



工學碩士 學位論文

임팩션 효과에 편극전하 방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진특성



環境工學科

김 보 배

工學碩士 學位論文

임팩션 효과에 편극전하 방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진특성

指導教授 呂 碩 埈



環境工學科

김 보 배

김보배의 공학석사 학위논문을 인준함.

2011年 2月



목	차
---	---

목 차	I
그림차례	
표 목차	V
Abstract	VI
I.서론	1
Ⅱ. 이론적 배경	5
1. 원 리	
1.1. 유전체 이론	5
1.2. 정전기	7
1.2.1. 정전현상	7
1.2.2. 쿨롱의 법칙	7
1.2.3. 정전 포집 메카니즘	
2. 입자의 충돌	
3. Stokes Number	
Ⅲ. 실험장치 및 방법	
1. 실험장치	
11 T · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	10
1.1. Impaction 요과에 편극전하 방식을 부과한 나중 나단 나공성 플레이트…	16
1.1. Impaction 효과에 펀국선하 방식을 부과한 나중 나단 나공성 플레이트… 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도	······ 16
1.1. Impaction 효과에 편국선하 방식을 부과한 나중 나단 나공성 플레이트… 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도	
 1.1. Impaction 효과에 펀득선하 방식을 부과한 나중 나단 나공성 플레이트 ·· 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도 ······ 1.3. 분진 공급장치 ····· 1.4. 흡입 송풍기 ····· 	
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 무과한 나중 나단 나공성 플레이트 ·· 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도 ······ 1.3. 분진 공급장치 ······ 1.4. 흡입 송풍기 ····· 1.5. 전압 공급장치 ····· 	
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 무과한 다중 다단 다중성 플레이트 ·· 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도 ······ 1.3. 분진 공급장치 ······ 1.4. 흡입 송풍기 ······ 1.5. 전압 공급장치 ····· 2. 실험용 분진 ····· 	
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 부과한 다중 다단 다중성 플레이트 ·· 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도 ······ 1.3. 분진 공급장치 ····· 1.4. 흡입 송풍기 ····· 1.5. 전압 공급장치 ····· 2. 실험용 분진 ····· 3. 실험방법 ····· 	16 19 20 20 20 20 20 21
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 무과한 나중 나단 나중성 플레이트 ·· 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도 ······ 1.3. 분진 공급장치 ····· 1.4. 흡입 송풍기 ····· 1.5. 전압 공급장치 ····· 2. 실험용 분진 ····· 3. 실험방법 ····· 3.1. 압력손실 특성 ····· 	16 19 20 20 20 20 20 21 22 22 22
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 무과한 다중 다단 다중성 플레이트 ·· 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도 ······ 1.3. 분진 공급장치 ····· 1.4. 흡입 송풍기 ····· 1.5. 전압 공급장치 ····· 2. 실험용 분진 ···· 3. 실험방법 ····· 3.1. 압력손실 특성 ····· 3.2. 집진효율 특성 ····· 	16 19 20 20 20 20 20 20 20 20 21 22 22 22 22 22 22 22 22
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 무과한 다중 다단 다중성 플레이트… 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도	16 19 20 20 20 20 20 20 20 20 20 21 22 23 24 24
 1.1. Impaction 효과에 편국전하 방식을 무과한 다중 다단 다중성 플레이트… 1.2. 기류유입 방식을 적용한 stage의 단면도	16 19 20 20 20 20 20 20 20 20 21 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 24

4.1.1. 유동장 지배 방정식
4.1.2. 입자 운동 지배방정식26
5. 수치 시뮬레이션 결과
Ⅳ. 실험결과 및 고찰
1. 압력손실 특성
1.1. Stage 수의 증가에 따른 압력손실 특성
1.2. 기류유입을 유도했을 때 stage 수의 증가에 따른 압력손실 특성
2. 집진효율 특성
2.1. 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율 특성
2.1.1. Stage 수 증가에 따른 집진효율 특성
2.2. Impaction 효과에 편극전하 및 기류유입방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트
시스템의 집진효율 특성
2.2.1. 편극전하를 부과했을 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성
2.2.2. 편극전하 유무에 따른 stage 수별 집진효율 특성
2.2.3. 편극전하 유무에 따른 유입유속별 접진효율 특성
2.2.4. 기류유입을 유도했을 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성
2.2.5. 기류유입 유무에 따른 stage 수별 집진효율 특성
2.2.6. 기류유입 유무에 따른 유입유속별 집진효율 특성41
2.2.7. 편극전하 및 기류유입방식을 부과했을 때 stage 수 증가에 따른
집진효율 특성
2.2.8. 기류유입을 유도했을 때 편극전하 유무에 따른 집진효율 특성43
2.2.9. 편극전하 및 기류유입방식 유무에 따른 집진효율 특성 44
2.2.10. Plate별 편극전하 부과 시 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성46
2.2.11. Plate 전극 배열에 따른 집진효율 특성
V. 결 론 ··································
참 고 문 헌

그 림 차 례

Fig. 1. Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate system with
polarization charge to impaction effect4
Fig. 2. Schematic diagram of electrostatic capacity mechanism6
Fig. 3. Schematic diagram of Coulomb's force7
Fig. 4. Schematic diagram of collision theory10
Fig. 5. Diagram of velocities at point B11
Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus15
Fig. 7. Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate with polarization
charge to impaction effect
Fig. 8. Schematic of multi-layer multi-stage porous plate with alternating polarization
charge to impaction effect17
Fig. 9. Schematic diagram of stage using current inflow method
Fig. 10. Size distribution of test dust. 21
Fig. 11. Velocity vector plot of multi-layer multi-stage porous plate
Fig. 12. Particle trajectory of multi-layer multi-stage porous plate($d_p = 0.1 \ \mu$ m)
Fig. 13. Particle trajectory of multi-layer multi-stage porous plate($d_p = 10 \mu$ m)
Fig. 14. Pressure drop with increasing stage number and inlet velocity29
Fig. 15. Pressure drop with increasing stage number, inlet velocity and inflow
current
Fig. 16. Collection efficiency with increasing stage number and inlet velocity
(fly ash, inlet concentration 3g/m ³ , 0 kV, non-inflow current)
Fig. 17. Collection efficiency with increasing stage number, applied voltage and inlet
velocity (fly ash, inlet concentration 3g/m ³ , non-inflow current)32
Fig. 18. Collection efficiency with increasing stage number and various applied voltage
(fly ash, inlet concentration 3g/m ³ , non-inflow current)35
Fig. 19. Collection efficiency with increasing inlet velocity and various applied voltage
(fly ash, inlet concentration 3g/m ³ , non-inflow current, 5 stage)36
Fig. 20. Collection efficiency with increasing stage, inlet velocity and inflow current
(fly ash, inlet concentration $3g/m^3$, 0 kV)

Fig.	21.	Collection efficiency with increasing stage number and inflow current
		(fly ash, inlet concentration $3g/m^3$, 0 kV)40
Fig.	22.	Collection efficiency with increasing inlet velocity and inflow current
		(fly ash, inlet concentration $3g/m^3$, 0 kV, 5 stage)41
Fig.	23.	Collection efficiency with increasing stage and inlet velocity and inflow current
		(fly ash, inlet concentration $3g/m^3$, applied voltage 2.5 kV)
Fig.	24.	Collection efficiency with increasing inlet velocity, various applied and inflow
		current (fly ash, inlet concentration 3g/m³, 5 stage)43



표 목 차

Table. 1.	Summary for particulate matter emission control techniques.	3
Table. 2.	Inlet velocity and tube velocity with tube diameter	8
Table. 3.	Experimental relational conditions with electrode array of multi-layer	
	multi-stage porous plate	8
Table. 4.	Chemical composition of test fly ash2	21
Table. 5.	Experimental conditions of Electrostatic Multi-layer Multi-stage Poros Plate	
	system2	23
Table. 6.	Values of turbulent coefficients.	25



Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System with Polarization Charge to Impaction Effect

Bo-Bae Kim

Department of Environmental Engineering Graduate School, Pukyoug National University

Abstract

Recently fabric bag filter and electrostatic precipitator (ESP) are frequently used in as main collection equipment. Especially, fabric bag filter is the most widely used in existing industry low filtration velocity makes large scale equipment, filter clogging makes excessive pressure drop those kinds of disadvantages make cost higher than other devices because of periodic filter replacement. To improve this fabric bag filter, we need to study more.

In this study, by introducing impaction and polarization charge we can make an experimental analysis of the particle collection characteristics of multi-layer multi-stage porous plate system which can miniaturization equipment scale.

multi-layer multi-stage porous plate system with polarization charge to impaction effect keeps porous plates multi-layed and multi-staged. It makes particles get through tubes of plates and formed fast jet velocity. It is the system that applied to the way of being collected at internal black boxes through following layered black hole. Negative electrode and positive electrode have to be confronted each on the top and bottom of neighboring plates and approved of D.C. voltage. When increasing the number of stages, insulators can be installed in zigzag and collect fine particles by electrostatic force attributed to polarization phenomenon between plates. Re-entrainment can be prevented by maximizing electrostatic force effects inducing air current inflow.

Thus, the main purpose of this study is to investigate the collection characteristics of multi-layer multi-stage porous plate system with polarization charge to impaction effect, experimentally. The experiment is carried out to analyze

– VI –

the characteristics of pressure drop and collection efficiency for the present system with the experimental parameters such as inlet velocity, stage number, and applied voltage, etc. In results, the collection efficiency becomes higher 92 to 98 % with increment of stage number of multi-layer porous plate system with polarization charge to impaction effect (1 to 5 stages, applied voltage 2.5 kV), while the gradient of increment of collection efficiency is to be lower.

Additionally, it is estimated that with increment of stage number(1 to 5 stage) at tube diameter 12 mm, inlet velocity $v_{s,in} = 3.11$ m/s, the pressure drop becomes much higher as 18, 62, 73, 101 and 134 mmH₂O, respectively.

This system might have an effort to maximize particle collection effect by using impaction of particle and electrostatic force of polarization charge also it might be more possible to miniaaterize the device and manage large flow and it might have an advantage that can reduce maintenance cost because of it does not need to use the filter.



I. 서 론

급속한 산업발전과 더불어 산업 전반에 걸쳐 대기오염의 심각성으로 인해 대기오염물질 배출규제가 강화되어짐에 따라 각 산업체에 설치되어 있는 대기오염의 방지시설의 교체 및 보완을 위한 저비용·고효율 집진장치의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 이에 따른 연구개발이 날로 활발해지고 있다.

현재 많이 사용되고 있는 주요한 집진장치로는 여과 집진장치와 전기집진장치 등이 있으나 각각의 집진장치가 가지고 있는 장·단점을 개선하기 위해 연구·개발이 필요한 실정이다. 기존 산업체에서 가장 널리 사용되고 있는 여과 집진장치는 각종 입자상 물질이나 공장 등의 배출 가스에 포함된 유해 입자를 걸러 내거나 여러 가지 형태의 분진을 포집할 수 있으며, 미세입자에 대한 집진효율이 높은 반면, 낮은 여과속도에 의해 장치의 소요면적이 많이 들고, 가스의 온도에 대한 여재의 선택에 제한을 받으며 결로현상 등에 의해 발생되는 filter의 눈막힘 현상에 의한 과도한 압력손실 및 이에 따른 주기적인 filter 교체와 탈진에 드는 동력비용이 타 장치에 비해 높다는 단점을 가지고 있다. 전기 집진장치는 낮은 압력손실로 대유량의 배기를 처리할 수 있고 구조적으로 매우 단순하여 유지 및 보수가 용이한 장점이 있으나 고효율을 유지하기 위해 집진면적을 확보하기 위한 장치의 대형화가 요구되는 단점을 가지고 있다(Table 1. 주요 집진장치들의 특성 및 장·단점).

이 중 여과 집진장치의 filter사용에 따른 문제점을 보완하기 위한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템이 연구되었다. 다층 다단 다공성 플레이트 시스템은 여과 집진장치의 높은 압력손실 및 결로 현상 등에 의한 filter 막힘의 문제점을 극복하기 위해 연구 개발된 장치로서, 분진을 포함한 가스가 플레이트의 tube를 통과하면서 빠른 속도의 분사류를 형성하여 다음 단의 black hole을 향하게 되며, 이 때 일정한 관성력 이상의 입자는 black hole에 포집되어 퇴적되고 포집되지 않은 입자는 유선을 따라 tube를 통과하여 다음 단으로 움직이게 되며, 일부 미세 입자는 플레이트 사이에 형성된 재순환 유동에 의한 난류 확산에 의해 플레이트 후면에 부착·집진된다. 이러한 다층 다공성 플레이트를 다단(2단 이상)으로 배열하여, 반복되는 관성 및 난류 확산 효과의 결합을 이용하여 집진 효율을 높일 수 있으나 주 메카니즘인 기류의 관성력을 이용하여 분진을 포집하기 때문에 미세입자에 대한 집진효율이 낮고, 미세입자에 대한 집진효율을 높이기 위해서 시스템의 조건을 변화시킬 경우 압력손실의 증가와 제작비가 증가하는 문제를 가지게 되어 이를 보완하기 위해 압력손실은 줄이고 대유량 처리가 가능하면서 집진효율을 높일 수 있는 전기 다층 다단 다공성 플레이트가 연구 되었다.

전기 다층 다단 다공성 플레이트 시스템은 다양한 형태의 집진 메커니즘(전기력, 관성력, 난류확산)을 한 시스템으로 단일화하여 결합한 hybrid 시스템으로서 예비하전부와 주

- 1 -

집진부인 다층 다단 다공성 플레이트로 구성된다. 유입된 기류 속의 분진 입자를 예비하전부를 통해 하전시키고 하전된 입자는 주 집진부인 다층 다단 다공성 플레이트에 유입되게 함으로서, 미세입자에 대한 집진효율을 높이고자 하였지만, 예비하전부와 집진부가 차지하는 설치면적이 넓고 집진효율을 높이기 위해 고전압을 사용하였을 경우 장치 유지 관리 비용이 증가되는 문제점을 보완하기 위해 impaction 및 편극 전하 방식을 도입하여 적정한 압력손실에 고효율을 유지하면서 장치규모를 소형화 할 수 있는 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 입자 포집 특성에 대하여 연구를 수행하였다.

임팩션 효과에 편극전하 방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템(Fig. 1.)은 다공성 플레이트를 다층 다단으로 구성하여 입자가 플레이트의 tube를 통과하면서 빠른 속도의 분사류를 형성하여 다음단의 블랙홀을 통해 블랙박스내의 벽면에 포집되게 하는 방식을 적용한 시스템으로, 이웃하는 플레이트 상하에 각각 양극과 음극이 대치되도록 직류 전압을 인가하여 플레이트 사이에 양극 및 음극의 상호 다른 전극이 인가되도록 하고, stage 수를 증가 시킬 때마다 지그재그상의 절연체를 설치하여 플레이트 사이에 편극 현상으로 인한 정전기력에 의해 미세 입자를 포집하고, 기류유입을 유도하여 정전기력의 효과를 극대화시켜 재비산을 방지한다.

본 시스템은 입자의 관성력과 편극 전하의 정전기력을 이용하여 분진 포집 효과를 증가시킬 수 있으며 기존의 집진장치에 비해 장치 소형화와 높은 처리 유속에 의한 대유량 처리가 가능하고, filter를 사용하지 않아 유지관리 비용을 경감할 수 있는 장점을 가질 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 impaction 효과에 편극전하 및 기류유입방식을 부과한 다층 다단 다공성플레이트 시스템의 특성 분석을 위해 stage 수, 유입유속(튜브 통과유속), 인가전압의 실험 변수에 따라 본 시스템의 압력손실 및 집진효율의 특성에 대한 실험적 해석을 수행하였다.

Wall of W

집진 장치	형식	압력손실 (mmH₂O)	효율 (%)	장 점	단점
원심	접선 유입식	- 100~125	50정도	•구조가 간단 •고온가스 처리가능 •사용범위 광범위 •설계 및 보수용이	 분리한계입경 큼 미세입자에 대한 집진효율 낮음 먼지부하 유량변동에
	축류식 반전형				민감 • 점착성, 마모성 가스에 부적합
	벤투리 스크러버	300~800		• 가연성, 폭발성 먼지	•압력손실 크며, 동력소비량 큼 •운전비 많이듬
세정	사이클론 스크러버	처리가등 100~150 85~95 ·가스 및 분진 동 제거 가능	·가스 및 분진 동시 제거 가능	•부식 잠재성 큼 •백연 발생 가능성 •소수성 입자의	
	충전탑	100~250	GI	• 설치비용 저렴	처리효율 낮음 • 한랭기간 동결방지 필요
여과	백 필터	100~200	>99	•미세입자 집진효율 높음 •여러가지 형태의	• 소요면적 많이 듬 • 폭발성, 점착성 분진 제거 곤란 • 가스 온도에 제한을
	에어 클리너			분진 포집 가능 •다양한 용량의 가스 처리 가능	받음 •수분, 여과속도에 적응성이 낮음 •높은 유지비용
전기	건식	10~20	95~99	•미세입자 제거 및 집진효율 높음 •낮은 압력손실로	•설치비용 많이 듬 •운전 조건 변화의 유동성이 적음 •넓은 석치 며적이
	습식			대량가스 처리가능 •광범위한 온도 범위에서 설계가능	요구됨 •비저항이 큰 분진 제거에 어려움

Table 1. Summary for particulate matter emission control techniques.

- 3 -



(b) Alternating polarization charge

Fig. 1. Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate system with polarization charge to impaction effect.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 원리

1.1. 유전체 이론

유전체는 절연체의 범주에 속하는 물질로 도체와는 달리 물질 내에 이동할 수 있는 자유전자가 없기 때문에 전류가 거의 흐르지 않는다. 하지만 전기장이 걸리면 유전체 내의 양전하는 전기장의 방향으로 미세한 양만큼 이동하고 음전하는 전기장과 반대방향으로 이동하는 전기 분극 현상이 발생하며 전하가 미세하게 분리됨(분극)으로써 유전체 내에서 전기장의 세기를 감소시킨다. 유전체는 이러한 분극(편극, polarization)현상으로 인하여 표면에 전하가 유도되는 물질을 말한다.

편극현상은 전류를 흘렸을 경우 각각의 극으로 전하가 몰리는 현상으로 전기장을 가했을 때 전기적으로 극성을 띤 분자들이 전체적으로 정렬하여 물체가 전기를 띠는 현상을 유전분극이라 한다. 전기장 내에 물체를 놓으면 도체인 경우는 자유전자들이 물체 내에서 움직여 정전기 유도현상이 나타난다. 하지만 전기적으로 극성을 띠는 분자로 이루어진 유전체는 전기장을 가하면 극성분자들이 전기장과 반대방향으로 정렬하여 표면에 전기를 띠게 된다. 물질마다 분극 되는 정도는 가해진 전기장의 세기 돈에 비례하며, 그 비례상수를 전기감수율(electric susceptibility) χ_e라 한다. 단위면적당 편극 P는 다음과 같이 나타난다.



여기서 ε_0 는 진공에서의 유전율이다. 즉, 편극 P는 전기장의 세기 E ,전기감수율 χ_e , 유전율 ε_0 에 비례함을 알 수 있다. 집진판간 물질 안의 양과 음의 전하가 평형상태 위치에 관해 변위되어 있는 물질의 편극 때문에 정전용량이 증가하게 된다.

유전체의 편극 현상은 정전용량의 전하 저장 능력을 높이는데, **정전용량(electrostatic** capacity)이란 전하를 저장할 수 있는 공간의 크기로서 평판 사이가 자유 공간일때의 정전용량 *C*_o는 다음과 같이 정의한다.

$$C_o = \frac{Q_o}{V} = \varepsilon \frac{S}{d} \tag{2}$$

(1)

- 5 -

정전용량 C_o 는 보통 물체의 총 전하량 Q_o 를 물체의 전압 V로 나눈 값으로 정의하는데 식 (2)에서 ϵ 은 **유전율(permittivity)**이며 S는 극판의 면적, d는 극판사이의 간격이다.

이 수식에 따르면 정전용량을 결정하는 세 가지는 극판의 면적, 극판 간의 간격과 유전율체로 사용된 재료임을 알 수 있다. 집진판 사이에 절연체를 넣을 때 전기용량이 증가하는 이유는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 집진판 사이에 절연체를 넣으면 (+)극판과 (-)극판만 있을 때 보다 (+)와 (-)전하간의 간격이 가까워지는 효과가 된다. 따라서 (+)와 (-)전하간 서로 끌어 당기는 힘이 세어져 더 많은 전하를 극판에 넣어도 전기적 반발력이 극판만 있을 때 보다 작아지므로 축전기의 전기용량이 커진다. 그러므로 정전용량을 크게 하여 집진효율을 높일 수 있는 방법은 집진판 면적을 넓게하거나, 집진판 사이의 간격을 좁게 하거나, 집진판 사이에 넣는 절연물을 비유전율이 큰 것으로 사용하는 방법 등이 있다.



Fig. 2. Schematic diagram of electrostatic capacity mechanism.

1.2. 정전기

1.2.1. 정전현상

두 종류의 물체를 마찰하면 물체 상호간 또는 주위의 가벼운 물체를 끄는 힘이 작용함을 알 수 있다. 이러한 현상을 나타내는 것은 마찰에 의하여 전기가 발생한 결과이다. 이렇게 하여 생긴 전기는 그 물체 위에 정지하고 있는 상태에 있으므로 정전기라 한다. 예컨대, 유리봉을 비단으로 마찰하고 그 유리봉 근처에 가벼운 종이 조각을 가져가면 흡인한다. 이것은 유리봉이 전하를 가졌기 때문이다. 이와 같이 어떤 물체가 전하를 띤 것을 **대전(electrification)**이라 하며, 대전한 전기의 양을 **전하(electric charge)**라 한다.

일반적으로 종류가 다른 두 물체를 마찰하면 한쪽은 (+), 다른 쪽은 (-)로 대전하며 두 물체에 대전하는 전기량은 같다. 자기와 마찬가지로 같은 종류의 전하끼리는 반발하고, 다른 종류의 전하끼리는 흡인하여 접촉하였을 때 양이 같다면 중화해서 소멸한다.

도체에 다른 대전체를 가까이 가져가면 도체의 대전체에 가까운 쪽은 다른 종류의 전기가, 먼 쪽은 같은 종류의 전기가 나타나는 현상을 **정전유도(electrostatic induction)**라 한다.



Fig. 3. Schematic diagram of Coulomb's force.

대전된 두 물체를 가까이 가져가면 양 대전체간에 힘이 작용하고 서로 흡인력 또는 반발력이 작용한다. 이 힘의 크기는 양 전하의 양과 거리에 관계된 것으로 프랑스 (France)의 과학자 쿨롱(Coulomb)은 이의 관계에 대해서 실험에 의해 확인하고 다음과 같은 법칙을 세웠다.

"두 개의 대전체 간에 작용한 힘은 양 전하를 이은 직선상의 방향으로 작용하고 그 크기는 양 전하량의 곱에 비례하고 거리의 2승에 반비례한다."

- 7 -

이것을 **쿨롱의 법칙(Coulomb's law)**이라하고 이 힘을 쿨롱의 힘(Coulomb's force)이라 한다. Fig. 3과 같이 전하량을 각각 Q_1 , Q_2 거리를 r라 하면 쿨롱의 힘 F는

$$F \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \tag{3}$$

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \quad [N] \tag{4}$$

[N]

(5)

이 된다.

전하가 절연물 안에 있을 때의 정전력은 절연물의 영향을 받아서, 진공 중에 있는 경우보다는 약해진다.

이 때 , 절연물을 특히 유전체라 한다. 즉, 유전체 중의 정전력은 진공의 정전력의 $\frac{1}{\epsilon_s}$ 배가 되고, 다음 식과 같이 된다.

여기서, ε_s 를 비유전율(specific dielectric constant)이라 하면,

 $4\pi\varepsilon$

 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_s$

의 관계가 있다. 공기 중에서는 $\varepsilon_s ≒ 1$ 이며, 진공 중의 힘과 마찬가지로 계산해도 실용상 지장이 없다.

1.2.3. 정전 포집 메카니즘

일반적으로 분진입자에 정전기력을 발생시키는 방법으로써는 분진입자의 전기적 대전, 집진면의 전기적 대전, 그리고 집진부에 외부전장을 작용시키는 경우 등이 있으며, 이와 같은 방법에 의하면 입자에는 다음과 같은 여러 가지의 정전기력(Electrostatic Force)이 발생된다.

- 8 -

① 집진부면의 전하에 의한 쿨롱힘(Coulombic Force)

이것은 전하량 q로 대전된 분지입자가 전하량 Q로 대전된 실린더형 반경 a인 섬유와의 사이에서 거리 R만큼 떨어져 있을 때 R>>a인 조건에서 자유공간의 유전율을 ε_0 라 하면 입자에 형성되는 전기력이며 다음과 같이 표현된다.

$$F_c = -\frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \tag{6}$$

② 전기영상력(Image Force)

이것은 반경 r_p 이고 전하량 q로 대전된 입자가 집진면에서 거리 r만큼 떨어진 곳에 존재할 때 만일 집진면이 전기적으로 중성이라면 전기적 영상(Image)원리에 의해 입자와 집진면 사이에 작용하는 정전기력이며 다음과 같이 표시된다.

$$F_M = -\frac{(\varepsilon_c - 1)}{(\varepsilon_c + 2)} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q^2 \frac{e_p^3}{r^3} \frac{2r^2 - r_p^2}{(r^2 - r_p^2)^2}$$
(7)

③ 외부 전기장에 의한 쿨롱힘

이것은 입자와 집진면 사이에 외부 전기포텐셜 *ф*가 작용하여 전기장이 형성될 때 입자에 작용하는 힘이며 입자의 전하량을 *q*라 하면 이때 입자에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F_E = q \nabla \Phi$$

④ 유전분극력(Dielectrophoretic force)

이것은 입자의 반경 r_p 이고 입자와 집진면 사이의 전기장 E가 부동질(inhomogenious)인 경우 전기장의 구배에 의해 입자에 작용하는 힘이며 다음과 같이 표현된다. 여기서 ε_p 는 입자의 상대유전율이다.

$$F_g = \frac{\pi \varepsilon_0 \gamma_p^3}{32} \left(\frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}\right) \nabla |E|^2 \tag{9}$$

(8)

- 9 -

입자를 운반하는 공기의 방향이 갑자기 변할 때, 입자는 관성 때문에 진행하던 방향을 따라 계속 움직이려는 경향이 있으며 기류 중에 위치한 장애물 때문에 공기의 방향이 변화한다면, 충분한 관성을 가진 입자들은 물체에 부딪히게 된다. 이러한 현상을 충돌이라고 하며 충돌은 대기 중에서 대부분의 큰 입자들이 제거되는 메커니즘이고, 에어로졸의 포집뿐만 아니라 공기 정화에 있어서도 적용된다. 만일 속도장을 적절하게 결정한다면 충돌의 과정은 입자의 운동방정식을 이용하여 설명할 수 있다.



(b) inflow current

Fig. 4. Schematic diagram of collision theory.

- 10 -

Fig. 4 (a)와 같은 충돌의 간단한 모형을 고려하여 보자. 공기가 폭 W의 긴 hole을 통하여 속도 u로 이동하고, 거리 S만큼 떨어진 위치에 방출 기류에 수직한 판이 위치한다. 이런 형태에서 슬롯을 떠난 공기는 그 곳을 벗어나기 전에 방향이 90°꺾이게 되며, 기류의 흐름과 함께 방향을 바꾸지 못한 입자는 표면에 충돌하게 되고, 충돌한 입자는 판의 표면에 붙어버리는 것으로 간주한다. Hole로부터 방출되어 나오는 공기의 유선은 중심이 C인 1/4 원 형태(Fig. 5)이며, S와 W/2와 같다고 가정하였다. 점 B에서 입자는 접선 속도 $v_{\omega} = u$ 이며, 식 (10)과 같은 각속도를 갖게 된다.

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{v_{\omega_r}^2}{r} \tau \tag{10}$$

이 때, dt 시간 동안 입자가 충돌판의 표면을 향해 이동한 거리는 식 (11)과 같다.



Fig. 5. Diagram of velocities at point B.

기류는 hole로부터 표면에 평행하게 변하므로 φ는 0°에서 90°로 변하며, 각의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 11 -

$$d\Phi = \frac{v_{\omega}}{r} dt \tag{12}$$

방향이 90°변하게 되면 입자는 거리 δ만큼 이동하여 위치하게 된다.

$$\delta = \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} v_{\omega} \tau \sin \Phi d\Phi = v_{\omega} \omega = u \tau$$
(13)

Hole로부터 평행한 본래의 속도를 잃어버리는 동안 입자는 그 유선으로부터 정지 거리 만큼 움직일 것이다. Hole의 중심선으로부터 거리 δ내에 위치하는 모든 입자들은 표면에 부딪혀 제거되기 때문에 총 제거 효율 ε은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{W/2} = \frac{2u\tau}{W} \tag{14}$$

물론, 실제 기류는 그 형태가 매우 복잡하고, hole의 Re수에 따라 변하기 때문에 이러한 방법은 효율을 계산하는 매우 개략적인 접근법이며, 일반적으로 S≠W/2 이다. 이와 같은 방법은 특정한 형태의 효율을 추정하는데 이용되며, ε≥1일 때는 잘 맞지만, ε이 0.7 이하인 경우 정확도가 급격히 떨어진다.

Fig. 4 (a)의 충돌 메커니즘에서 재비산의 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4 (b)와 같이 black box와 inflow hole을 설계하였다.

입자를 포함한 기류가 유입될 때 충분한 관성을 가진 입자는 black hole을 통과하여 black box 벽면에 충돌하여 포집되고, 미세입자는 기류를 따라 움직이려는 경향이 있어 다음 stage로 이동하려는 미세입자의 일부를 강제적으로 black hole 내로 유입되게 함으로써 black box 내에 포집되는 원리이다. 이러한 black box를 구성하는 플레이트 벽면에 상호 다른 전극을 인가하여 벽면에 충돌되어 포집된 입자의 재비산을 방지할 수 있다.

3. Stokes number

다공성 plate의 특징을 나타내는 것으로서 Stokes number라는 무차원 매개변수를 사용한다. 이것은 입자의 정지거리와 충돌판 까지의 거리에 대한 비율로 나타내는 무차원 매개변수로써 다음 식과 같다.

$$Stokes \ number = \frac{V_0 \tau}{S} \tag{15}$$

여기서 τ : relaxation time

 V_0 : initial velocity (cm/sec)

그러므로 Stokes number는 다음과 같이 표현할 수 있다.



Stokes number가 0인 경우에 입자는 완전히 유선을 따라서 이동하지만, 증가할수록 입자는 기류의 유선을 따라 그 운동 방향을 변화시키기 어렵다. Stoke number로부터 절단 입경(cutoff diameter)은 쉽게 구할 수 있으며, 절단 입경은 √*Stk* 에 직접 비례하므로 √*Stk* 가 클수록 절단 입경은 커지고, 작을수록 절단 입경은 작아진다.

- 13 -

효율 곡선을 이론적으로 결정하는데는 컴퓨터 모델이 사용되며 먼저 각 유선의 유동장(flow field)을 Navier-Stokes식을 이용하여 풀고, 특정 입경의 입자에 대한 유선에 대해서는 hole를 통과하는 각각의 유선마다 입자의 궤적을 구한다. 이 입경의 입자에 대한 효율은 hole을 가로지르는 궤적의 비에 의해서 결정할 수 있다.



Ⅲ. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 시스템은 실험장치 본체, 분진공급장치, 편극전하 및 기류유입방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트, 인가전압을 공급하는 전압 발생장치, 처리가스가 통과하는 덕트 유로 및 처리유량을 조절하는 흡입 송풍기와 계측시스템으로 구성된다. 유입유속과 압력손실은 각각 Anemometer(model 6162, Kanomax LTD.), Differential Pressure Transmitter(midi LOGGER GL800, GRAPHTEC.)를 사용하여 측정하였고, 집진효율은 중량법으로 측정하였다.

Fig. 6은 본 집진장치의 전체 시스템에 관한 모식도를 나타낸다.



Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus.

1.1. Impaction 효과에 편극전하 방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트

실험장치 본체에 장착된 다층 다단 다공성 플레이트는 두께 1.2 mm의 steel plate로서 tube 통과유속(9~18 m/s)에 따른 압력손실 및 집진효율 특성을 살펴보기 위해 내경 12 mm 인 steel tube와 plate 상하에 지그재그 상으로 행할 절연체를 실험에 사용하였다. 다층 다단의 plate를 사용하는 경우는 impaction 효과를 증대시키기 위해 plate의 tube 위치가 교차되도록 하였으며, 분진을 함유한 기류가 tube를 통과시 고속의 분사류를 형성하여 분진에 강한 관성력을 갖게 하여 black hole로 향하게 되어 기류중의 분진이 포집 공간으로 들어와 퇴적될 수 있도록 하였다. 2~5 stage의 black hole 내경은 15 mm로 하였고, 1st stage로의 유입량을 증가시키기 위해 black hole로의 유입구 내경을 26 mm로 설계하였다. 또한 plate를 다층(2층)으로 결합시킨 여러 단의 상하로 전선을 배선하여 양극과 음극이 유도되도록 직류 전압을 연결하여 인가하도록 하고, 튜브로 연결되어있는 plate는 다음 단(stage)과 상호 다른 전극이 인가되도록 전선의 상하에 지그재그 상으로 절연체를 결합하여 설계하였다.

Fig. 7은 impaction 및 stage별 편극전하를 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 모식도이다.



Fig. 7. Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate with polarization charge to impaction effect.





Fig. 8. Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate with alternating polarization charge to impaction effect.

Fig. 8은 impaction 및 plate별 편극전하를 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 모식도이다. 이는 plate의 전극 배열에 따른 집진효율을 Fig. 7의 시스템과 비교하기 위해 다음과 같은 조건으로 설계하였다. 장치는 두께 1.2 mm의 steel plate로서 내경 12 mm의 절연 tube와 plate 상하에 지그재그 상으로 행할 절연체로 구성하였다. 분진을 함유한 기류가 tube 통과 시 다음 단의 black hole로 향하는 기류 중의 분진량을 증가시키기 위해 1~5 stage의 black hole 내경을 17 mm로 설계하였고, 편극전하 정전기력의 효과를 증대시키기 위해 절연 tube로 연결되어있는 plate 각각에 상호 다른 전극이 인가되도록 전선의 상하에 지그재그 상으로 절연체를 결합시켜 설계하였다. Table 2는 tube 직경에 따른 튜브통과유속이며, Table 3은 Fig. 7과 Fig. 8의 시스템의 조건을 비교한 것이다.

Tube diameter Inlet velocity (mm) (m/s)		Tube velocity (m/s)	Flow rate (m [*] /min)
	1.55	9	0.73
19	2.07	12	0.98
12	2.58	15	1.22
	3.11	18	1.46

Table 2. Inlet velocity and tube velocity with tube diameter.

Table 3. Experimental relational conditions with electrode array of multi-layer multi-stage porous plate.

비교	stage 별 편극전하 부과 시	plate 별 편극전하 부과 시
plate thickness (mm)	1.2	1.2
tube	Ø12 steel tube	Ø12 insulation tube
plate plith (mm)	30	15
	4 3 CH 9	H III



Fig. 9. Schematic diagram of stage using current inflow method.

Fig. 9는 기류유입을 유도하기 위해 설계한 stage 후면과 측면의 단면도이다. 입자의 Impaction 효과에 의해서만 black box 안으로 미세입자를 유입시키는데 한계가 있으므로 내경 3 mm인 tube hole과 내경 4 mm인 inflow hole을 설계하여 black box 내 기류유입을 유도하였다. Stage 후단에 설치되어 있는 흡입 송풍기를 통해 기류가 후단으로 유입되도록 유도하여 tube를 통해 다음 stage로 이동하려는 미세입자의 일부를 black box로 유입시켜 집진효율이 증가하도록 제작하였다. 또한 inflow hole의 돌출부에 의해 입자는 기류를 따라 나가지 않고 black box 벽면에 부착되어 재비산을 방지할 수 있다.

1.3. 분진 공급장치

일정량의 분진을 집진기 내로 주입하기 위한 분진공급장치는 feeding swcrew와 전압조절장치(power supply)로 이루어져 있다. 입자는 분진 hopper의 하부에 위치한 feeding screw의 일정한 회전에 의해 hopper의 옆에 부착되어 있는 원형관으로 유입되고, 원형관의 상부에서 압축공기를 상 방향으로 분사시켜 주면 상·하부의 압력구배에 의해 분진이 기류 중으로 분산, 공급되어진다. 그리고 전압조절장치를 사용하여 feeding screw의 회전속도를 제어함으로써 공급되어지는 분진의 양을 조절하고, 이에 따라 유입농도를 변화시킬 수 있게 제작되었다.

1.4. 흡입 송풍기

실험장치를 통과하는 기류는 실험 장치의 후단에 설치되어 있는 흡입 송풍기(Induced Draft Fan)에 의해 형성되어진다. 흡입 송풍기는 동력 5마력의 turbo-fan으로 기류의 유량 조절은 송풍기에 연결된 인버터(Inverter)에 의해 정확히 조절되어 진다.

1.5. 전압 공급장치

전압 공급장치는 분진 하전장치에 전압을 발생 공급하기 위한 것으로 전압이 0kV~3kV범위에서 조작이 가능하다. 분진 하전장치는 플레이트 사이의 절연체를 통해 편극전하를 발생시키기 위한 장치로 전압 공급장치에서 공급되는 전압이 플레이트의 양쪽에 위치한 지그재그상의 절연체가 설치되어있는 steel 재질의 봉에 인가되면 내부에 편극 현상이 일어나면서 정전기력이 형성되어 분진이 하전된다.

CH OT IN

2. 실험용 분진

실험용 분진은 태안 석탄 화력발전소에서 채취한 fly ash를 사용하였으며, Table 4은 실험에 사용된 분진의 성분 분석 결과를 나타낸 것으로 SiO₂ 및 Al₂O₃가 주성분으로 평균 밀도는 2140 kg/m² 이다.

Fig. 10은 분진의 입경분포를 입경분석기(Laser Diffraction Particle Size Analyzer, model : LS13320, BECKMAN COUNTER)를 사용하여 측정한 것이다. 분진의 입경범위는 0.4~200 µm의 범위를 가지며 부피기준으로 평균 입경은 38.06 µm로 나타났다. 그리고 중앙입경은 16.28 µm이고, 6 µm 이하의 미세분진은 약 25%를 차지했다.



Table 4. Chemical composition of test fly ash.

Fig. 10. Size distribution of test dust.

3. 실험방법

3.1. 압력손실 특성

Impaction 효과에 편극전하 방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 stage 수에 따른 압력손실은 집진 효율과 더불어 시스템 설계의 중요 인자가 된다. 본 시스템의 압력손실에 영향을 미치는 주요 실험변수로 유입유속(튜브 통과유속), stage 수 등이 있다. 압력손실은 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이들 변수에 따라 압력손실 특성이 변화 될 수 있다.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 2\rho v^2 \frac{P}{P_2}$$
(17)

여기서, ρ, P는 각각 대기 중의 밀도와 압력을, ν는 유입되는 유체의 속도를 뜻하며, P₁과 P₂는 plate 전·후에서의 압력을 뜻한다. 다층 다단 다공성 플레이트의 첫 단에서 P₁=P이며 n번째 단의 P₂는 n+1의 P₁과 같다.

본 연구에서는 다층 다단 다공성 플레이트 시스템에 대한 압력손실 특성과 여기에 기류유입방식을 부과했을 때의 stage 수의 증가에 따른 압력손실의 특성을 조사하였다.

3.2. 집진효율 특성

본 시스템의 집진효율 특성을 파악하기 위해 장치 입·출구에서 중량농도를 측정하고 다음 식에 의해 집진효율을 계산하였다.

$$\eta_t = 1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \tag{18}$$

여기서, η_t는 총괄 집진 효율, m_{in}는 입구 중량농도, m_{out}는 출구 중량농도를 나타낸다. 본 시스템에서 집진에 영향을 미치는 중요 변수는 유입유속(튜브통과유속), stage 수, 인가전압, plate 전극 배열 등이 있으며, 집진효율에 작용하는 주 메카니즘은 관성력에 의한 impaction효과와 미세입자에 대한 난류확산 및 브라운 운동 효과, 집진판에 작용하는 편극전하 정전기력이 될 수 있다.

- 22 -

본 연구에서는 다층 다단 다공성 플레이트 시스템에 대한 집진효율의 특성과 편극전하 방식을 부과한 두 종류의 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율의 특성을 구분하여 비교하였다. Table 5는 본 실험에 대한 조건을 요약한 것이다.

Table 5. Experimental conditions of Electrostatic Multi-layer Multi-stage Poros Plate system.

Description	Condition
Particle	fly ash
Inlet velocity (m/s)	1.55, 2.07, 2.58, 3.11
Tube diameter (mm)	12
Stage number	1, 2, 3, 4, 5
Applied voltage (kV)	0, 2.5
Plate pitch (mm)	10, 30
Inlet concentration (g/m ³)	3
Operating hours (min)	4
ATT &	CH OL IN

4. 수치해석 방법

4.1. 유동분포 및 입자궤적 해석

수치 시뮬레이션 대상인 다층 다단 다공성 플레이트의 형상에는 동일한 기하학적 모듈이 반복되는 특징이 있다. 다수의 모듈로 구성되어 있는 전체 영역이 계산 영역으로 사용된다면 요구되는 컴퓨터 용량 및 계산 시간은 막대하게 된다. 동일하게 반복되는 최소한의 모듈만을 고려할 때, 덕트 벽면 부근을 제외하면 다공성 플레이트에는 3개의 대칭면이 있고, 수치 모델은 각각 1개의 입구 및 출구 경계, 4면의 대칭 경계 및 porous 플레이트 부분에 해당하는 wall 경계를 가지게 된다. 가스 유동과 입자 거동을 시뮬레이션하기 위해 3D 전산유체해석 소프트웨어인 Fluent code가 사용되었다.

4.1.1. 유동장 지배 방정식

다층 다단 다공성 플레이트 시스템 내부의 유동 분포를 구하기 위해 집진기 내부의 유동을 비압축성, 정상상태의 유동이며, 입자의 질량 부하가 매우 낮다는 가정 하에 Navier-Stokes 방정식을 SIMPLE 알고리즘에 의해 해석하였다. 이 때 유체 유동에 대한 연속 방정식 및 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

관성 좌표계에서 i 방향에 대한 운동량 보존 방정식은 아래와 같이 기술된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$
(20)

(19)

1

여기서, p는 정압, τ_{ij} 는 stress tensor, ρg_i 와 F_i 는 중력 및 외력이다. Stress tensor τ_{ij} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{ij} = \left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\delta_{ij} \tag{21}$$

- 24 -

본 연구에서는 다층 다단 다공성 플레이트 시스템 내부의 난류를 해석하기 위하여 표준 k- c 모델을 사용하였으며, 이 경우, 난류 에너지 k와 그것의 소산율 c은 다음의 전달 방정식을 따른다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \tag{22}$$

그리고

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$
(23)

위 식에서, G_k 는 평균 유속 구배에 의한 난류에너지의 생성을 나타내며, 다음과 같이 표현된다.



 C_{μ} , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k 및 σ_{ϵ} 은 모델 상수들로서 계수 값으로는 격자 난류(grid turbulence) 및 채널 난류 등의 기초 실험 데이터에 의거해서 추천되고 있는 다음 Table 6의 값들을 사용하였다(B. E. Launder and D. B. Spalding; 1979).

Table 6. Values of turbulent coefficients.

C_{μ}	$C_{1^arepsilon}$	$C_{2^{arepsilon}}$	σ _k	σ _ε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

4.1.2. 입자 운동 지배방정식

본 연구에서는 분진입자의 거동을 입자개개에 대하여 Newton의 운동방정식을 적용하여 해석하는 Lagrangian 궤적 모델을 적용하였다. 입자의 운동을 기술하기 위해서는 입자에 작용하는 항력, 부력, 자기력, 중력, 전기력 등 여러 가지 힘과 입자의 물성을 고려해야 하는데, 단일 입자에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u-u_p) + g_x(\rho_p-\rho)/\rho_p + F_x$$
(26)

여기서 $F_D(u-u_p)$ 는 단위 입자 질량 당 항력으로 다음과 같이 정의된다.

$$F_D = \frac{-18\mu}{\rho_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \tag{27}$$

여기서 u는 유체의 속도, up는 입자 속도, μ는 유체의 분자점성, ρp는 입자의 밀도, D p는 입자의 직경이다. Re는 상대 Reynolds 수로서 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \tag{28}$$

따라서 위 식으로부터 개개의 입자의 운동 궤적을 추적하여 집진면에서 입자의 부착 정도를 판단할 수 있다.

5. 수치 시뮬레이션 결과

Fig. 11은 수치 시뮬레이션 대상인 다층 다단 다공성 플레이트의 속도장이다. 그림에서 가스는 duct를 통해 시스템이 유입되고, 1st stage에서 tube를 통과하면서 급격히 가속된다. tube를 통과한 유동은 고속으로 2nd stage의 플레이트 black hole을 향하며, 벽면을 따라 진행하여 측면에 위치한 tube를 통해 다음 stage로 빠져나가며, 일부는 벽면과의 반작용에 의해 1st stage 방향으로 역기류를 형성하여 재순환하는 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 유동 패턴은 다음의 3rd~5th stage를 통과하면서 유사하게 반복된다.

Fig. 12와 13은 다층 다단 다공성 플레이트에서 입경 0.1 및 10 µm 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 기류에 부유되어 유입된 입자들은 1st stage의 tube를 통과하는 기류의 흐름을 따라 급격히 가속되어 강한 관성력 효과에 의해 2nd stage의 black hole에 충돌•포집되며, stage 수 증가에 따라 이 과정은 계속 반복된다. 직경 0.1 µm 입자의 경우 상대적으로 낮은 관성력 때문에 2nd stage에서 집진 되지 않은 입자들은 다음 stage들에서 일부분 집진 되며, 집진 되지 않은 입자들은 최종 stage를 통과해

배출되는 것을 볼 수 있다. Fig. 13의 입경 10 µm 분진의 궤적은, $\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$ 으로 표현되는 입경의 2승에 비례하는 입자의 관성력 증가에 의해, 입자들은 주 유동으로부터 비교적 쉽게 분리되어 2nd stage에서 대부분이 집진되는 것을 볼 수 있다.



Fig. 11. Velocity vector plot of multi-layer multi-stage porous plate.

- 27 -



Fig. 12. Particle trajectory of multi-layer multi-stage porous plate($d_p = 0.1 \mu m$).



Fig. 13. Particle trajectory of multi-layer multi-stage porous plate($d_p = 10 \ \mu m$).

Ⅳ. 실험결과 및 고찰

1. 압력손실 특성

1.1. Stage 수의 증가에 따른 압력손실 특성

Fig. 14는 Impaction 효과만 적용한 플레이트의 튜브 내경 12 mm인 조건에서 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11m/s (튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)일 때 1~5 stage까지 stage 수 증가에 따른 압력손실 변화를 나타낸다. 튜브통과유속 9 m/s인 경우 1~5stage 수 증가에 따라 압력손실은 2, 12, 16, 28, 36 mmH₂O로 점차 증가하였으며 튜브 통과유속 12 m/s에서는 4, 19, 32, 47, 64 mmH₂O, 15 m/s에서는 8, 40, 57, 86, 115 mmH₂O, 18 m/s에서는 19, 56, 89, 114, 158 mmH₂O로 증가함을 알 수 있었다.

stage 수 증가에 따른 압력손실의 증가치는 유입유속(튜브통과유속)이 증가할수록 높게 나타나는데 이는 식 (17)에서 보듯이 압력손실은 유속의 자승에 비례함과 관련하여 변화됨을 알 수 있다.



Fig. 14. Pressure drop with increasing stage number and inlet velocity.

- 29 -

1.2. 기류유입을 유도했을 때 stage 수의 증가에 따른 압력손실 특성

Fig. 15는 기류유입을 유도했을 때 다층 다단 다공성 플레이트의 튜브 내경 12 mm인 조건에서 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s(튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)일 때 1~5 stage 수 증가에 따른 압력손실을 나타낸다. 동일 조건에서 튜브통과유속이 9, 12, 15, 18 m/s 일 때 각각 2, 12, 15, 21, 30 mmH₂O, 4, 22, 30, 44, 61 mmH₂O, 9, 35, 55, 73, 95 mmH₂O, 18, 52, 73, 101, 134 mmH₂O 였다.

Impaction 효과에 기류유입을 유도했을 때 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 압력손실은 더 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 동일 조건일 경우 같은 튜브통과유속에서 기류유입에 의해 유속이 분산되면서 마찰손실에 의한 것으로 판단된다.



Fig. 15. Pressure drop with increasing stage number, inlet velocity and inflow current.

2. 집진효율 특성

2.1. 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율 특성

2.1.1. stage 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 16은 유입유속이 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s (튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s) 일 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 튜브통과유속 9 m/s 인 경우 1단에서 5단으로 stage 수가 증가할 때 stage 별 집진효율은 56.5, 65.3, 71.6, 77.9, 81.7 %로 증가하며, 튜브통과유속 12 m/s에서는 71.7, 75.1, 81.3, 84.6, 87.8 %, 튜브통과유속 15, 18 m/s에서는 각각 75, 80, 82.5, 87.1, 89.7 %, 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1 %로 유입유속별 stage 수 증가에 따라 집진효율이 증가함을 알 수 있다. 다층 다공성 plate를 다단으로 설치할 경우 stage 수가 증가할수록 impaction 및 난류 재순환 유동에 의한 와류 확산 효과의 증대로 인해 집진효율이 증가하나, stage 수 증가에 따른 집진효율 증가 구배는 후단으로 갈수록 낮아지는데 이는 입경이 큰 입자는 높은 관성력에 의해 전단에서 거의 집진 되고 후단으로 갈수록 포접되지 않은 미세입자의 집진 효율이 낮아지기 때문이다.



Fig. 16. Collection efficiency with increasing stage number and inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3g/m³, 0 kV, non-inflow current).

- 31 -

2.2. Impaction 효과에 편극전하 및 기류유입방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율 특성

2.2.1. 편극전하를 부과했을 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 17은 편극전하 방식을 적용했을 때 인가전압 2.5 kV에서 튜브 내경 12 mm, 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s(튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)일 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 튜브 통과유속 9 m/s에서 stage수의 증가에 따른 집진효율은 62.8, 75, 80.4, 82, 89.4 %로 점차 증가하였고 튜브 통과유속 12, 15, 18 m/s에서 각각 77, 82.9, 85.2, 87, 92.9 %, 82.3, 84.9, 86.8, 89.9, 94.7 %, 84.9, 87.7, 89.3, 93.1, 95.7 %로 impaction 효과만 적용했던 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율에 비해 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 유입 유속(튜브 통과유속)이 증가함에 따라 관성력이 높아져 큰 입자의 포집효율을 높이는데 기인하였고, 여기에 2.5 kV의 전압을 인가하여 플레이트 사이에 정전기력을 형성시켜 편극 현상에 의해 후단으로 갈수록 잡히지 않은 미세 입자의 집진 효율 또한 높일 수 있었다.



Fig. 17. Collection efficiency with increasing stage number, applied voltage and inlet velocity (fly ash, inlet concentration 3g/m³, non-inflow current).

2.2.2. 편극전하 유무에 따른 stage 수별 집진효율 특성

Fig. 18 (a), (b), (c), (d)는 튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s (유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11m/s)에서 편극전하 유무에 따른 1~5 stage까지 stage 수별 집진효율 특성을 나타내었다.Fig. 18 (a)는 튜브내경 12 mm 에서 튜브통과유속 9 m/s (유입유속 1.55 m/s)일 때 stage수 증가에 따라 인가전압 0 kV에서는 56.5~80.3 %로 집진효율은 증가하게 되며, 2.5 kV의경우 집진효율은 62.8~89.4 %로 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 18 (b)의 경우 동일조건에서 튜브통과유속 12 m/s (유입유속 2.07 m/s)일 때 0 kV에서 71.5~87.8 % 이고 2.5kV에서 77~92.9 %로 증가되며, Fig. 18 (c)는 튜브통과유속 15 m/s (유입유속 2.58 m/s)일때 0 kV에서 75~89.7 %이고 2.5 kV에서 81.8~94.7 %로 증가된다. Fig. 18 (d) 또한튜브통과유속 18 m/s (유입유속 3.11 m/s)일 때 0 kV에서 80.5~91.1 %이고 2.5 kV에서84.9~95.7 %로 증가된다. 즉, 유입유속(튜브통과유속)이 증가할수록 stage 수 증가에 따른집진효율은 상승곡선을 나타내며 여기에 편극전하 방식을 적용하면 다층 다단 다공성플레이트 시스템의 집진효율 보다 더 높은 값으로 증가됨을 볼 수 있다.



(a) Inlet velocity 1.55 m/s



(c) Inlet velocity 2.58 m/s



Fig. 18. Collection efficiency with increasing stage number and various applied voltage (fly ash, inlet concentration 3g/m³, non-inflow current).

-

ot u

6

2.2.3. 편극전하 유무에 따른 유입유속별 집진효율 특성

Fig. 19는 impaction 효과만 적용했을 때와 편극전하를 부과했을 때 5 stage, 튜브 직경 12 mm에서 유입유속별 집진효율 특성을 나타낸 것이다.

동일 조건에서 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s(튜브 통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)에서의 집진효율이 0 kV에서는 81.7, 87.6, 90.4, 92.1 %였고, 2.5 kV에서는 89.4, 92.9, 94.7, 95.7 %로 편극전하를 적용하였을 때 집진효율이 증가하였다. 유입유속이 낮을수록 집진부 내의 체류시간이 증가하여 편극전하의 정전기력에 의한 입자의 대전량이 증가되고 효율 증가폭이 커지게 된다. 또한 유입유속이 증가할수록 입자의 대전량이 감소하여 효율 증가폭은 감소할 수 있으나 편극전하의 정전기력에 의한 강한 전계형성과 주 집진부의 관성력 증가로 인해 전체 집진효율은 증가함을 알 수 있다.



Fig. 19. Collection efficiency with increasing inlet velocity and various applied voltage (fly ash, inlet concentration 3g/m³, non-inflow current, 5 stage).

2.2.4. 기류유입을 유도했을 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 20은 기류유입을 유도하여 튜브 내경 12 mm, 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s(튜브 통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)일 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다.

유입유속 1.55 m/s, 튜브 통과유속 9 m/s에서 stage별 집진효율은 72.3, 78.1, 80.9, 82.9, 86.4 %로 점차 증가하였고, 튜브 통과유속 12, 15, 18 m/s(유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s)에서는 각각 78.4, 81.6, 83.4, 86.6, 90.6 %, 83.3, 84, 86.7, 89.9, 92.5 %, 84.9, 86.3, 87.3, 90.9, 94.1 %로 impaction 효과만 적용했던 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진 효율에 비해 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 기류유입을 유도하여 플레이트 벽면에 부착되는 입자의 충돌 횟수를 증가시키기 때문이다.



Fig. 20. Collection efficiency with increasing stage, inlet velocity and inflow current (fly ash, inlet concentration $3g/m^3$, 0 kV).

2.2.5. 기류유입 유무에 따른 stage 수별 집진효율 특성

Fig. 21 (a), (b), (c), (d)는 튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s에서 기류유입 유무에 따른 1~5 stage까지 stage 수별 집진효율 특성을 나타내었다.

Fig. 21 (a)는 튜브내경 12 mm 에서 튜브통과유속 9 m/s (유입유속 1.55 m/s)일 때 stage 수 증가에 따라 다층 다단 다공성 플레이트의 집진효율은 56.5~80.3 %, 기류유입 유도 시 집진효율은 72.3~86.4 %로 증가하였고, Fig. 21 (b)는 동일 조건에서 튜브통과유속 12 m/s (유입유속 2.07 m/s) 일 때 다층 다단 다공성 플레이트의 효율은 71.5~87.8 %, 기류유입 유도 시 78.4~90.6 %로 증가되며, Fig. 21 (c)는 튜브통과유속 15 m/s (유입유속 2.58 m/s)에서 집진효율은 75~89.7 %이고 기류유입 유도 시 83.3~92.5 %로 증가된다. Fig. 21 (d) 또한 튜브통과유속 18 m/s (유입유속 3.11 m/s)에서 집진효율은 80.5~91.1 %이고 기류유입 유도 시 84.9~94.1 %로 증가됨을 볼 수 있다. 즉, 유입유속(튜브통과유속)이 증가할수록 stage 수 증가에 따른 집진효율은 상승곡선을 나타내며 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율에 비해 기류유입유도 시 입자의 포집량이 증가함으로 효율 또한 증가함을 알 수 있다.



(a) Inlet velocity 1.55 m/s



(c) Inlet velocity 2.58 m/s



2.2.6. 기류유입 유무에 따른 유입유속별 집진효율 특성

Fig. 22는 5 stage, 튜브 내경 12 mm에서 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s (튜브 통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)일 때 기류유입의 유무에 따른 집진효율 특성을 나타낸다. 동일 조건에서 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율은 80.3, 87.8, 89.7, 91.1 % 이었으나 여기에 기류유입방식을 부과하였을 경우 집진효율은 86.4, 90.6, 92.5, 94.1 %로 기류유입을 유도하여 실험한 결과 효율이 더 증가함을 알 수 있었다. 이는 유입유속이 증가할수록 보다 큰 관성력을 받아 효율이 증가되며, 단(stage) 후면에서의 기류유입 유도 시 튜브를 통과한 기류의 급격한 방향전환으로 인해 black box 내에 입자 포집을 유도한다. 따라서 입자가 분리된 배출가스의 흐름이 다음 단(sage)의 black hole로 유입되는 과정을 반복하면서 효율이 증가한 것으로 생각된다.



Fig. 22. Collection efficiency with increasing inlet velocity and inflow current (fly ash, inlet concentration $3g/m^3$, 0 kV, 5 stage).

2.2.7. 편극전하 및 기류유입방식을 부과했을 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 23은 편극전하 및 기류유입방식을 부과했을 때 튜브 내경 12 mm, 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s (튜브 통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)에서의 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다.

튜브 통과유속 9 m/s인 경우 1단에서 5단으로 stage 수가 증가할 때 stage 별 집진효율은 74.9, 82.4, 84.6, 88.6, 92 %로 증가하며, 튜브 통과유속 12 m/s에서는 80.2, 84.2, 86.5, 89.8, 94.9 %, 15 m/s에서는 86, 87.5, 87.9, 92.4, 96.5 %, 18 m/s에서는 88.2, 89, 89.7, 93.6, 97.9 %로 증가하면서 stage 수 증가에 따른 집진효율이 상승하고 있음을 나타낸다. 이는 플레이트 사이에서 일어나는 편극현상으로 인한 정전기력에 의해 미세입자를 포집하고, 기류유입을 유도하여 정전기력의 효과를 극대화시켜 재비산을 방지할 수 있기 때문으로 판단된다.



Fig. 23. Collection efficiency with increasing stage, inlet velocity and inflow current (fly ash, inlet concentration 3g/m³, applied voltage 2.5 kV).

2.2.8. 기류유입을 유도했을 때 편극전하 유무에 따른 집진효율 특성

Fig. 24는 5 stage, 튜브 내경 12 mm에서 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.11 m/s(튜브 통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)에서 기류유입방식을 부과했을 때 편극전하 유무에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다.

기류유입방식을 부과했을 때 인가전압 0 kV에서 집진효율은 86.4, 90.6, 92.5, 94.1 %였고, 인가전압 2.5 kV에서는 92, 94.9, 96.5, 97.9 %로 유입유속이 증가할수록 집진효율은 증가하는데, 이는 다층 다단 다공성 플레이트에 기류유입을 유도하여 여기에 편극전하의 정전기력을 부과하면 미세입자의 하전량의 증가로 인해 집진효율이 높아짐을 알 수 있다.



Fig. 24. Collection efficiency with increasing inlet velocity, various applied voltage and inflow current (fly ash, inlet concentration 3g/m³, 5 stage)

2.2.9. 편극전하 및 기류유입방식 유무에 따른 집진효율 특성

Fig. 25 (a), (b)는 편극전하의 유무와 기류유입 유도시 편극전하를 적용했을 때의 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 튜브직경 12 mm, 유입유속 1.55 m/s (튜브 통과유속 9 m/s), 1 stage일 때 Fig. 25 (a)에서 집진효율은 0 kV인 경우 56.5 %이고 2.5 kV의 인가전압을 주었을 경우 62.8 %로 증가하였지만, 동일 조건에서 Fig. 25 (b)와 같이 기류유입을 유도하여 2.5 kV의 인가전압을 주었을 경우 74.9 %로 크게 증가하였다. 이는 편극현상으로 인한 정전기력을 통해 입자를 하전시키고, 기류유입을 유도하여 입자들이 블랙박스 내 집진면적에 부착되는 비율의 증가로 인한 효율 증가로 판단된다.



(a)

- 44 -



Fig. 25. Improve collection efficiency with increasing stage and various applied voltage at inflow current (fly ash inlet concentration $3g/m^3$)



2.2.10. Plate별 편극전하 부과 시 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성

Fig. 26은 stage별 편극전하를 부과했을 때 보다 정전기력의 효과를 더 증가시키기 위해 plate별 편극전하를 부과한 시스템의 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 인가전압 2.5 kV에서 튜브 내경 12 mm, 유입유속 1.55, 2.07, 2.58 m/s(튜브통과유속 9, 12, 15 m/s)일 때 튜브통과유속 9 m/s인 경우 집진효율이 78.3, 85.6 91.2, 95.7, 97 %였고, 1 2 m/s인 경우는 83.6, 88.3, 95.4, 96.8, 97.7 %, 15 m/s인 경우는 87, 91.2, 96.6, 98.1, 98.5 %로 1~5 stage 증가 시 집진효율은 증가하였다. Stage별 편극전하 부과 시 5 stage, 유입유속 2.58 m/s에서의 집진효율 96.5 %는 plate별 편극전하 부과 시 98.5 %로 증가하는데, 이는 Fig. 7의 시스템 보다 Fig. 8의 시스템의 편극전하 정전기력이 더 크게 작용하였음을 알 수 있다.



Fig. 26. Collection efficiency with increasing stage in alternating polarization charging system (fly ash, inlet concentration 3g/m³, applied voltage 2.5 kV).

2.2.11. Plate 전극 배열에 따른 집진효율 특성

Fig. 27은 impaction 효과에 편극전하 방식을 부과한 다층 다단 다공성 플레이트 시스템에서 plate 전극 배열에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다.

5 stage, 튜브 내경 12 mm, 인가전압 2.5 kV, 유입유속 1.55, 2.07, 2.58 m/s (튜브통과유속 9, 12, 15 m/s)에서 stage별과 plate별 편극전하를 부과했을 때 시스템 집진효율을 비교하기 위해, stage별 편극전하를 부과한 장치는 steel tube를 plate별 편극전하를 부과한 장치는 절연 tube를 사용하여 plate의 전극 배열을 변화시켜 실험하였다.

Fig. 7의 시스템 집진효율은 92, 94.9, 96.5 %, Fig. 8의 시스템은 97, 97.7, 98.5 %로 plate별 편극전하를 부과했을 경우 집진효율이 증가됨을 볼 수 있었다. 이는 Fig. 8 시스템의 경우 편극전하의 정전기력을 높이기 위해 각 plate별 상호 다른 전극을 인가하였고, 편극전하의 정전기력의 효과를 증가시키기 위해 식 (2)에서도 알 수 있듯이 극판사이의 간격을 30 mm에서 15 mm로 줄여 정전용량을 크게 하였다. 따라서 분진이 plate 사이와 black hole 내부 벽면에 부착되어 재비산이 일어나지 않기 때문에 집진효율이 증가한다고 판단된다.



Fig. 27. Collection efficiency with electrode array of polarization charge (fly ash, inlet concentration 3g/m³, applied voltage 2.5 kV, 5 stage).

- 47 -

V. 결 론

본 논문에서는 관성력과 기류유입을 유도하여 편극전하의 정전기력의 집진 메커니즘을 도입하여 장치규모가 소형이며, 대 유량 처리가 가능한 집진 시스템을 개발하기 위해 시스템 유입유속(튜브통과유속), stage 수, 인가전압 등의 다양한 실험변수에 따른 압력손실 및 집진효율 변화특성에 대한 실험을 수행하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- Stage 수가 1~5 단으로 증가할 때 튜브내경 12 mm, 유입유속 2.07 m/s(튜브통과유속 12 m/s)인 경우 압력손실은 4, 19, 32, 47, 64 mmH₂O 였으며, 2.58 m/s (튜브통과유속 15 m/s)인 경우 8, 40, 57, 86, 115 mmH₂O로 stage 수 및 유입유속이 증가할수록 압력손실은 증가하였으나, 기류유입을 유도했을 경우 압력손실은 다층 다단 다공성 플레이트 시스템에 비해 낮게 나타난다.
- 2. 본 시스템에서 stage 수가 1~5 단으로 증가할수록 집진효율은 증가하며, 5 stage, 유입농도 3 g/m'에서 유입유속 1.55, 2.07, 2.58, 3.1 1m/s(튜브통과유속 9, 12, 15, 18 m/s)인 경우 집진효율은 각각 81.7, 87.6, 90.4, 92.1 % 이었으나 동일 조건에서 2.5 kV의 전압을 인가하였을 경우 각각 89.4, 92.9, 94.7, 95.7 %로 편극현상으로 인한 정전기력에 의해 효율이 상승함을 알 수 있었다.
- 3. 유입유속 3.11 m/s (튜브통과유속 18 m/s)에서 stage 수가 증가할수록 (1→5단) 집진효율은 80.5, 83.8, 86.2, 88.7, 91.1 % 이었으나 기류유입방식을 부과했을 경우 84.9, 86.3, 87.3, 90.9, 94.1 % 로 증가하였다.
- 4. 편극전하 및 기류유입 방식을 부과했을 때 stage 수가 증가할수록 집진효율은 증가하며, 유입유속 3.11 m/s (튜브통과유속 18 m/s)에서 집진효율이 88.2 → 97.9 %로 기류유입 유도 시 편극현상으로 인한 정전기력이 증가하면서 집진효율이 증가함을 확인하였다.
- 5. 1 stage, 유입농도 3 g/m², 유입유속 1.55 m/s (튜브통과유속 9 m/s)인 경우 인가전압 0 kV에서 집진효율은 56.5 % 이었으나 2.5 kV의 전압을 인가하였을 때 62.8 %, 기류유입을 유도하여 2.5 kV의 전압을 인가하였을 때 74.9 %로 편극전하 방식에 기류유입을 유도하면 정전기력의 효과가 증가되므로 효율이 크게 상승함을 알 수 있었다.

- 6. Alternating polarization charge(Plate별) 부과한 본 시스템에서 stage 수가 1~5단으로 증가할수록 집진효율은 증가하며, 유입유속 2.58 m/s (튜브통과유속 15 m/s)에서의 효율이 98.5 %로 가장 높게 나타난다.
- 7. 5 stage, 인가전압 2.5 kV에서 집진효율은 stage별 편극전하를 부과 할 때 보다 plate 별 편극전하를 부과했을 때 정전기력의 증가로 인해 stage 수 및 유입유속이 높아지면서 집진효율이 2~5 % 증가함을 알 수 있다.
- 8. 본 시스템은 필터 사용 없이 고효율을 안정적으로 유지하면서 높은 처리 유속에 의한 대유량 처리가 가능하고, 장치의 소형화에 의한 설치비용 및 유지·관리 측면에서 효과적일 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

- A. Jaworek and A. Krupa (1996), "Corona discharge from a multipoint electrode inflow air", Journal of Electrostatics, 38, pp. 187~197.
- Daniel M., Pierre P. and Marcel B. (1999), "A Versatile Flat-Deposit Impactor-Type Aerosol Collector, Part 1 : Design and Qualitative Study", Aerosol Science 31, pp. 323~337.
- Gwi-Nam Bae, Jun-Ho Ji and Kil-Choo Moon (1999), "Collection characteristics of a MOUDI cascade impactor for coarse particles", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 15, No. 6, pp. 799~804.
- Hak-Joon Kim, Bangwoo Han, Yong-Jin Kim, Jong-Pil Yoon and Kyeong-Soo Han (2008), "Performance Tests on ESP with Indirect Discharge and Dielectric Collector", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 453~454.
- H.M. Yang and S.S. Kim (1994), "Visualization of Particle Trajectories with Different Paticle Sizes in Electrostatic Precipitator", Journal of the Korean Society of mechanical engineers (Ⅱ), pp. 191~194.
- H.J. Kim, B.W. Han, W.S. Hong, W.H. Shin, W.S. Oh, J.P. Yoon. K.S. Han, Y.J. Kim (2009), "Collection of Submicron Particles via an ESP with Electrostatic Dielectric Collectors", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 559~560.
- Ji, J.H., Bae, G.N., and Hwang, J. (2001), "Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor", Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 17, No. 6, pp. 441~450.
- Jeong-Il Kim and Seok-Jun Yoa (1998), "An Experimental Study on Characteristics of Electrostatic Bag Filter with Precharging Type", Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 93~106.

- 50 -

- Jae-Youn Park, Sang-Bo Han and Sang-Hyun Park (2008), "A Study on the Effect of Magnetic Field in Electrostatic Precipitator for improving Precipitation Efficiency of Particulate Matter", Journal of the Korean Institute of illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 22, No. 12, pp. 122~129.
- J. I. Kim, S. J. Yoa (1998), "Investigation of Characteristics of Electrostatic Bag Filter with Discharge Electrode Shapes and Filter Properties", J. KAPRA Vol. 14, No. 3, pp. 237~250.
- J.H. Byeon, J.H. Hwang, J.H. Park, K.Y. Yoon, B.J. Ko, S.H. Kang, J.H. Ji (2006), "Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge", Journal of Aerosol Science 37, pp. 1618~1628.
- Klaus Willeke, Xuejun Lin, and Sergey A. Grinshpun (1998), "Improved Aerosol Collection by Combined Impaction and Centrifugal Motion", Aerosol Science and Technology 28, pp. 439~456.
- Kyung Mi Lee, Young Min Jo and Kun Li (2009), "Theoretical Study on the Electrostatic Effect for Aerosol Fitration", Journal of Korea Society of Waste Management, Vol. 26, No. 1, pp. 52~58.
- Novick V. J. and Alvalez J. L. (1987), "Design of a Multistage Virtual Impactor", Aerosol Science and Technology 6, pp. 63~70.
- 15. Oglesby, S., and Nichols, G. B. (1978), "Electrostatic Precipitation Technology", New York, Marcel Dekker Inc.
- 16. Parcker C. R. (1993), "Aerosol science and technology", Mcgraw-Hill Inc., pp. 131~132.
- Swanson P. D., Muzzio F. J., Annapragada A. and Adjei A. (1996), "Numerical analysis of motion and deposition of particles in cascade impactors", International Journal of Pharmaceutics, 142, pp. 33~51.

- Suk-Hoon Kang, Jun-Ho ji, Jeong-Hoon Byeon and Jung-Ho Hwang (2003), "Collection Efficiency of Nano Particles by Electrostatic Precipitator using Dielectric Barrier Discharge", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers. B. B Vol. 27, No. 11, pp. 1542~1547.
- Seok Joo Park and Sang Soo Kim (1994), "Particle Trajectory Visualization in Electrostatic Precipitator", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 18, No. 12, pp. 3270~3275.
- S. O. Kasap (2005), Principles of Electronic Materials and Devices-3rd Edition, New York, McGraw-Hill.
- S.J. Park and S.S. Kim, 1998, "Effects of Particle space chare and turbulent diffusion on performance of plate-plate electrostatic precipitators", Journal of Electrostatics 45, pp. 121~137.
- Tsai C. J. and Cheng Y. H. (1995), "Solid Particle Collection Characteristics on Impaction Surface of Different Designs", Aerosol Sci. Tech., 23, 96~106.
- 23. 강공언, 강병욱, 신은상, 천만영 (1999), 대기오염방지기술, 경기, 신광문화사
- 24. 고두석, 안병원 (1996), 전기공학, 서울, 효성출판사.
- 25. 안병원, 엄상오 (1999), 전기공학개론, 서울, 효성출판사.
- 26. 여석준, 조용수 (2006), "액적 분사 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진 특성", 대한환경공학회 춘계학술연구 발표회 논문집 706~713.
- 27. 조용수, 여석준 (1996), "원통형 전기집진기의 전기유체역학적 해석에 관한 연구", 한국대기보전학회지, 제12권 3호, pp. 243~254.
- 28. 최동진(1998), 전기공학, 서울, 학문사.

- 52 -

감사의 글

철부지였던 학부시절부터 석사 진학의 설레임과 긴장감으로 시작했던 2년 이라는 대학원 생활은 저에게 많은 것을 느끼고 생각하게 한 시간이었습니다. 그동안 많은 도움을 주셨던 분들에게 이 자리를 통해 감사한 마음을 전합니다.

먼저 그동안 부족한 저에게 학문에 대한 가르침과 사회생활에서 필요한 예의와 인성, 책임감 등에 대해 조언해 주시고 믿어주신 여석준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 학부시절부터 많은 관심과 가르침을 주신 박청길 교수님, 김일규 교수님, 김상단 교수님, 이태윤 교수님, 본 논문의 심사과정을 통해 도움을 주신 이병헌 교수님, 평소 깊은 관심과 자상함으로 항상 따뜻하게 대해 주신 강임석 교수님께 감사의 인사를 드립니다.

바쁘신 와중에도 많은 관심과 격려를 보내주신 조용수 박사님(좋은 인연 만나시길...), 학부시절 함께 많은 추억 만들었고 최선을 다하는 모습으로 모범을 보여주신 홍균 선배와 동규 선배, 철없는 학부시절부터 전공공부에 대한 자신감을 갖도록 도와주시고 때론 질책과 때론 따뜻한 배려로 연구실의 장으로 성장할 수 있도록 이끌어주신 영원한 MC제 명국선배, 잠깐이었지만 열심히 하라고 응원해 주셨던 용숙이 언니, 연구실에 첫 발을 내딛게 도와주고 항상 아껴주신 까리 재철 선배와 주현 선배, 다른 연구실에서 전공에 대한 열정을 불태우고 있는 호성 선배, 학부시절 항상 함께했던 보라 모두에게 감사의 마음을 전합니다. 그리고 대학원 생활을 하는 동안 가장 많이 의지할 수 있었고 항상 옆에서 힘이 되어준 종대 선배(이제 강해지셔야죠?), 진솔한 얘기 더 많이 나누고 싶었는데 아쉽지만 자신의 길을 향해 도전하고있는 동은 선배, 지금은 함께 하지 못하지만 먼저 자리잡고 열심히 생활하고 있는 보고싶은 은정이, 부족한 언니 수행비서까지 해준다고 고생이 많았어... 고마운 우리 주연이 (이제 언니혼자 잘 해볼게!), 말로는 다 표현할 수 없지만 학부시절부터 지금까지 변함없이 응원해주고 옆에 있어줘서 많은 힘이 되었던 대재. 우리 실험실의 귀염둥이 막내 쏭! 열심히 하는 모습이 보기 좋은 송은이에게 감사의 마음을 전하며 5년 동안 연구실이라는 인연으로 처음 만나게 되었지만 힘들고 지칠 때마다 서로 힘이 되어주고 기쁜일이 있을 때는 서로 한마음이 되어 기뻐해주는 또 하나의 가족이 있어서 항상 즐거운 생활을 할 수 있었습니다.

다른 연구실인데도 불구하고 정말 이웃사촌처럼 지냈던 대기방 식구들(심심할 때 항상 우리방을 먼저 찾는 상준 선배, 조금은 어색한 사이로 보여도 호칭은 가장 친하게 들리고 지금은 친해진 하형, 학업의 도움이 필요할 때나 고민이 있을 때 깜짝 나타나서 해결해주는 다지 선배)에게도 감사의 마음을 전합니다.

항상 격려해주고 따뜻하게 안아주었던 언제나 포근한 나의 정신적인 지주 정선이 언니, 언니지만 때론 친구처럼 편하게 대해주고 나를 아껴주신 애교만점의 유진이 언니, 처음부터

- 53 -

낯선느낌 없이 편안하고 재미있는 현미 언니, 천하무적 힘과 큰 키만 보면 무서울거 같지만 의외로 자상한 매력의 광훈 선배, 총무하면서 많은 도움 주셨던 인성선배(선배를 따라가긴 힘들었어요)에게도 감사의 마음을 전합니다.

힘들고 외로울 때 서로 힘내자고 응원하며 지냈던 대학원 졸업 동기 은미·혜민이·인정이 모두 수고 많았고(졸업 축하해!), 속 깊은 얘기 많이 들어주고 차 한잔의 여유를 함께 했던 상엽 선배, 위생방의 고참이신 창욱 선배, 항상 수고 많다고 격려해주신 대규 선배, 좋은 조언 많이 해주신 현승 선배, 이제 조금은 편하게 나에게 말을 건네주는 주희 선배, 항상 신경써 주시고 많은 관심과 도움을 주셨던 봉균 선배(올해는 자연재해의 피해가 없기를 바랄게요.), 환경공학과라는 울타리에서 만나게 된 인연이었지만 지금까지 변함없이 아껴주고 챙겨주신 민정 언니·보라 언니·근주 언니, 이하 이 글에 다 담지 못했지만 4호관 2층의 모든 분들께 감사의 글을 전합니다.

학부시절부터 좋은 추억 만들고 함께했던 우리 05학번 동기들에게도 감사의 마음을 전하며 앞으로 어디에서든 최선을 다하는 멋진 친구들이 되길 기원합니다.

그리고 나의 소중한 친구들(언제나 나의 편이 되어준 현주, 서로의 마음을 가장 잘 아는 찡이, 함께 있으면 웃음이 끊이질 않는 매자, 언니같이 따뜻한 멋진 디자이너 미용이, 사랑스러운 혜공, 오랜만에 만나도 한결같은 친구 혜숙·안민·짱하, 서로의 행복을 진정으로 기원해주는 권슬·전미·은지) 모두에게 고마움을 전하며 항상 좋은일만 가득 했으면 좋겠습니다.

마지막으로 지금까지 포기하지 않고 도전하도록 끝까지 믿어주시고 격려해주시며 아낌없는 사랑으로 감싸 않아주시는 아버지, 어머니께 자랑스러운 외동딸로 성장하여 보답하겠다고 다짐하면서 감사의 인사와 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

지금까지 부족하지만 저를 끝까지 믿어주고 응원해 주신 만큼 실망시키지 않도록 최선을 다하는 보배가 되도록 노력하겠습니다.

र मा मा म