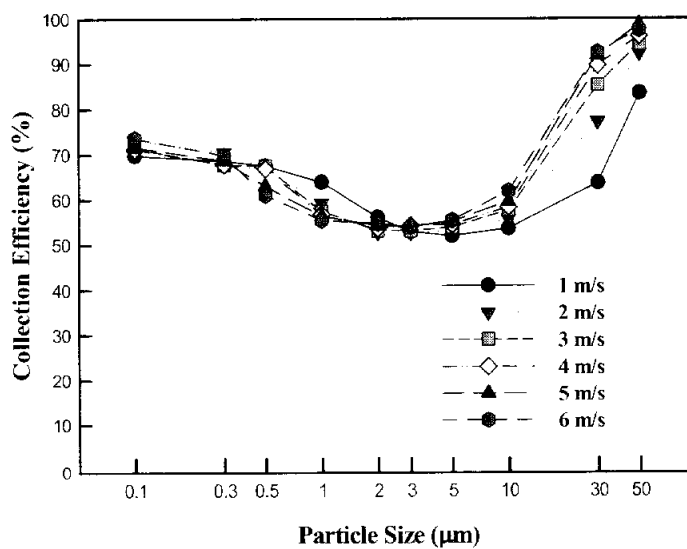


Fig. 4.17 Collection efficiency for various pass velocities (Applied voltage : 0 kV)

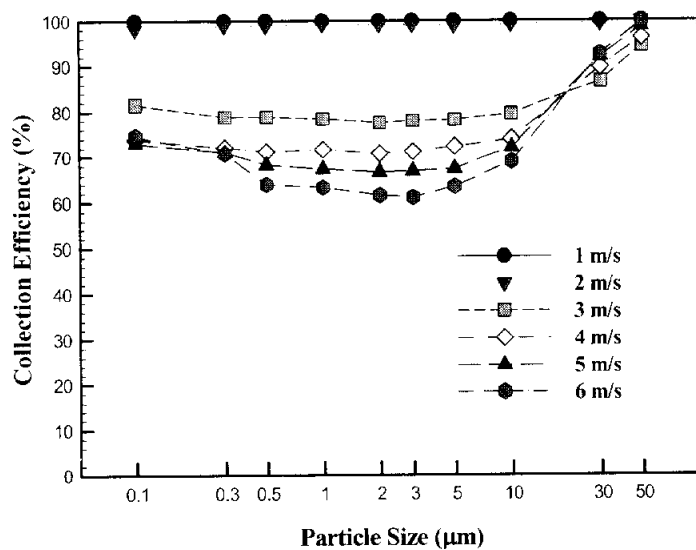


Fig. 4.18 Collection efficiency for various pass velocities
(Applied voltage : 85 kV)

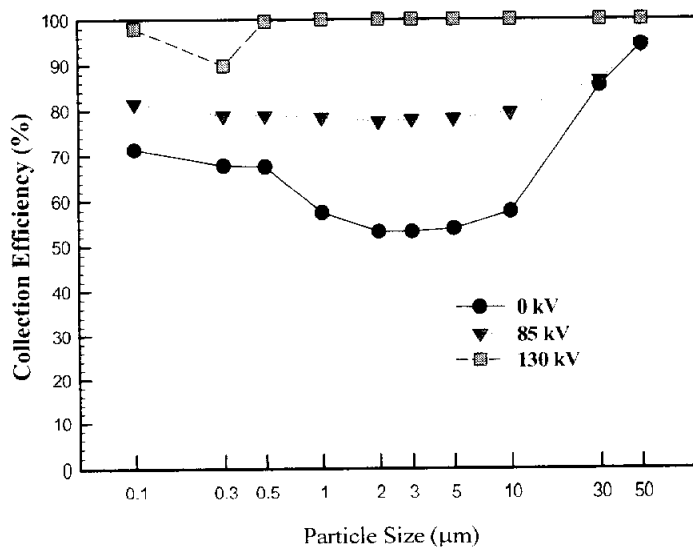


Fig. 4.19 Collection efficiency for various applied voltage
(Pass velocity : 3 m/s)

제 5 장 결론

단일 원통형 습식 전기집진기는 건식 집진기의 단점을 보완하여 단일 장치로써 상당한 집진효율과 많은 집진 부하를 담당할 수 있다. 본 연구 집진기는 시제품의 설계부터 비압축성 모델의 다양한 유동수치해석을 통하여 시제품을 제작하였고 실험측정의 기술적 제약을 극복하기 위해 집진기 집진효율에 관한 전기장해석을 수행, 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 내부 통과풍속이 2 m/s이고 인가 전압이 85 kV인 실험 측정에서 미세입자에 대하여 95% 이상의 집진효율을 보였다.
2. 단일 원통형 습식 전기집진기 전체모델 유동해석에서는 집진 원통 내부 유동형태는 상승선회형태를 이루었다. 집진기 원통 내부 집진 통과 풍속이 1~6 m/s에 이르는 inlet duct의 풍속은 3~18 m/s였다. 일반전기집기 내부통과 풍속(0.5~1 m/s)과 비교하여 같은 내부 통과 풍속일 때 많은 집진 풍량을 처리한다.
3. 전기장을 고려하지 않은 운전에서 미세입자 및 큰입자 모두 고효율 싸이클론보다 상당히 큰 원심력에 의한 집진이 이루어진다.
4. 전기장이 인가된 경우 집진 내부 통과 풍속이 작을수록, 인가 전압이 클수록 집진효율은 증가 되었다. 집진 내부 통과 풍속이 클수록 10 μm 이상의 입경 입자만이 큰 집진효율을 가지는데 이는 전기장이 인가되더라도 큰 입자에는 원심력의 효과가 크게 작용함을 알 수 있다. 또한, 단일 원통형 습식 전기집진기 설계 목적에 맞게 집진 내부 통과 풍속이 3 m/s(통과 풍속 2 m/s이상), 인가전압 130 kV일 경우 입경 0.3 μm 입자를 제외한 집진효율은 99%에 가까웠다.

참 고 문 헌

- (1) 김완수, 황태근, 1998, “전기싸이클론 집진 성능 해석”, 공기조화·냉동공학 논문집 제 10 권, 6호, pp. 702~713
- (2) 김용진, 홍원석, 2001, “광폭 전기집진기의 집진 특성에 관한 수치적 연구”, 대한설비공학회 논문집, Vol. 13, No.12, pp. 1205~1214
- (3) 송은영, 1994, “축상 유입식 싸이클론 집진기 수치해석 연구”, 한국폐기물공학회, 제 11 권, 1호, pp. 17-28
- (4) 김용진 外, 2001, “전기 집진기에서의 Submicron 입자의 집진 특성에 관한 연구- I 전기적 특성”, 대한설비공학회 논문집, Vol. 13, No. 7, pp. 572~579
- (5) 김용진 外, 2001, “전기 집진기에서의 Submicron 입자의 집진 특성에 관한 연구-II 전기적 특성”, 대한설비공학회 논문집, Vol. 13, No. 7, pp. 579~588
- (6) 김종석, 2000, 최신대기오염방지기술, 동화기술, pp. 213~240
- (7) Parker C. Reist, 1995, 에어로졸, 동화기술, pp. 235~291
- (8) Hinds, 1995, 에어로졸 공학, 신광문화사, pp. 345~375
- (9) 장혁상, 1999, 환경에어로졸공학, 영남대학교, pp. 301~324
- (10) 남원형, 2000, 전기응용, 광명사, pp. 113~120
- (11) 정우형, 2000, 환경공학, 동화기술사, pp. 286~304
- (12) 신항식 外, 1996, 최신 환경공학, 자유아카데미, pp. 670~693
- (13) 김신도, 1992, 대기오염과 제어, 동화기술, pp. 220~232
- (14) J. Plucinski, L. Gradon and J. Nowicki, 1989, "Collection of aerosol particles in a cyclone with an external electric field", Journal of aerosol science, Vol. 20, No. 6, pp. 695~700
- (15) Jack R. Mcdonald, Wallace B. Smith, and Herbert W.

- Spencer III and Leslie E. Sparks, 1977, "A mathematical model for calculating electrical condition in wire-duct electrostatic precipitaion devises", Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 6, pp. 2231 ~ 2243
- (16) Alaa A. Elmourisi and Peter Castle, 1986, "The Analysis of Corona Quenching in Cylindrical Precipitators Using Charge Simulation", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-22, No. 1, pp. 80 ~ 85
- (17) Saverio Cristina , "Numerical Computation of Corona Space Charge and V-I Charaterisic dc Electrostatic Precipitaors". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 1, pp. 147 ~ 153
- (18) Kazimierz Adamiak, 1994, "Simulation of Corona in Wire Duct Eletrostatic Precipitator by Means of the Boundary Element Method", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 30, No. 2, pp. 381 ~ 385
- (19) John R. Brauer, Haig Kalfaian and Harold Moreines, "Dynamic Electric Fields Computed by Finite Elements". IEEE Transations on Industry Application, Vol. 25, No. 6, pp. 1088 ~ 1092
- (20) 조용수, 1996, "Numerical Study on Collection Efficiency Characteristics for a Cylindrical ESP", 부경대 석사학위 논문
- (21) 이준, 2001, "Characteristics of Cylindrical Electrostatic Precipitator with Centrifugal Effect". 부경대 석사학위 논문
- (22) 황태권, 1999, "Collection Characteristics of Submicron Particles of in Cylindrical Electrostatic", 부경대 석사학위 논문
- (23) 정종환, 김영수 外, 2003. Single Tubular Type Condensing 습식

전기집진기 유동설계에 관한 수치적 연구, 대한기계학회부산지부 춘계학술대회논문집, pp. 222~227

- (24) 정종환, 김영수 外, 2003. Single Tubular Type Condensing 습식 전기집진기 개발, 산업자원부 기술기반산업 최종보고서

감사의 글

다시 되돌릴 수 없는 시간이기에 아쉬움도 많고 부족한 점도 많았지만, 주위의 많은 분들이 관심을 가져주시고 힘이 되어 주셨기 때문에 더 성숙한 사회인이 된 것 같습니다. 이에 주위 사람의 기대에 어긋남이 없는 모습으로 열심히 살겠습니다.

본 논문이 완성되기까지 헌신적으로 도와주신 김영수 지도 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 본 논문을 지도해 주시고 충고를 아끼지 않으셨던 오후규 교수님, 김종수 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

특히 저의 오랜 선배인 재홍이형, 사출 실험실의 대선배 인관이형, 친근한 태호형, 동기이자 박사과정의 용하, 같은 석사과정의 정원, 정용, 광수, 실험실 후배인 지환, 종보에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 공기조화실험실의 수정이 누나, 용빈이형, 동기인 내수, 태훈, 기택, 지금은 취업한 건축환경실험실의 좌진형 모두 고맙습니다.

또한 논문 이 완성되기까지 많은 도움을 주신 (주)한독엔지니어링의 이돈길 실장님, 대기과 조용수 박사님께 감사드립니다.

마지막으로 나를 늘 한결같이 믿어주시고 격려를 해주신 부모님, 믿음직스러운 동생 종훈에게 이 결실을 바칩니다.