



권 준 형

환경공학과



부경대학교 대학원





건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 집진특성

공학박사 학위논문

공학박사 학위논문

건·습식 혼합형

전기 다층 다단 임팩션 시스템의 집진특성

지도교수 여 석 준

이 논문을 박사학위논문으로 제출함.

2016년 8월

부경대학교 대학원

환경공학과

권 준 형

권준형의 공학박사 학위논문을 인준함.

2016년 8월 26일

주	심	공학박사	0]	병	헌	
위 🗧	원	공학박사	강	임	석	(B)
위	원	공학박사	김	क्षे	직	
위	원	공학박사	김	용	진	(SEE)
위	원	공학박사	ले	석	スゼ	

목	차
---	---

목 차	Ι
List of Figures	Ш
List of Tables	IX
Abstract	Х
I.서 론	1
Ⅱ. 이론적 배경	6
2.1. 임팩션 시스템의 집진메커니즘	6
2.1.1. 입자의 충돌	6
2.1.2. Stokes number ·····	9
2.2. 전기집진장치	11
2.2.1. 입자에 작용하는 힘	11
2.2.2. 전기집진장치의 집진원리	12
2.2.3. 전기장과 전류의 지배방정식	17
2.2.4. 입자 하전량	18
2.2.5. 유효 이동도	21
2.2.6. 입자 이동 속도	22
2.2.7. 전기집진장치의 집진효율	24
2.3. 세정집진장치	27
2.3.1. 직접차단	27
2.3.2. 관성충돌	28
2.3.3. 확산작용	29
2.3.4. 응집작용	31
2.3.5. 침투도	32
2.4. 본 연구의 집진 시스템 및 메커니즘	38
2.4.1. 건식 시스템	38
2.4.2. 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템	43
Ⅲ. 수치 시뮬레이션	46
3.1. 유동 분포 및 입자궤적 해석	46

911 9도라 키메 바구시	AC
3.1.1. ㅠ중경 시매 명정적	40
3.1.2. 입자 운동 지배 방정식	49
3.2. 다층 다단 다공성 플레이트의 수치 시뮬레이션 결과	50
3.2.1. 유동 및 입자궤적 해석	50
Ⅳ. Lab. scale 집진 시스템	52
4.1. 전기 다층 다단 임팩션 시스템	52
4.1.1. 실험장치	52
4.1.2. 실험방법	61
4.1.3. 결과 및 고찰	64
4.1.4. 결 론	89
4.2. 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템	92
4.2.1. 실험장치	92
4.2.2. 실험방법	98
4.2.3. 결과 및 고찰	101
4.2.4. 결 론	115
V. Pilot 및 Real scale 집진시스템	120
5.1. Pilot scale (50CMM급) 집진 시스템	120
5.1.1. 실험장치	120
5.1.2. 실험방법	130
5.1.3. 결과 및 고찰	131
5.2. Real scale (800CMM급) 집진 시스템 ······	134
5.2.1. 실험장치	134
5.2.2. 실험방법	154
5.2.3. 결과 및 고찰	156
53 Z Z	159
	100
Ⅵ 겯 로	161
	101
착고무허	163
	100

List of Figures

Fig. 2.1. Schematic diagram of collision theory.	7
Fig. 2.2. Velocity at the point B.	8
Fig. 2.3. Corona discharge.	12
Fig. 2.4. Avalanche multiplication and ionization of the gas molecules.	13
Fig. 2.5. Negatively charged molecules of the gas.	15
Fig. 2.6. Collection mechanism of electrostatic precipitator.	16
Fig. 2.7. Force acting on the particle.	24
Fig. 2.8. Direct interception.	27
Fig. 2.9. Inertial impaction.	28
Fig. 2.10. Diffusion.	30
Fig. 2.11. Log-normal distribution.	33
Fig. 2.12. Target efficiency of diameter of water droplet.	36
Fig. 2.13. Performance cut diameters predictions	
for typical vertical count-current spray and cross-current spray	37
Fig. 2.14. Multi-staged porous plate system.	39
Fig. 2.15. Collection mechanism of multi-staged porous plate system.	39
Fig. 2.16. Electrostatic multi-layered multi-staged	
impaction system (side view).	40
Fig. 2.17. Collection mechanism	
of multi-layered multi-staged porous plate system.	41
Fig. 2.18. Collection mechanism of electrostatic section.	42
Fig. 2.19 Electrostaic multi-layered multi-staged porous plate system	
of mixed dry and wet type.	43
Fig. 2.20. Collection mechanism of electrostatic multi-layered multi-staged porous	
plate system of mixed dry and wet type (1, 2 stage).	44
Fig. 2.21. Collection mechanism of electrostatic multi-layered multi-staged porous	
plate system of mixed dry and wet type (3, 4 and 5 stage)	45
Fig. 3.1. Velocity vector plot of multi-layered multi-staged porous plate	51

Fig. 3.2. Particle trajectory of multi-layered multi-staged porous plate($d_p=0.1 \mu\text{m}$).	51
Fig. 3.3. Particle trajectory	
of multi-layered multi-staged porous $plate(d_p=10 \mu\text{m})$	51
Fig. 4.1. Schematic diagram of experimental apparatus.	52
Fig. 4.2. Schematic diagram of electrostatic multi-staged	
multi-layered impaction system.	53
Fig. 4.3. Configuration of inlet porous plate.	55
Fig. 4.4. Configuration and arrangement of porous plate.	56
Fig. 4.5. Front and side view of 1 stage.	56
Fig. 4.6. Front and side view of 2 stage.	57
Fig. 4.7. Shape of discharge electrode.	58
Fig. 4.8. Size distribution of dust.	60
Fig. 4.9. pressure drop with stage number and inlet velocity	
(tube diameter = 12mm).	65
Fig. 4.10. pressure drop with stage number and inlet velocity	
(tube diameter = 10mm).	66
Fig. 4.11. Comparison of pressure drop	
with inlet porous plate (tube diameter 12mm).	67
Fig. 4.12. Comparison of pressure drop	
with inlet porous plate (tube diameter 10mm).	68
Fig. 4.13. Characteristics of voltage-current with inlet porous plate	
$(v_{in}=3.46 \text{ m/s}, \text{ wire discharge electrode}).$	69
Fig. 4.14. Characteristics of voltage-current with shape of discharge electrode.	
$(v_{in}=3.46 \text{ m/s, with inlet porous plate})$	70
Fig. 4.15. Characteristics of voltage-current with inlet velocity.	
(wire discharge electrode, with inlet porous plate)	72
Fig. 4.16. Characteristics of voltage-current with inlet velocity.	
(screwed discharge electrode, with inlet porous plate)	72
Fig. 4.17. Characteristics of voltage-current with inlet velocity.	
(sharp edge discharge electrode, with inlet porous plate)	73

Fig. 4.18.	Characteristics of voltage-current with dust supply	
	(wire discharge electrode, v_{in} =3.46 m/s, inlet porous plate)	74
Fig. 4.19.	Characteristics of voltage-current with dust supply	
	(screwed discharge electrode, v_{in} =3.46 m/s, inlet porous plate)	75
Fig. 4.20.	Characteristics of voltage-current with dust supply	
	(tube diameter = 12mm, inlet concentration $3g/m^3$).	76
Fig. 4.21.	Collection efficiency with inlet velocity and stage number	
	(tube diameter = 12 mm, inlet concentration $3g/m^3$).	77
Fig. 4.22.	Collection efficiency with inlet velocity and stage number	
	(tube diameter = 10mm, inlet concentration $3g/m^3$).	78
Fig. 4.23.	Collection efficiency with inlet velocity and inlet porous plate	
	(tube diameter = 12 mm, inlet concentration $3g/m^3$).	80
Fig. 4.24.	Collection efficiency with inlet velocity and inlet porous plate	
	(tube diameter = 10mm, inlet concentration $3g/m^3$)	81
Fig. 4.25.	Comparison of collection efficiency with inlet velocity and shape	
	of discharge electrode.(5 stage, tube diameter 12 mm,	
	applied voltage 30 kV, inlet dust concentration 3 g/m ³).	82
Fig. 4.26.	Collection efficiency with inlet velocity and applied voltage.	
	(sharp edge discharge electrode, inlet concentration 3 g/m^3)	83
Fig. 4.27.	Collection efficiency with inlet velocity and applied voltage.	
	(sharp edge discharge electrode, inlet concentration 3 g/m^3)	84
Fig. 4.28.	Comparison of collection efficiency with inlet velocity and	
	inlet porous plate. (sharp edge discharge electrode,	
	tube diameter 12mm, inlet concentration 3 g/m^3)	85
Fig. 4.29.	Comparison of collection efficiency with inlet velocity and	
	inlet porous plate. (sharp edge discharge electrode,	
	tube diameter 10mm, inlet concentration 3 g/m^3)	86
Fig. 4.30.	Discharge electrode position.	87

Fig. 4.31. Comparison of collection efficiency with applied voltage
and discharge electrode position. (5 stage with inlet porous plate,
sharp edge electrode, tube diameter=12mm, 5 stage, inlet
velocity 3.46 m/s, inlet concentration 3 g/m ³) 88
Fig. 4.32. Schematic diagram of experimental apparatus for multi-staged
multi-layered impaction system of mixed dry and wet type. 92
Fig. 4.33. Schematic diagram of multi-staged
multi-layered impaction system of mixed dry and wet type 93
Fig. 4.34. Configuration of inlet porous plate. 94
Fig. 4.35. Configuration and arrangement of porous plate
Fig. 4.36. Front and side view of 1 stage
Fig. 4.37. Front and side view of 2 stage
Fig. 4.38. Front and side view of 3, 4, 5 stage
Fig. 4.39. Pressure drop with inlet velocity and stage number 10
Fig. 4.40. Comparison of pressure drop with water spray and inlet velocity
(5 stage, water spray = 300 mL/min)
Fig. 4.41. Collection efficiency with inlet velocity and stage number.
(inlet dust concentration =3 g/m^3)
Fig. 4.42. Collection efficiency with inlet velocity and inlet porous plate
(inlet dust concentration = 3 g/m^3). 10
Fig. 4.43. Collection efficiency with inlet velocity and water spray
(5 stage, inlet dust concentration =3 g/m^3)
Fig. 4.44. Comparison of collection efficiency with water spray
and inlet dust concentration(5 stage)
Fig. 4.45. Comparison of collection efficiency with water spray and inlet
concentration. (5 stage, inlet porous plate, $v_{in} = 3.46$ m/s)
Fig. 4.46. Comparison of collection efficiency with water spray and applied
voltage (5 stage, v_{in} = 3.46 m/s, inlet dust concentration = 3 g/m ³). 10
Fig. 4.47. SO ₂ removal efficiency with water spray (5 stage, v_{in} =2.76 m/s) 10

Fig. 4.48. SO ₂ removal efficiency with inlet velocity
(5 stage, water spray = 300 mL/min)
Fig. 4.49. SO ₂ removal efficiency with SO ₂ /NH ₄ OH mole ratio
(5 stage, NH ₄ OH(aq) spray = 300 mL/min, v_{in} =2.07 m/s)
Fig. 4.50. NO ₂ removal efficiency with inlet velocity
(5 stage, water spray = 300 mL/min)
Fig. 4.51. NO ₂ removal efficiency with NO ₂ /NH ₄ OH mole ratio
(5 stage, NH ₄ OH(aq) spray = 300 mL/min, v_{in} =2.07 m/s) 114
Fig. 5.1. Schematic diagram of experimental apparatus
Fig. 5.2. Sketch of 50 CMM (Top view). 121
Fig. 5.3. Sketch of 50 CMM (Side view). 122
Fig. 5.4. Drawing of inlet porous plate (Pilot scale, 50CMM) 123
Fig. 5.5. Drawing of porous plate (50 CMM, 1 stage)
Fig. 5.6. Drawing of porous plate (50 CMM, 2 stage)
Fig. 5.7. Drawing of porous plate (50 CMM, 3 stage) 125
Fig. 5.8. Drawing of porous plate (50 CMM, 4 stage)
Fig. 5.9. Drawing of porous plate (50 CMM, 5 stage) 126
Fig. 5.10. Multi-staged multi-layered impaction system
of mixed dry and wet type (Pilot scale, 50 CMM) 127
Fig. 5.11. Discharge electrode (Pilot scale, 50CMM) 128
Fig. 5.12. Feeder (ROVO Feeder). 129
Fig. 5.13 Cateco Method 5 Sampling Train (CleanAir, USA) 129
Fig. 5.14. Particle distribution. 132
Fig. 5.15. Schematic diagram of experimental apparatus
Fig. 5.16. Drawing of real scale (Top view)
Fig. 5.17. Drawing of real scale (Side view)
Fig. 5.18. Drawing of real scale. 137
Fig. 5.19. Electrostatic multi-layered multi-staged impaction system
of mixed dry and wet type (Real scale, 800 CMM)

Fig.	5.20.	Drawing of Real scale porous plate (1 stage)
Fig.	5.21.	Drawing of Real scale porous plate (2 stage) 140
Fig.	5.22.	Drawing of Real scale porous plate (3 stage) 141
Fig.	5.23.	Drawing of Real scale porous plate (4 stage) 142
Fig.	5.24.	Drawing of Real scale porous plate (5 stage) 143
Fig.	5.25.	Drawing of Real scale porous plate (1 stage, arrangement) 144
Fig.	5.26.	Drawing of Real scale porous plate (2 stage, arrangement) 145
Fig.	5.27.	Drawing of Real scale porous plate (3 stage, arrangement) 146
Fig.	5.28.	Drawing of Real scale porous plate (4 stage, arrangement) 147
Fig.	5.29.	Drawing of Real scale porous plate (5 stage, arrangement) 148
Fig.	5.30.	Real scale porous plate (assembly). 149
Fig.	5.31.	Discharge electrode (Real scale, 800 CMM)
Fig.	5.32.	Electrostatic section (Real scale, 800 CMM)
Fig.	5.33.	Multi-layered multi-staged porous plate
		and water spray system (Real scale, 800 CMM) 152
Fig.	5.34.	Elctrostatic multi-layered multi-staged impaction system
		of mixed dry and wet type (Real scale, 800 CMM) 153

List of Table

Table. 2.1.	Diffusion coefficient according to particle size	30
Table. 3.1.	Values of turbulent coefficients.	48
Table. 4.1.	Inlet velocity and tube velocity with tube diameter	61
Table. 4.2.	Experimental conditions	61
Table. 4.3.	Inlet velocity and tube velocity with tube diameter	98
Table. 4.4.	Experimental conditions	98
Table. 5.1.	Collection efficiency (Pilot scale, 50 CMM)	131
Table. 5.2.	Particle distribution and collection efficiency (Pilot scale, 50C MM) \cdots	133
Table. 5.3.	Pressure drop (Real scale, 800 CMM)	156
Table. 5.4.	Velocity and flow rate (Real scale, 800 CMM)	157
Table. 5.5.	Relative humidity with water spray (Real scale, 800CMM)	157
Table. 5.6.	Collection efficiency (Real scale, 800 CMM)	161

Collection characteristics of electrostatic multi-layered multi-staged impaction system of mixed dry and wet type

Junhyeong Kwon

Department of Environmental Engineering, The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

The fine dust reduction policy was introduced recently and air environment criteria on PM 2.5 were applied from January 1, 2015. As such related regulation has been reinforced, which requires the development of low cost and high efficient dust collector. Among dry type dust collection systems, filter dust collector and electrostatic precipitator are widely used in the industrial field with its excellent dust collection performance. While the filter dust collector has excellent dust collection performance with stable high collection efficiency (over 99%). It has problem of discontinuity of operation by filter clogging and filter maintenance problem. Electrostatic precipitator can handle a exhaust gas without significant pressure drop and is very simple in terms of structure with easy maintenance and repair. But, it requires high initial installation cost. To obtain high collection efficiency (over 99%), it must ensure wide installation area, which results in the large size of device.

Existing scrubber include venturi scrubber, packed tower and spraying tower. Among them, venturi scrubber has high collection efficiency among cleaning dust collectors, it has high pressure drop compared with others (over 300 mmH₂O) and large cleansing solution is required that resulted in high operating cost. Generally, scrubber is not restricted much by temperature and humidity and It can handle particle and gas pollutants at the same time. But, it is highly possible for fine droplet to be discharged outside. To solve the problem, demister must be installed at outlet to minimize droplet discharge. But, when demister is installed, periodic replacement of demister is required because the pore of demister is closed by dust.

Firstly, as for dry type dust collection system, to overcome problem of the filter dust collector and electrostatic precipitator, this study attempted to develop electrostatic multi-layered multi-staged impaction system that is combined with electrostatic precipitator to the front part of multi-layered multi-staged porous plate of dry type which introduced black box and block hole concept to increase dust collection efficiency and to obtain more than 99% efficiency.

This study carried out experimental studies to interpret electrostatic multi-layered multi-staged porous plate system pressure drop, dust collection efficiency, voltage and current characteristics by physical variables such as inflow speed, number of stage, tube diameter, applied voltage and shape and location of discharge electrode. As a result, if voltage is not applied within flow rate 1.63 m³/min (tube velocity v_t = 15 m/s), tube diameter 12mm, it is 96.2%, and if applied voltage is 30 kV, it has 99.7% dust collection efficiency. Thus, it can keep within 5% of electric power dependency. And, it is determined to be a system for stable operation with suitable pressure drop (148 mm H₂O) and high collection efficiency (99.7%) without use of filter.

Secondly, to handle particle and gas pollutant at the same time, it is required to introduce wet type dust collection system. As mentioned above, existing wet scrubber such as venturi scrubber or packed tower had high pressure drop (300 mmH₂O) to obtain high collection efficiency and it needs to install demister to prevent fine droplet discharge. Accordingly, this study attempted to overcome the above problem by developing high collection efficiency electrostatic multi-layered multi-staged impaction system of mixed dry and wet type that does not need installation of demister. The system consists of electrostatic dust collecting part in the front and wet type electrostatic multi-layered multi-stage is

single layer and 2nd stage is multi-layer system included black box type and $3rd \sim 5th$ stage is the type where tube is inserted into black box to prevent discharge of droplet. To solve spray nozzle block problem in the inflow of dust of high concentration $(10g/m^3)$ into wet system and to solve short replacement cycle of spray droplet by high turbidity, electrostatic dust collection part is combined to the front of the system to introduce water spray system at the rear part of the system which is followed by maximum decrease of dust concentration introduced to multi-layered multi-staged impaction system. Dust not collected by dry type electrostatic dust collecting part in the front is collected by condensation by water spray, direct block and impaction effect.

The study attempted to develop and commercialize compact electrostatic multi-layered multi-staged impaction system of mixed dry and wet type that prevents fine droplet discharge from external device without installation of demister having suitable pressure drop (150 mmH₂O) and high efficiency (over 99%) while keeping simultaneous treatment of particle and gas pollutant. Through lab scale(1.63 m³/min) device, pressure drop, dust collection efficiency characteristics, current - voltage curve characteristics and NO₂ and SO₂ removal efficiency characteristics were interpreted by means of experiments based on physical variables. Based on the lab scale experiment result, Pilot. scale (50 CMM), Real. scale (800 CMM) dust collection system was designed and manufactured. With the system, pressure drop and dust collection efficiency were interpreted by physical variables such as flow rate, number of stage, water spray amount and applied voltage.

Real scale (800 m³/m) for simultaneous treatment of particle and gas pollutant can make zero discharge of droplet without installation of demister to prevent droplet discharge. And, it showed high collection efficiency (99.38%) of dust collection performance with low liquid/gas ratio (0.82 L/m³) at suitable pressure drop (125 mmH₂O). It is expected that this can be a basic model for commercialization of dust collection system in the industrial field.

- XII -

I.서 론

최근 들어 미세먼지 저감 정책이 추진되고 2015년 1월 1일부터 PM 2.5에 대한 대기환경기준이 적용되는 등 관련 법규가 강화되고 있는 실 정 (Jeon and Hwang, 2014) 이므로 각 산업체에서는 저비용·고효율의 집진장치 개발이 요구된다 (Kim and Yoa, 2007). 기존 건식 시스템의 집진장치 종류로는 중력침강장치, 원심력집진장치, 전기집진장치, 여과 집진장치 등이 있으며, 이 중 집진성능이 우수하여 실제 산업현장에서 광범위하게 사용되는 집진장치로는 여과 집진장치, 전기 집진장치를 들 수 있다 (Oglesby and Nichols, 1978; Lee, 1995). 여과 집진장치는 연소 및 폐기물 소각공정에서 배출되는 분진입자, 유해가스 및 중금속 등을 처리·제거하는데 효과적이며 안정적 고효율 (99% 이상)로 집진 성능이 매우 우수하다 (Ogawa, 1984; Bitez, 1993, Croom, 1994). 그러나 여과 집진장치의 낮은 여과속도에 의한 장치의 대형화와 필터의 막힘 현상 (결로현상 등)에 의한 운전의 불연속 및 필터 유지·관리의 문제점은 기 술적, 경제적 제고 측면에서 해결되어야 할 과제이며, 더욱이 고온의 배 출가스 처리 시 효과적인 금속섬유, 세라믹 필터 여과재를 사용할 경우 미세한 다공성으로 인해 압력손실 증대 (다공체 내부 폐쇄), 소요 동력 및 운전비용 증가 및 처리 유량 감소 등의 문제는 더욱 심각하게 대두되 며, 이를 보완하기 위한 기술개발이 매우 중요한 과제로 판단된다. 전기 집진장치는 압력의 현저한 손실 없이 대량의 배기를 처리할 수 있고 구 조적으로 매우 단순하여 유지 및 보수가 용이한 장점으로 인해 입자상 오염물을 제거하는 효과적인 장치로 널리 사용되고 있다 (White, 1963; Robinson, 1971; Oglesby and Nichols, 1978). 하지만 초기 설치비가 많 이 소요되며, 99% 이상의 고효율을 얻기 위해서는 넓은 집진면적을 확 보해야하므로 장치 규모가 커지는 단점이 있다 (Kohl and Meinders, 1993; Kim and Yoa, 2010; Bang, 2013). 또한 집진판에 쌓인 분진을 탈 진할 경우 재비산 현상이 일어나는 문제점을 지니고 있다 (Ahn at el., 2002).

습식 시스템의 세정 집진장치는 분진을 수반하는 가스를 미세액적에 의해 세정하여 입자 및 가스상 오염물을 동시 처리하는 장치로써 기존 세정 집진장치로는 벤튜리 스크러버, 충진탑, 분무탑 등이 있다. 이 중 벤튜리 스크러버는 세정 집진기 중 고효율의 장점을 지니지만, 압력손실 이 타 세정기에 비해 매우 높으며 (300 mmH₂O 이상) 세정액이 대량으 로 요구되어 운전비가 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다. 충진탑은 가스 흡착을 위해 장치 내에 충진된 충진제에 의해 압력손실이 매우 증 가됨에 따라 가스 통과 유속을 높이기 어려워 대유량 가스처리 시 장치 대형화의 문제점을 지니고 있다. 또한 충진제가 고가이므로 유지비가 많 이 소요되고 가스유속이 클 경우 flooding 상태가 되어 조작이 불가능하 다는 단점이 있다. 분무탑은 압력손실이 적고 구조가 간단하지만 미세한 입자제거에 불리하고 벤츄리 스크러버에 비해 집진효율이 낮다. 일반적 으로 세정 집진장치는 다른 집진장치에 비해 처리가스의 온도 및 습도에 큰 제한을 받지 않으며 물에 의한 세정이 가능하기 때문에 비산 분진 발 생을 억제시켜 효율을 향상시키는 작용을 한다. 하지만 오염물질 처리 시 분사되는 미세 액적의 장치 외부로의 배출 가능성이 크며, 이를 해결 하기 위해 장치 출구에 demister (일종의 filter)를 설치하여 액적의 배출 을 최소화하여야 한다. 그러나 demister 설치 시 미세액적과 함께 응집된 먼지 등에 의해 demister의 공극이 폐쇄되어 주기적으로 교체해주어야 하는 문제점이 발생한다 (Cho and Kim, 1990; Koo et al, 2006).

- 2 -

첫째, 건식 시스템의 경우 앞서 지적한 여과 집진장치, 전기 집진장치 의 문제점을 극복하기 위해 본 연구실에서는 선행연구로 필터의존도가 없는 건식 다단 다공성 플레이트 시스템을 개발하였다. 그러나 건식 다 단 다공성 플레이트는 지속적인 운용 시에 재비산에 의해 집진효율이 낮 아지는 한계를 보였다 (Fig. 2.15). 따라서 본 연구의 건식시스템은 재비 산에 의한 집진효율 감소를 줄이고 고효율을 얻기 위해 black box와 black hole의 개념을 도입한 건식 다층 다단 다공성 플레이트 시스템에 99%이상의 고효율을 얻기 위해 전단부에 전기 집진부를 결합한 전기 다 충 다단 임팩션 시스템을 연구·개발하고자 하였다. 전단에 결합된 전기 집진부는 기존의 100% 전기력에 의존되는 광폭 전기집진장치 구조와 달 리 전기집진부의 후미에, 즉 기류방향에 단층의 다공성 플레이트를 설치 하여 집진효율 측면에서 전기력 의존도 5% 이내로 유지되도록 하였으 며, 다공성 플레이트에 의해 난류 확산, 임팩션 효과 및 전기력 등에 의 해 분진을 포집함으로써 상대적으로 소형화된 시스템으로 고효율을 얻고 자 하였다. 시스템 전단의 전기 집진부에서 포집되지 못한 또는 전기집 진부에서 탈진 시 재비산되는 분진은 후단 건식 다층 다단 다공성 플레 이트 시스템에서 난류확산, 임팩션 효과 및 전기력 등에 의해 포집함으 로써 여과 집진장치의 문제점인 필터 사용 없이 적정 압력손실 (150 mmH2O 정도) 및 고효율 (99%이상)로 안정적인 운용이 가능한 시스템 을 구축하고자 하였다. 후단의 건식 다공성 플레이트 시스템은 다층 (복 ·층)의 다단 (5 stage)으로 이웃하는 stage의 튜브 및 블랙홀은 서로 지그 재그로 구성되며, 가속화된 높은 관성의 입자는 기류를 이탈하여 블랙박 스 내로 포집되어 재비산 문제를 해결할 수 있었다 (Fig. 2. 17).

본 연구에서는 전기 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 압력손실, 집진효율, 전압-전류 특성 등을 해석하기 위해 유입유속, stage 수, 튜브

- 3 -

직경, 인가전압 방전극 형상 및 위치 등의 물리적 변수에 따른 실험적 연구를 수행하였다.

둘째, 입자 및 가스상 오염물을 동시처리하기 위해 액적 분사시스템을 적용한 습식 시스템의 도입이 필요하다. 전술한 바와 같이 벤튜리 스크 러버, 충진탑 등의 기존 습식 집진장치는 고효율을 얻기 위해 높은 압력 손실 (250 mmH₂O)이 초래되며 미세 액적배출방지를 위한 demister 설 치의 문제점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 no demister의 고효 율 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템을 연구·개발하여 위 의 문제점을 극복하고자 하였다.

본 시스템은 전단부의 전기집진부와 후단부의 습식 다층 다단 시스템 으로 구성된다. 후단부의 1단은 단층, 2단은 블랙박스 형태의 복층 구조, 3~5단은 액적 배출을 방지하기 위해 tube가 블랙박스 내로 삽입된 형태 이며 블랙박스 내의 기류유출을 위해 out-flow hole을 적용한 새로운 복 층형태의 복합형 다공성 플레이트 구조를 나타낸다 (Fig. 2. 21). 습식 시 스템에 고농도 (10 g/m³ 내외) 분진 유입 시 분사노즐의 막힘 현상 및 분사액적의 높은 탁도에 의한 분사수의 짧은 교체주기 문제를 해결하기 위해 본 시스템의 전단부에 건식의 전기 집진부를 결합하여 시스템 후반 부의 물 분사 시스템을 도입한 복합형 다공성 플레이트 시스템에 유입되 는 분진농도를 최대한 감소시킬 수 있도록 하였다. 전단부의 건식 전기 집진부에서 1차적으로 포집되지 않은 분진 입자들은 물 분사에 따른 응 집, 직접 차단, 임팩션 효과 등에 의해 포집된다. 또한 탈진 시 전기집진 부에서 재비산 되는 분진은 후단의 결합된 습식 혼합형 전기 다층 다단

본 연구에서는 입자 및 가스상 오염물질 동시처리 등의 장점을 유지하 면서, 필터 교체, 장치의 대형화, 미세 액적의 장치외부로의 배출 등의

- 4 -

단점을 극복하고 적정한 압력손실 (150 mmH₂O 정도) 및 고효율 (99% 이상)의 컴팩트 (compact)형 no demister의 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 개발 및 상용화를 위한 연구를 하고자 하였다. 따 라서 Lab. scale (1.63 m³/min) 장치를 통해 실험변수에 따른 압력손실, 집진효율특성, 전류-전압 곡선 특성, NO₂ 및 SO₂ 제거효율 특성을 실험 적 연구를 통해 결과를 해석하였으며, 이에 따른 실험결과를 토대로 건· 습식 혼합형 Pilot. scale (50 m³/min), Real. scale (800 m³/min) 집진 시 스템을 설계·제작하여 유입유속, stage 수, 물 분사량, 인가전압 등의 물 리적 변수에 따른 압력손실, 집진효율특성 등을 해석하고자 실험적 연구 를 수행하였다.

입자 및 가스상 오염물의 동시 처리를 위한 처리용량 800 m³/min 규 모의 Real scale은 140 mmH₂O 정도의 적정 압력손실에 고효율 (99%이 상)의 집진 성능을 나타내었으며, 이는 실제 산업현장에 투입이 가능한 집진시스템으로 향후 상용화를 위한 기초 모델이 될 수 있을 것으로 판 단된다.

Ⅱ. 이론적 배경

2.1. 임팩션 시스템의 집진메커니즘

대기 중 0.001~100 µm 혹은 0.01~10 µm 범위의 입자 크기가 연구의 주된 관심대상이다. Aerosol을 포함하는 기체가 갑자기 기류의 흐름 방 향을 90°로 바뀔 때 관성력 (inertial force)을 무시할 수 있는 매우 작은 입자는 기류의 유선 (streamline)을 따라 흐른다. 반면, 질량이 아주 큰 입자는 관성력이 커서 기류의 흐름을 벗어나서 직선 운동을 하게 된다. 여기서 문제가 되는 중간 크기의 입자는 이들 양극단적인 운동 사이의 운동을 하게 된다. 이러한 유선 운동을 해석하기 위해서는 우선 충돌판 주변의 기류의 유선 패턴을 결정해야 한다. 흐름이 결정된 경우 즉, 흐름 의 속도와 방향이 장애물 주위의 모든 점에서 이미 알고 있는 것이라면 입자가 그 흐름장을 이동하는 실제 입자궤적 (trajectory)을 결정할 수 있다.

2.1.1. 입자의 충돌

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 중 의 대부분에 큰 입자들이 제거되는 메커니즘이고, 에어로졸의 포집뿐만 아니라 공기 정화에 있어서도 적용된다. 만일 속도장을 적절하게 결정한

- 6 -

다면 충돌 과정은 입자의 운동방정식을 이용하여 설명할 수 있다.



Fig. 2.1. Schematic diagram of collision theory.

Fig. 2.1과 같은 충돌의 간단한 모형을 고려하여 보자. 입자를 포함한 기류가 폭 W의 긴 hole을 통하여 속도 u로 이동하고, 거리 S만큼 떨어 진 위치에 방출 기류에 수직한 판이 위치한다. 이런 형태에서 hole을 떠 난 기류는 방향이 90° 변화하게 되며, 기류의 흐름과 함께 방향을 바꾸지 못한 입자는 표면에 충돌하게 되고, 충돌한 입자는 판의 표면에 부착되 며 hole로부터 방출되어 나오는 기류의 유선은 중심이 C인 1/4 원 형태 이고, S는 W/2와 같다고 가정한다. 점 B에서 입자는 접선 속도 v_{ω} =u 이 며, 식 (2.1)와 같은 각속도를 갖게 된다.

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{v_\omega^2}{r} \tau \tag{2.1}$$

dt시간동안 입자가 충돌판의 표면을 향해 이동한 거리는 다음과 같다.

$$d\phi = \frac{v_{\omega}^{2}}{r} sin\phi dt \tag{2.2}$$

여기서 φ는 B와 C를 연결한 선과 점 C를 통과하는 기류에 수직한 면 이 이루는 각이다 (Fig. 2.2). 기류는 hole로부터 표면에 평행하게 변하므 로 φ는 0°에서 90°로 변하며, 각의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.



Fig. 2.2. Velocity at the point B.

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

$$\varepsilon = \frac{\delta}{W/2} = \frac{2u\tau}{W} \tag{2.5}$$

하지만 실제 기류는 그 형태가 매우 복잡하고, hole의 Reynolds number에 따라 변하기 때문에 이러한 방법은 효율을 계산하는 매우 개 략적인 접근법이다 (Yoa, 2004).

2.1.2. Stokes number

Stokes number는 입자의 정지거리와 충돌판까지의 거리에 대한 비율 을 나타내는 무차원 매개변수로 다공성 플레이트의 특징을 잘 나타낼 수 있으며 다음 식으로 표현할 수 있다.

Stokes Number =
$$\frac{v_0 \tau}{S}$$
 (2.6)

여기서
$$au$$
 = 이완시간 (Relaxation time) v_0 = 유입유속 [cm/s]

Stokes Number =
$$\frac{\rho_p d_p^2 v_0 C_c}{18\mu S}$$
(2.7)

여기서 ρ_p = 입자의 밀도 [g/cm³] d_p = 입자의 직경 [10×10⁻⁴cm] C_c = 커닝햄 보정계수(Cunningham slip correction factor) μ = 가스의 점성계수 [g/cm-s] S = hole과 충돌판 과의 거리 [cm]

위 식에서 보는 바와 같이 Stokes number가 증가할수록 즉, 입자의 직 경 혹은 밀도가 크거나 유입유속이 빠를수록 입자는 기류의 유선을 따라 그 운동 방향을 변화시키기 어렵다. 또한 Stokes number로부터 절단입 경 (Cut-off diameter)은 쉽게 구할 수 있으며, 절단입경은 √*Stk*에 직 접 비례하므로 √*Stk*가 클수록 절단 입경은 커지고, 작을수록 절단 입 경은 작아진다.

2.2. 전기집진장치

2.2.1. 입자에 작용하는 힘

전기집진장치 내에서 입자에 작용하는 힘은 첫 번째, 정전기적인 인력 (Coulomb's force)으로 대전된 입자와 집진극과의 정전기적인 인력을 의 미하며 전기집진장치에서 주 포집메커니즘으로 작용한다. 두 번째, 전계 경도에 의한 힘으로 유전력은 하전 되지 않은 입자가 전계 내에서 유전 작용 (dielectric process)에 의해 전리되어 불평등 전계에서 받는 일종의 정전기적인 인력 (흡인력)으로, 분진을 방전극으로 운반하여 방전극의 비 대 원인이 된다. 방전극이 분진의 부착에 의해 비대해지는 것은 코로나 방전에 의하여 대전된 (+) 전하를 가진 입자가 전계에 의한 정전기적인 인력에 의하여 방전극에 부착하거나 방전극의 전계집중에 의한 흡입력 (gradient force) 에 의한 것인데, 일반적으로 후자의 영향이 더 큰 것으 로 알려져 있다. 세 번째로, 입자간의 흡입력으로 정전하량이 q_1, q_2 인 두 입자가 S만큼 떨어진 거리에서 위치하고 있을 때 두 입자에 작용하는 정전기적인 인력으로 식은 다음과 같이 주어진다.

 $F = D \frac{q_1 q_2}{S^2} \tag{2.8}$

여기서, D는 유전상수 (dielectric constant)로 진공인 경우 D=1이며, 공 기인 경우 D=1.006이다. 네 번째, 전기풍 (electric wind)에 의한 힘으로 방전극에서 코로나 방전에 의해 가스분자가 음으로 하전된 경우 가스분 자군은 정전기적인 인력에 의해 전장의 흐름을 따라 집진극 방향으로 이 동하게 되는데 이를 전기풍이라 하며 유속은 보통 0.5~2.5 m/s이다 (천 만영 등, 2010).

- 11 -

2.2.2. 전기집진장치의 집진원리

전하를 띤 분진입자와, 반대극성인 집진극의 정전기적인 인력 (Coulomb's force)에 의해 집진하는 것으로, 본 연구에서는 방전극을 음 극(-), 집진극을 양극(+)으로 하는 전기집진장치이다.

고압의 직류전압을 방전극과 집진극에 가하면 절연파괴로 방전극과 집 진극 사이에 일정한 방향의 불평등 전계가 형성된다. 전계의 강도는 방 전극에 가까울수록 크게 된다. 여기서, 전계란 전기의 힘이 미치는 범위, 즉 전기력이 작용하는 공간을 의미하며 전기장 (electric field)이라고도 한다. 두 전극을 일정 거리만큼 띠워 놓으면 두 전극 사이에 있는 공기 나 가스는 절연체 역할을 하지만 두 전극에 높은 전압을 걸어주면 전극 사이에 전기장이 강해져서 어느 이상의 전압에서는 전류가 흐르기 시작 한다. 이러한 현상을 절연파괴(dielectric breakdown)라 하며 이 때 방전 극과 집진극 사이를 흐르는 전류를 코로나 전류라 한다.



Fig. 2.3. Corona discharge (천만영 등, 2010).

불평등 전계에서 방전극 주변에 있는 가스분자가 전기적으로 파괴되어 방전극 주위에 푸른 섬광 (luminous glow)이 발생하는데, 이것을 코로나 방전 (전기방전의 일종)이라 한다 (Fig. 2.3).

집진극과 방전극 사이의 전압을 증가시키면 전계강도와 가스분자의 이 온화 현상은 증가하게 되는데 계속해서 전압을 증가시키면 불꽃방전 (spark over)이 발생하게 된다. 이것은 전극 사이의 공간 내에서 불꽃이 발생하는 것으로 불꽃방전이 일어나면 전기장의 세기는 약해지게 된다. 따라서 코로나 방전 시 방전극에 공급하는 전압은 불꽃방전으로 전기장 의 세기가 계속적으로 약해지지 않는 범위 내에서 충분한 불꽃방전이 일 어날 때까지 전압을 승압시키는 것이 이상적이다. 전기집진기의 최적가 동을 위한 불꽃방전 횟수는 분당 50~100회 정도인데, 이때 코로나 방전 을 위한 전기장의 세기가 가장 강하게 된다.



Fig. 2.4. Avalanche multiplication and ionization of the gas molecules (천만영 등, 2010).

코로나 방전은 Fig. 2.4와 같이 방전극 주위의 가스분자를 이온화시키 고 이때 가스 내에 존재하는 자유전자를 가속하게 된다. 이렇게 가속된 자유전자는 빠른 속도로 이동하면서 다른 가스분자에 충돌하게 되는데 이때 가스분자는 양이온으로 되면서 또 다른 자유전자를 방출하는 가스 분자의 이온화 (ionization)현상이 일어난다. 이것은 마치 핵분열이 일어 나듯이 아주 짧은 시간에 연쇄적으로 일어나는데 이러한 전리현상을 이 온증배과정 (Avalanche multiplication)이라 하며 전기장의 세기가 약해 져서 전기장 내에서 전자의 운동에너지가 가스분자를 이온화시킬 수 없 을 때까지 계속된다.

Avalanche 증배과정에서 생성된 자유전자는 전장 (electric field)을 따 라 집진극 쪽으로 이동하는 전자군의 흐름을 형성하게 되는데 이것이 코 로나 방전의 지배영역을 벗어나게 되면 자유전자의 속도는 감소하게 된 다. 전기장의 세기가 강해서 전자가 가스를 전리할 수 있는 전기장의 범 위를 전리영역이라 하는데, 전기장의 세기는 집진극으로 갈수록 약해지 게 된다. 따라서 이 영역을 벗어나면 자유전자는 가스분자와 충돌해도 가스분자를 이온화시키지 못하고 전장을 따라 집진극 쪽으로 이동하다가 가스분자 표면에 흡착되어 가스분자를 음으로 하전 되게 된다 (Fig. 2.5).



Fig. 2.5. Negatively charged molecules of the gas.

음전하를 띤 가스분자는 정전기적인 인력에 의해 전기장을 따라 집진 극으로 이동하면서 극간영역 내에 있는 분진입자를 하전 (충전)시키게 된다. 여기에서 음으로 하전 된 가스분자군은 정전기적인 인력 (Coulomb's force)에 의해 양극(+)의 집진극 쪽으로 이동하면서 입자의 집진력으로 작용하는 전기풍이 발생하게 된다.

입자의 충전 메커니즘은 그 입경에 따라 두 가지로 분류되는데, 입자 의 직경이 1 µm 이상인 경우 음전하를 띤 가스분자가 전기장을 따라 이 동하면서 입자와 충돌하여 충전시키는 전계충전 (field charging)이 지배 적이고 0.3 µm 이하의 입자는 음전기를 띤 가스분자가 브라운 운동에 의해 입자에 부착되어 충전시키는 확산충전 (diffusion charging)이 지배 적이다. 입자의 직경이 0.3~1 µm의 입자는 두 가지 충전메커니즘에 의 해 충전이 일어나게 된다.

음이온의 전하를 띤 입자는 정전기적인 인력에 의해 집진극 쪽으로 이 동하여 집진극에 포착·제거된다. 반면에, 전리영역에서 자유전자가 가스 분자에 충돌하여 생성된 양이온은 방전극인 (-)극으로 이동하여 충돌· 흡수된다. 또한 그 일부는 입자와 충돌·흡착하여 입자를 양전하로 대전 시키고 이것은 정전기적 인력에 의하여 방전극에 부착된다. 집진극에 부 착된 분진입자는 탈진장치에 의해 분진 퇴적함으로 제거된다.



2.2.3. 전기장과 전류의 지배방정식

정상상태 조건에서 자기장의 영향을 무시할 경우, 전기장과 전류의 지 배방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

전기장 방정식

$$\nabla^{2}V = -\frac{\rho}{\varepsilon_{0}}$$
(2.9)
전류 방정식
$$\nabla \cdot j = \nabla \cdot (\rho b_{e}E) = 0$$
(2.10)
여기서, $V = 전기 포텐셜 [V]$
 $j = 전류 [A]$
 $\rho = 공간전하밀도 [coul/m^{3}]$
 $b_{e} = 전하 운반체 유효 이동도 [m^{2}/V-sec]$
 $\varepsilon_{0} = 진공에서의 유전율 [coul/N-m^{2}]$

2.2.4. 입자 하전량

입자하전은 unipolar, ionic-charging에서 입자하전은 입자 직경, 노출 시간 및 전기적 조건의 함수로 이루어진다 (Smith, W. B. and McDonald, J. R., 1976). 하전 식은 동력학 이론 개념을 기본으로 다루 었으며 입자와 이온 간의 충돌 가능성에서 하전률을 결정한다. 이 이론 은 장대전 (field charging)과 확산대전 (diffusion charging)을 동시에 계 산하고 확산하전에 전장이 미치는 영향을 계산한다. 이 이론에 따르면 하전률은 다음과 같이 계산된다 (Oglesby, S. 1978).

$$\frac{dq}{dt} = \frac{N_0 ebq_s}{4\varepsilon_0} (1 - \frac{q}{q_s})^2
+ \frac{\pi a^2 \tilde{v} N_0 e}{2} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \exp\left\{\frac{q_e(r_0 - a)}{4\pi\varepsilon_0 k T a r_0} + \frac{[3ar_0^2 - r_0^3(K + 2) + a^3(K - 1)]eE_0 \cos\theta}{k T r_0^2(K + 2)}\right\} \sin\theta d\theta
+ \frac{\pi a^2 \tilde{v} N_0 e}{2} exp(-\frac{qe}{4\pi\varepsilon_0 a k T})$$
(2.11)

여기서,
$$q_s = 4\pi\epsilon_0 E_0 a^2 (1+2\frac{K-1}{K+2})$$

 $\theta_0 = accross(q/q_s)$
 $q = 입자의 순간 하전량 [coul]$
 $q_s = 장대전에 의한 포화대전량 [coul]$
 $\theta = 입자중심을 원점으로 하는 구좌표계의 방위각[radians]$
 $\theta_0 = 입자로 유입되는 전력선의 최대 방위각 [radians]$

N₀ = 자유이온밀도 [m⁻³]
e = 전자 전하량 [coul]
e₀ = 진공에서의 유전율 [coul/V-m]
E₀ = 국간의 평균전계강도 [V/m]
b = 이온 이동도 [m²/V-sec]
ṽ = 이온의 평균 열적 속도 [m/s]
a = 입자 반경 [m]
k = 볼츠만 상수 [J/K]
T = 절대온도 [K]
t = 시간 [sec]
K = 입자의 유전상수
r₀=전체 전장의 반경요소가 0이 되는 θ방향의 반경거리[m]

이 이론은 입자가 크고 전계강도가 높은 경우 본질적으로 기존 장대전 하전식과 같은 하전률이 계산된다. 기존 하전 이론에서 장대전과 확산대 전의 합에 의한 하전량을 나타내는 식은 다음과 같다 (Oglesby, S. 1978)

$$\begin{split} q &= q_D + q_F \\ &= \bigg(\frac{4\pi\varepsilon_0 akT}{e}\bigg) \mathrm{ln} \bigg[\bigg(\frac{e^2 a\tilde{v} N_0}{4\varepsilon_0 kT} \bigg) (t_f - t_i) + \exp\bigg(\frac{q_i e}{4\pi\varepsilon_0 akT}\bigg) \bigg] \\ &+ q_s \Bigg[\frac{\bigg(\frac{N_0 be}{4\varepsilon_0} \bigg) (t_f - t_i) + \frac{1}{(1 - q_i/q_s)} - 1}{\bigg(\frac{N_0 be}{4\varepsilon_0} \bigg) (t_f - t_i) + \frac{1}{(1 - q_i/q_s)}} \bigg] \end{split}$$

(2.12)

여기서, q_D = 확산대전 이론에 따른 하전량 [coul] q_F = 장대전 이론에 따른 하전량 [coul] t_i = 고정된 조건에서의 초기 하전시간 [sec] t_f = 고정된 조건에서의 최종 하전시간 [sec] q_i = t_i 에서의 하전량 [coul]

원칙적으로 확산대전량과 장대전량의 합으로 구해지는 하전량에 의하 여 계산 되는 식 (2.11)은 입경 0.09~1.4µm 범위의 입자에 대한 적절한 하전량을 산출한다. 식 (2.11)에 사용된 q_D 와 q_F 는 집진기의 길이에 따라 N_0 와 E_0 가 변한다는 사실을 반영하고, 모델에서 각각의 단위계산구간 길 이에 걸쳐서만 고정적으로 남아있다고 가정한다.


2.2.5. 유효 이동도

전기장의 계산에 있어서 모든 전하 운반체의 운동은 유효 이동도 (effective mobility) 하나로 표현된다고 가정한다. 공기 중에서 입자의 존 재는 유효 이동도를 감소시킨다. 이온으로부터 전하를 획득하고 이온보 다는 움직임이 적은 입자가 전체 전류의 일부를 운반하기 때문이다. 측 정된 인가전압과 코로나 전류를 사용하여 전기적인 조건을 계산한다면 유효 이동도는 다음과 같이 결정된다 (Oglesby, 1970).

$$b_e = b' \left(\frac{j_t}{200j_p + j_t} \right)$$

(2.13)

여기서, b_e = 이온과 입자의 유효 이동도 [m²/V-sec] b' = 유효 이동도 [m²/V-sec] j_t = 집진판에서의 총 전류밀도 [A/m²] j_p = 집진판에서의 입자의 전류밀도 [A/m²]

2.2.6. 입자 이동 속도

전기집진기 설계에 가장 최우선적으로 고려되어야 하는 데이터가 분진 의 이동속도이다. 분진의 이동속도는 분진의 입경, 가스 성분, 집진기 내 부의 전기장 분포 등의 여러 가지 변수에 의하여 좌우될 수 있으며, 정 확한 분진의 이동속도를 예측하기는 매우 어려운 일이다.

일반적으로 전기집진기 설계자들은 기존의 확보된 실험 데이터와 이론 이동속도를 근간으로 하여 계획하는 집진기 설계에 사용하고 있다. 이론 적인 분진의 이동속도는 다음과 같이 표현되며, 일반적으로 이론이동속 도는 실제의 유효이동속도 (effective migration velocity)의 4~5배 크기 를 가진다.

$$\omega_p = \frac{qE_pC}{3\pi d_p\mu}$$

(2.14)

여기서, $ω_p$ = 집진판 근방에서의 반경 a인 입자의 이동속도 [m/s] q = 입자 하전량 [coul) E_p = 집진판 근방의 전계강도 [volt/m] d_p = 입자 직경 [m] μ = 가스 점도 [kg/m-s] C = 커닝햄 보정계수 또는 미끄럼 보정계수 = (1+A[']λ/a) $A^{'}$ = 10257+0.400exp(-1.10a/λ) λ = 가스 분자의 평균 자유 행로 [m] 실제적인 집진기의 성능을 좌우하는 분진의 이동속도는 집진기의 운전 조건에 대하여 실험효율 데이터로부터 결정할 수 있으며, 실험효율 데이 터로부터 분진의 이동속도의 결정은 일반적으로 다음과 같은 방법에 의 한다.

$$\omega = \omega_{avg} \left(\frac{SCA}{SCA_{avg}} \right)^n \tag{2.15}$$

여기서, ω_{avg} 와 *SCA*_{avg}는 각각의 실험조건에서 여러 개의 데이터 fitting에 의하여 결정되는 값이며, n은 경험지수이다.



2.2.7. 전기집진장치의 집진효율

코로나 방전에 의해 입자가 음전하를 띠게 되면 정전기적인 인력에 의 해 집진극 방향으로 이동하게 되는데 (이정주 등, 1996) 이 때 속도를 입 자의 분리속도 또는 이동속도 (migration velocity, W_e)라고 한다. 입자의 분리속도는 입자에 작용하는 힘에 의해 결정되는데 이러한 힘으로는 Fig. 2.7과 같이 전기적인 힘 F_e 와 기체분자에 의한 입자의 마찰저항력 F_d 가 있다.



Fig. 2.7. Force acting on the particle.

여기서, 전기적인 힘 F_e 는 입자의 전하량 q와 전기장의 세기 (전장의 세기 또는 전계장도) E의 곱으로 정의된다. 따라서 집진극에서 입자에 작용하는 F_e 는 집진극에서 전기장의 세기를 E_e 라 하면 식(2.15)로 주어진 다. 그리고 층류영역에서 기체분자에 의한 입자의 마찰저항력 F_d 는 식 (2.15)과 같다.

$$F_e = qE_c \tag{2.16}$$

$$F_d = 3\pi\mu_g d_p w_e \tag{2.17}$$

집진장치 내 입자의 이동속도는 다음과 같이 입자에 작용하는 힘의 평 형 식으로부터 유도할 수 있다.

$$F_e = F_d$$
 (2.18)

 $qE_c = 3\pi\mu_g d_p w_e$
 (2.19)

 위 식에서 입자의 이동속도 w_e 에 대해 정리하면 식(2.18)과 같다.

 $w_e = \frac{qE_c}{3\pi\mu_g d_p}$

 (2.20)

전기집진장치의 이론적인 집진효율 η는 여러 가지 식에 의해 산출된 다. 식(2.20)는 집진효율 산출 시 주로 사용되고 있는 Deutsch-Anderson Model (Deutsch, 1922 ; Andreson, 1919))으로 다음과 같은 가정을 기초 로 하였다.

① 난류·확산에 의해 입자는 어느 단면에 대해서도 균일하게 확산된다.

- ② 가스의 유속은 입자의 이동속도에 영향을 주지 않는다.
- ③ 재비산, 불균일 가스 분포 및 역코로나의 영향은 없다.
- ④ 입자는 상호 반발력을 무시할 수 있을 정도로 충분히 떨어져 있다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A_c w_e}{Q_i}\right) \tag{2.21}$$

여기서,
$$A_c$$
 = 집진판의 면적 $[m^2]$
 w_e = 입자의 이동속도 $[m/s]$
 Q_i = 유입 가스유량 $[m^3/s]$

다음 식은 Matts-Ohnfeldt Model (Matts S. & öhnfeldt, 1964)로 분진 의 입경분포를 고려하여 Deutsch Model을 수정한 경험식이다.

$$\eta = 1 - \exp\left(-SCA \cdot \omega_k\right)^k$$

여기서 일반적으로 석탄 보일러의 경우 k = 0.5의 값을 택하며 실험값 과 잘 일치하는 것으로 알려져 있으며, k = 1 일 경우 Deutsch Model의 식과 일치한다.

2.3. 세정집진장치

세정집진장치는 세정액을 분사하거나 함진 가스를 분사시켜 이때 생성 된 액적, 액막, 기포 등에 의해서 함진 가스 중의 미립자를 분리 포집 하 는 장치이다. 이 세정집진장치에 작용하는 힘은 관성력, 차단, 확산력, 응 집력, 중력 등이 이용되고 관성력과 중력은 입경이 클수록 크며, 확산력 과 응집력은 입경이 작을수록 큰 집진작용력을 발휘한다.

세정집진장치는 미세한 먼지를 50~500µm 의 액적과 접촉 또는 분산 시켜서 이들의 액적에 접촉됨으로써 원심력 및 중력으로 함진 가스 중에 먼지를 분리하게 된다. 이때 액적과 먼지의 접촉은 관성충돌, 직접흡수와 확산으로 이루어진다.

2.3.1. 직접 차단 (Interception)

분진입자의 질량 (관성력)보다는 분진입자의 크기에 좌우되는데 분진 입자가 기류를 따라 액적 주위를 흘러갈 때, 액적의 표면과 분진입자와 의 거리가 분진입자 직경의 1/2 정도가 되면 직접 차단이 일어난다.



Fig. 2.8. Direct interception.

- 27 -

2.3.2. 관성충돌 (Inertial impaction)

세정집진에서는 생성된 물방울 (droplet), 액막 (liquid film)과 먼지와의 접촉에 의해 분리가 행해지지만 먼지 입경이 1µm 이상의 경우는 관성충 돌이 가장 지배적인 집진작용이다.

세정집진장치에서 실제 액적에 충돌한 먼지입자의 총수와 액적에 충돌 가능한 먼지 입자 총수의 비를 충돌에 의한 집진효율 (η_I)이라 하며 다음 식 (2.21)로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{I} \!=\! \frac{cleared area}{frontal area} \!=\! \left(\frac{d_{p}}{d_{w}} \right)^{\!\!2}$$

(2.22)

따라서 먼지의 입경이 커지면 운동량이 커져 높은 관성력을 나타내 유 선으로부터 이탈해 장해물에 충돌 (impaction)하기 때문에 액적분사면적 중에 청정면적이 넓어져 타격효율 (target efficiency)은 좋아진다. 반면 입경이 작아지면 관성력이 상대적으로 작아져 유선과 함께 발산됨으로 타격효율이 낮아진다. 그리고 관성충돌인 면에서 본다면 먼지의 입경 및 밀도, 가스와 물방울과의 상대속도는 클수록, 함진 가스의 점도 및 물방 울지름이 작을수록 집진효율은 높아진다.



Fig. 2.9. Inertial impaction.

- 28 -

2.3.3. 확산작용(Diffusion)

함진 가스 중의 먼지입자농도에 차이가 있으면 입자는 고농도영역에서 저농도 영역으로 확산 이동하여 입자농도를 균일화하려고 하는 성질이 있다. 입자가 브라운 운동을 하는 정도가 아주 적게 되면 이 확산작용에 의해 입자는 물방울표면에 접촉 부착하면서 분리된다. 특히 0.1 µm 이하 의 미세입자의 분리 시 이용되는 작용은 확산작용에 의한 부착이 지배적 이다.

입경 0.5 μm 이하인 입자는 기체분자와 충돌해 유선과 관계없이, 브라 운운동을 불규칙하게 하다가 최후에는 액적에 충돌되어 분리된다. 이때 미세입자의 브라운 운동에 의한 집진효율은 PECLET 변수 (*P_e*)로 나타 내고 확산에 의한 집진효율 (η_d)은 다음식과 같다.

$$P_e = \frac{3 \pi \mu \ V \ d_p \ d_w}{C_f \ K_b \ T}$$
$$\eta_d = f \left(\frac{1}{P_e}\right)$$

(2.23)

(2.24)

d_w : 액적지름 *d_p* : 입자지름 *C_f* : 커닝햄 계수 *K_b* : 볼츠만 계수 *T* : 함진가스의 온도 따라서 함진가스의 온도가 높으면 가스분자의 운동이 격렬해서 물방울 과의 충돌횟수가 많아지고 운동이 증가되기 때문에 확산에 의한 먼지 포 집율은 온도가 높으면 *P_e*는 작아지나 확산에 의한 포집율 (η_d)은 커지게 된다.

확산에 의한 입자의 부착속도는 입자의 확산계수에 비례하고, 이 계수 는 입자지름이 작을수록 크고, 입자의 물방울에 대한 부착량도 많아진다. Table. 2.1과 같이 입자의 확산계수는 입경이 작을수록 증대되는 것으로 나타나며 확산에 의한 부착량은 또한 확산계수 외에 입자농도에 비례하 고, 함진가스의 점도 및 물방울과의 상대속도에 반비례한다.

Particle size d_p (µm)	Diffusion coefficient D(cm³/sec)
0.5	6.4×10^{-7}
0.1	$6.5 imes 10^{-6}$
0.01	4.4×10^{-4}
0.001	4.1×10^{-2}
SO ₂ 분자	11.8×10^{-2}

Tabel. 2.1. Diffusion coefficient according to particle size (Parker C., 1995)



Fig. 2.10. Diffusion.

2.3.4. 응집작용

함진가스를 세정하면 함진 가스 온도는 거의 물노점에 도달하기 때문 에 먼지표면은 응축수로 덮여지는 형태로 되어져 응집이 효과적으로 된 다. 따라서 세정 집진 시 함진 가스 온도를 될 수 있는 대로 낮게 하고, 함진 가스를 중습한 상태에서 처리하면 높은 집진율을 얻기 위한 유효한 수단이 된다. 미세입자는 물방울과 함께 형성되는 유선에 의해 이동하면 서 분리되는데 물방울과 미세 입자의 중심과 거리보다 짧게 되면 입자는 물방울과 직접 충돌되어 집진되어진다.

유수식에서는 함진 가스 속도가 클수록 엷은 액막이 다량으로 형성되 어 제진율도 높아지지만 세정처리가스에 동반되는 미스트양이 많아지므 로 출구 측의 함진 가스속도는 될 수 있는 대로 느리게 하거나 출구 측 에 demister 즉, 미스트 분리장치를 설치하여 미스트의 배출을 억제하여 야 한다.

2.3.5. 침투도 (Penetration)

습식세정기의 설계를 위해 여러 가지 모델이 이용된다. 각 모델은 다 양한 기-액 접촉과정을 설명하고 있으며 특정 분진입경에 대한 침투도 (Penetration)예측을 기본으로 한다. 침투도 Pt_d 는 처리가스 중 채취되지 않는 특정 분진입경 d_p 의 분율로 정의된다. 침투도는 집진효율과 관계가 있다.



사실상, Pt_0 는 각 입경별 분진의 침투도에 입경별 중량분율을 곱한 총 합이다. 계산과정은 산업용 배출시설에서 배출되는 분진의 입경분포를 Fig. 2.11과 같이 대수정규 분포 (log-normal distribution)로 가정하여 단 순화 할 수 있다.



Fig. 2.11. Log-normal distribution.

다음은 살수장치의 설계계산을 설명하기 위하여 살수탑의 침투모델을 사용할 것이다. 기액접촉방법은 향류 (counter current), 동류 (co-current) 및 교차류 (cross-current) 등으로 분류할 수 있다. 살수탑 에서 1차적 분진 집진기전은 살수된 액적과의 관성충돌이다.

Calvert(1977)는 향류수직살수탑 (counter current vertical spray chamber)에서 분진의 침투도를 계산하기 위해 아래와 같은 식을 개발하였다.

$$Pt_d = \exp\left[-\frac{3 Q_L V_t Z \eta_d}{4 Q_G r_d (V_t - V_G)}\right] = \exp\left[-\frac{A_d V_t \eta_d}{Q_G}\right]$$
(2.27)

 Pt_d : 주어진 입경에 대한 침투도 (0~0.1)

 Q_L : 세정액 유량 $[m^3/s]$
 Q_G : 처리가스 유량 $[m^3/s]$
 V_G : 표면가스 속도 [cm/s]

V_t: 처리가스 속도 [cm/s]
A_d: 세정집진장치 내 모든 액적의 단면적 [cm²]
Z: 기액 접촉영역의 길이 [cm]
η_d: 단일 액적의 집진효율 (0~10)
r_d: 액적의 반경 [cm]

식 (2.25)에서 A_d는

$$A_{d} = \frac{3 Q_{L} Z}{4 r_{d} (V_{t} - V_{G})}$$
(2.28)
단일 액적의 효율은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\eta_{d} = \left[\frac{K_{p}}{(K_{p} + 0.7)}\right]^{2}$$
(2.29)

$$K_{p} : 충돌계수$$

 K_p 는 Calvert에 의해 정의되었다.

$$K_{p} = \frac{C_{c} \rho_{p} d_{p}^{2} V_{p}}{9 \mu d_{d}} = \frac{d_{a}^{2} V_{p} \rho_{w}}{9 \mu d_{d}}$$
(2.30)

C_c: 커닝햄 보정계수 [무차원]
 V_p: 입자속도 (액적과의 상대속도) [*cm/s*]

- 34 -

 ρ_p: 입자밀도 [g/cm³]

 ρ_w: 물의밀도 [g/cm³]

 d_p: 물리적 입자직경 [cm]

 d_a: 액적직경 [cm]

 d_a: 공기역학적 직경 [cm]

 μ: 가스점도 [poise]

수직 향류 살수탑에서 입자의 액적과의 상대속도가 액적의 종말침강속 도와 같다. 즉 $V_t = V_p$ 가 된다. 식 (2.25)는 살수된 액적의 크기가 일정 하고 종말속도에 즉시 도달한다는 가정을 기초로 한다. Calvert(1984)는 벽면효과와 부유액적의 손실을 보정하기 위해, 액/가스비(Q_L/Q_G) 에 0.2 를 곱해야 한다고 제안하였다.

식 (2.27)을 응용하여 살수탑을 설계할 때, 유입가스 중 처리입자의 입 경분포를 알아야 한다. 먼저 처리입자의 입경별로 침투도를 계산하고 다 음으로 총괄침투도 Pt_0 를 계산한다. 주어진 입경분포에 대하여, 최고 총 괄효율을 얻을 수 있는 최적 운영 변수가 존재한다.

Langmuir와 Blodgett (1946)는 액적의 집진효율 η_d 를 다음과 같은 무 차원식으로 발표하였다.

$$\eta_d = \frac{kV_p V_t}{g d_d} \tag{2.31}$$

k : 실험적 상수 g : 중력가속도 = 980 cm/s² V_n : 액적에 대한 입자의 상대속도 [cm/s]

 V_t : 입자의 종말속도 [cm/s]

d_d : 포집직경 or 액적의 직경 [*cm*]

식 (2.31)에 의하면, 액적의 크기가 작아질수록 집진효율은 증가한다. 그러나 Stairmand(1964)는 액적의 크기가 최적상태보다 작아지더라도 액 적의 처리효율은 증가하지 않음을 밝힌 바 있다. 아래의 Fig. 2.12는 밀 도 $2g/cm^3$ 인 입경별 분진에 대한 집진효율을 액적의 크기함수로 표현 한 것이다. 이 자료는 살수탑이 500~1000µm 범위의 액적크기에서 운영 되어야 함을 보여준다. 최적 액적크기는 존재한다. 왜냐하면, 크기가 매 우 작은 액적은 처리가스 속도까지 급속히 가속되기 때문에 액적에 대한 입자의 상대속도 V_p 의 값은 감소되고 반면 크기가 매우 큰 액적은 동일 질량에 대해 상대적으로 작은 표면적을 가지기 때문이다.



Fig. 2.12. Target efficiency of diameter of water droplet (Parker C., 1995).

교차류 살수탑의 경우 식 (2.27)을 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$Pt_{d} = \exp\left[-\frac{3 Q_{L} Z \eta_{d}}{4 Q_{G} r_{d}}\right] = \exp\left[-\frac{A_{d} V_{p} \eta_{d}}{Q_{G}}\right]$$
(2.32)

Calvert (1974)는 식 (2.27)와 (2.32)에 대한 해를 아래의 Fig. 2.13과 같 이 도식하였다. Fig. 2.13에서 집진효율이 50% 인 공기역학적 직경(d_{pc}) 은 변수로써 액적의 직경, 액/가스비, 살수탑의 높이로 표현할 수 있다. 살수탑이 기준높이 이하일 때, d_{pc} 가 매우 빠르게 증가하며, 침투도는 100%에 접근한다. Fig. 2.13은 표준 상태에 근접한 물과 공기에 대해서 만 유효하다.



(a) Performance cut diameter predictions for typical vertical countercurrent spray (b) Performance cut diameter predictions for trypical cross-current spray

Fig. 2. 13. Performance cut diameters predictions for typical vertical count-current spray and cross-current spray (Parker C., 1995).

2.4. 본 연구의 집진 시스템 및 메커니즘

2.4.1. 건식 시스템

2.4.1.1. 다단 다공성 플레이트 시스템

본 연구실에서 선행연구로 수행된 다단 다공성 플레이트 집진 시스템 은 분진을 포함한 가스가 플레이트의 hole을 통과하면서 빠른 속도의 분 사류를 형성하여 다음 단의 집진면을 향하게 되며, 이 때 일정한 관성력 이상의 입자는 집진면에 충돌하여 퇴적된다. 충돌되지 않은 입자는 유선 을 따라 다음 단으로 움직이게 되며, 일부 미세 입자는 플레이트 사이에 형성된 재순환 유동에 의한 난류 확산에 의해 플레이트의 후면에 부착· 집진 된다. 이러한 다공성 플레이트를 다단으로 (2단 이상) 배열하여, 반 복되는 관성 및 난류 확산 효과의 결합에 의해 집진된다 (Yoa, 2004). 하 지만 다단 다공성 플레이트 시스템은 집진면에 충돌하여 포집된 입자가 다음 단으로 움직이는 유선을 따라 재비산 되어 집진효율을 떨어뜨려 안 정적인 고효율을 얻을 수 없는 문제점을 지니고 있다.



Fig. 2.14. Multi-staged porous plate system.



Fig. 2.15. Collection mechanism of multi-staged porous plate system.

2.4.1.2. 전기 다층 다단 임팩션 시스템

Fig. 2.16은 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 개념도이다. 본 시스템은 전단부에 전기 집진부, 후단부는 건식 다층 다단 다공성 플레이트 시스템으로 구성되어 있다.



impaction system (side view).

(가) 다층 다단 다공성 플레이트 시스템

다층 다단 다공성 플레이트 시스템은 전술한 다단 다공성 플레이트 시 스템의 문제점을 극복하고자 다층(복층)의 다공성 플레이트를 2단 이상 배열함으로써 분진을 함유한 가스가 tube를 통과하면서 높은 속도의 분 사류를 형성하여 다음 단의 집진면의 black hole을 향하게 되며, 이 때 높은 관성력의 분진은 기류를 이탈하여 플레이트의 black hole을 통해 black box 내에 포집된다. 포집되지 않은 입자는 기류를 따라 다음 단으 로 이동하게 되며, 일부 미세입자는 재순환 유동에 의한 난류 확산에 의 해 플레이트 후면에 포집되거나 일부 미세입자를 포함한 기류 일부를 블 랙박스 내로 재유입하여 난류 확산 및 전기력에 의해 추가적인 포집효과 를 줄 수 있도록 하고자 하였다.



Fig. 2.17. Collection mechanism of multi-layered multi-staged porous plate system.

(나) 전기집진부 (전단부)

Fig. 2.18은 전기집진부에서 분진이 포집되는 메커니즘을 나타낸다. 입 자상 물질이 전기력에 의해 기류의 이동방향과 수직한 방향에 설치된 집 진판으로 이동해서 집진되고, 집진되지 못하고 빠져나간 분진 중 일부는 전기집진부 후미에 설치된 스틸 재질의 다공성 플레이트에 난류 확산, 전기력, 임팩션 효과에 의해 포집되게 되며 유입부 다공성 플레이트 설 치로 인해 전기집진부에서 기류의 체류시간이 길어져 전기력에 의해 집 진효율은 상승한다. 또한 inertia에 의해서만 집진 될 수 없는 입자는 전 기력과 inertia가 함께 작용함으로써 집진이 가능하게 된다.



Fig. 2.18. Collection mechanism of electrostatic section.

2.4.2. 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템

다층 다단 다공성 플레이트 시스템에서 tube 통과유속이 높을 때 미세 분진 및 액적은 black hole을 통과하지 못하고 기류를 따라 이동해 장치 밖으로 배출되는 문제점이 발생했다. 따라서 건식 다층 다단 다공성 플 레이트 시스템과 달리 2 stage의 tube를 3 stage에 삽입하였으며 삽입된 tube의 끝부분에 응결된 액적이 다음 단으로 유출되지 않게 물 칸막이를 설치하는 형태로 설계하였으며 4,5 stage도 동일한 방법으로 설계하였 다. Tube가 복층구조에 삼입됨으로써 tube 끝에서 플레이트까지의 거리 가 짧아져 임팩션에 의한 집진효율은 상승하게 된다. 기류는 기류통과 홀 (out-flow hole)로 빠져나와 tube를 통과해 다음 stage로 이동한다.



Fig. 2.19. Electrostatic multi-layered multi-staged impaction system of mixed dry and wet type (side view).

Fig. 2.20~2.21은 습식 다층 다단 임팩션 시스템에서 각 stage의 단일 모듈을 통해 기류에 부유된 미세 액적 및 분진이 블랙박스 내에 포집되 는 과정을 나타내는 그림이다. Fig.2.20은 1, 2 stage를 나타내는 그림으 로 이와 같은 형태는 물 분사를 할 경우 분진 및 액적을 포함한 기류가 튜브를 통해 가속화 될 때 관성력이 충분한 분진과 액적은 재비산 없이 블랙박스 내에 유입되어 포집될 수 있다. 그러나 액적간의 응집현상으로 입경이 매우 커진 액적은 튜브 하측 내부 벽면을 따라 흘러나오면서 중 력에 의해 침강하여 인근 튜브를 통해 다음 stage로 이동하면서 인근 튜 브를 통해 다음 stage로 이동하면서 최종 stage를 통해 장치외부로 유출 될 수 있다. 따라서 Fig 2.21과 같은 형태로 전단의 튜브가 후단의 블랙 박스 내로 삽입되고 튜브 윗부분에 out-flow hole을 위치함으로써 기류 가 다음 단으로 이동하도록 하고 튜브하단에 물 칸막이를 설치하여 액적 의 유출을 방지하였다.



Fig. 2.20. Collection mechanism of electrostatic multi-layered multi-staged porous plate system of mixed dry and wet type (1, 2 stage).



Fig. 2.21. Collection mechanism of electrostatic multi-layered multi-staged porous plate system of mixed dry and wet type (3, 4 and 5 stage).



Ⅲ. 수치 시뮬레이션

3.1. 유동분포 및 입자궤적 해석

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

3.1.1. 유동장 지배 방정식

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \tag{3.1}$$

관성 좌표계에서 *i* 방향에 대한 운동량 보존 방정식은 아래와 같이 기 술된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$
(3.2)

여기서, p는 정압, τ_{ij} 는 stress tensor, ρg_i 와 F_i 는 중력 및 외력이 다.

Stress tensor τ_{ij} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{ij} = \left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\delta_{ij}$$
(3.3)

본 연구에서는 다층 다단 다공성 플레이트 시스템 내부의 난류를 해석 하기 위하여 표준 k-ε 모델을 사용하였으며, 이 경우, 난류 에너지 *k*와 그것의 소산율 (ε)은 다음의 전달 방정식을 따른다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon$$
(3.4)

그리고,

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$
(3.5)

위 식에서 G_k는 평균 유속 구배에 의한 난류에너지의 생성을 나타내

며 다음과 같이 표현된다.

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$
(3.6)

난류 점성, μ_t는 k와 ε으로부터 구해진다.

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$
(3.7)

 C_{μ} , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_{k} 및 σ_{ϵ} 은 모델 상수들로서 계수 값으로는 격자 난 류 (grid turbulence) 및 채널 난류 등의 기초 실험 데이터에 의거해서 추천되고 있는 다음 Table 3.1의 값들을 사용하였다 (Launder B. E. and Spalding D. B. ; 1979).

Table 3.1. Values of turbulent coefficients

C_{μ}	$\mathcal{C}_{1arepsilon}$	$\mathcal{C}_{2arepsilon}$	σ _k	σε
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

3.1.2. 입자 운동 지배방정식

본 연구에서 분진입자의 거동을 입자 각각에 대하여 Newton의 운 동방정식을 적용하여 해석하는 Lagrangian 궤적 모델을 적용하였다. 입자의 운동을 기술하기 위해서는 입자에 작용하는 항력, 부력, 자기 력, 중력, 전기력 등 여러 가지 힘과 입자의 물성을 고려해야 하며 단 일 입자에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p + F_x$$
(3.8)

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

$$F_{D} = \frac{18\mu}{\rho_{p}d_{p}^{2}} \frac{C_{D}Re}{24}$$
(3.9)

여기서 u는 유체의 속도, up는 입자 속도, μ는 유체의 분자점성, ρp 는 입자의 밀도, dp는 입자의 직경이다. Re는 상대 Reynolds 수로서 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho D_p |u_p - u|}{\mu} \tag{3.10}$$

따라서 위 식으로부터 각각의 입자의 운동 궤적을 추적하여 집진면 에서 입자의 부착 정도를 판단할 수 있다.

- 49 -

3.2. 다층 다단 다공성 플레이트의 수치 시뮬레이션 결과

3.2.1. 유동 및 입자 궤적 해석

Fig. 3.1은 수치 시뮬레이션 대상인 다층 다단 다공성 플레이트의 속도장이다. 그림에서 가스는 duct를 통해 시스템이 유입되고, 1st stage에서 tube를 통과하면서 급격히 가속된다. tube를 통과한 유동 은 고속으로 2nd stage의 플레이트 black hole을 향하며, 벽면을 따라 진행하여 측면에 위치한 tube를 통해 다음 stage로 빠져나가며, 일부 는 벽면과의 반작용에 의해 1st stage 방향으로 역기류를 형성하여 재순환하는 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 유동 패턴은 다 음의 3~5 stage를 통과하면서 유사하게 반복된다.

Fig. 3.2와 3.3은 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 입자 들은 다음 stage들에서 일부분 집진 되며, 집진 되지 않은 입자들은 최종 stage를 통과해 배출되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3.2의 입경 10 µm 분진의 궤적은, 식 (2.1)에 따라 입경의 제곱에 비례하는 입자의 관성력 증가에 의해, 입자들은 주 유동으로부터 비교적 쉽게 분리되 어 2 stage에서 대부분이 집진되는 것을 볼 수 있다.



Fig. 3.1. Velocity vector plot of multi-layered multi-staged porous plate.



Fig. 3.2. Particle trajectory of multi-layered multi-staged porous plate ($d_p=0.1\mu m$).



Fig. 3.3. Particle trajectory of multi-layered multi-staged porous plate (d_p =10 µm).

Ⅳ. Lab scale 집진 시스템

4.1. 전기 다층 다단 임팩션 시스템

4.1.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치 구성을 살펴보면 흡입 송풍기, 분진 공 급장치, 전원 공급장치, 방전극, 전기 다층 다단 임팩션 시스템과 유입유 속 및 압력손실 등을 측정할 수 있는 계측시스템으로 이루어져 있다. 유 입유속의 경우 대기오염공정시험법에 의해 duct 중심부에서 0.707R 지점 의 유속을 열선 풍속계 (model 6162, Kanomax, accuracy ±3%)를 이용 해 측정하였으며, 압력손실의 경우 정압 측정 장비 (midi LOGGER GL800, GRAPHTEC, accuracy ±0.25%)를 이용해 측정했다. 집진효율의 경우 장치 입·출구에서 샘플링 한 뒤 중량법을 이용해 측정하였다 (Yoa and Kim, 2013).

Fig. 4.1은 전체 시스템 구성에 대한 모식도이다.



Fig. 4.1. Schematic diagram of experimental apparatus.



(b) A Top view of the system

Fig. 4.2. Schematic diagram of electrostatic multi-staged multi-layered impaction system.

Fig. 4.2는 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 모식도이다. 본 시스템은 전단부 (전기 집진부)와 본체로 구성되어 있는데 유입부의 크기는 135(W) × 170(H) × 200(L) mm로 음극 코로나 방전 적용을 위한 방전극 이 설치되어 있고 방전극은 고전압 인가장치와 연결되어 있다. 전단부 양쪽 측면에는 190x150 mm의 스틸 재질의 집진판이 설치되어 있으며 전단부 후미에 유입부 다공성 플레이트가 설치되어 있다. 본체의 경우 다층 다단 다공성 플레이트로 구성되어 있고, 본체의 맞은편에 380x190 mm의 스틸 재질의 집진판이 설치되어 있다. 전단부의 양측 집진판, 전 단부 후미의 다공성 플레이트, 본체 맞은편의 집진판, 그리고 본체는 접 지 (ground)되어 있다.



4.1.1.1. 플레이트의 구성

Fig. 4.3은 유입부 다공성 플레이트이다. 플레이트는 1 mm 두께의 스 틸 재질로 크기는 135×170 mm이다. Fig. 4.4는 본체 다층 다단 다공성 플레이트의 구성 및 배열이다. 좌측부터 1, 2, 3, 4, 5 stage의 다공성 플 레이트이며 1 stage는 단층, 2 stage는 복층, 3~5 stage는 복층구조로 black hole과 tube 위치가 교차되도록 구성하였다. 복층의 경우 tube를 통과한 분진이 black box내에 갇히게 되며 반복적인 기류의 방향전환으 로 집진하게 된다. 플레이트는 스틸 재질로 두께는 1 mm, 크기는 250×210 mm이다. Tube의 경우 외경 15 mm, 내경 12 mm, 외경 13mm, 내경 10mm을 가지는 두 가지 종류의 tube를 사용하였으며 재질은 steel 재질로 black hole의 직경은 15 mm, 13mm이다. Stage간 거리는 10 mm, 복층 (2~5 stage)의 경우 내부 간격은 20 mm로 tube직경에 관계 없이 동일하다.



Fig. 4.3. Configuration of inlet porous plate.



Fig. 4.4. Configuration and arrangement of porous plate.



Fig. 4.5. Front and side view of 1 stage.


Fig. 4.6. Front and side view of 2 stage.

Fig. 4.5~4.6의 경우 1~2 stage의 정면도와, 측면도이다. 1 stage의 경 우 tube의 길이는 11 mm이며 플레이트를 기준으로 앞으로 3 mm, 뒤로 7 mm만큼 나와 있다. 2 stage의 경우 tube의 길이는 32 mm이며 앞으로 4 mm, 뒤로 7 mm만큼 나와 있다. 3~5 stage의 형태는 tube가 지그재 그로 배치되어 있으며 tube간의 간격 및 길이는 2 stage와 동일하게 설 계되었다.

4.1.1.2 방전극의 종류

방전국은 초기 설치비와 집진효율을 고려하여, 원형봉, 비틀린 사각형 태의 봉, 가시철심봉, 판형 등 여러 가지 형태가 사용되고 있다 (Lee and Kim, 1997). 본 연구에서 사용된 방전국은 직경 1 mm, 길이 140 mm인 wire 방전국 (Fig. 4.7 - a), 나사형태의 직경 5 mm, 길이 140 mm인 screwed 방전국 (Fig. 4.7 - b), 가로 2 mm, 두께 1 mm, 길이 165 mm에 가장자리가 뾰족한(가로 6 mm) sharp edge 방전국 (Fig. 4.7 - c)으로 총 3가지 종류의 방전국을 사용하였다.



Fig. 4.7. Shape of discharge electrode.

4.1.1.3. 분진 공급장치

일정량의 분진을 집진기 내로 주입하기 위한 분진 공급장치는 feeding screw와 전압 조절장치로 이루어져 있다. 분진은 hopper의 하부에 위치 한 screw의 일정한 회전에 의해 hopper 밖으로 나와 옆에 부착되어 있 는 원형관으로 유입되고, 원형관에 압축공기를 분사시키게 되면 압력구 배에 의해 분진이 기류 중으로 분산, 공급되어 진다. 전압 조절장치를 통 해 feeding screw의 회전속도를 조절하고 압축공기량을 제어함으로써 공 급되어지는 분진의 양을 조절하며, 이에 따라 원하는 유입농도로 맞춰 공급되어지는 분진의 양을 변화시킬 수 있도록 제작되었다.

4.1.1.4. 흡입송풍기

실험장치를 통과하는 기류는 실험장치의 후단에 설치되어 있는 흡입송 풍기 (Induced Draft Fan)에 의해 발생한다. 흡입송풍기는 5마력의 turbo-fan으로 흡입유량은 송풍기와 연결된 인버터 (inverter)로 회전수 를 변화시키며 조절하였다.

4.1.1.5. 고전압 인가장치

고전압 인가장치는 전기 집진부의 방전극에 고전압 (negative voltage) 을 인가하기 위한 장치로 정전압/정전류 공급장치 (-80 kV/20 mA, KSC, 한국)를 사용하였으며 인가전압에 따른 전류 값은 장치의 모니터에 출력 된다.

4.1.1.6. 실험용 분진

실험용 분진은 H 화력발전소에서 채취한 fly ash를 사용하였다. Fig. 4.8은 입도분포측정기 (Beckman Coulter LS 13 320)를 사용하여 분진의 입경분포를 측정한 것이다. 분진의 입경범위는 0.375~800 µm 범위를 가 지며 부피기준으로 79.60 µm의 평균입경을 나타냈다. 입경분포의 중간 값은 33.54 µm로 나타났는데, 이는 한국, 호주 등 12곳의 화력발전소의 전기집진기 등에서 포집된 입경 중간 값 범위 (14.7~47.2 µm)내 값이므 로 실험에 있어서 사용하기에 적절한 분진으로 사료된다 (Hong and Cho, 1996).



Fig. 4.8. Size distribution of dust.

4.1.2. 실험방법

 Table. 4.1은 다공성 플레이트의 tube를 통과하는 유속과 시스템 유입

 유속에 대한 표이다. 유입유속 (v_{in}=2.76, 3.46, 4.15 m/s)은 16개의 내경

 10 혹은 12 mm인 tube를 통과하는 유속 (v_t=12, 15, 18 m/s) 유속을 결

 정한 후, 이와 장치 전·후의 내경 100 mm인 관을 통과하는 유량이 같

 아질 때의 유속을 유입유속으로 사용한다.

Table 4.2는 본 실험에 대한 조건을 요약한 것이다.

Table 4.1. Inlet velocity and tube velocity with tube diameter

Tube diameter		Tube velocity	Flow rate		Inlet velocity	
(mm)		(m/s)	(m ³ /min)		(m/s)	
10	12	12	0.90	1.30	1.92	2.76
		15	1.13	1.63	2.40	3.46
		18	1.36	1.95	2.88	4.15

Table 4.2. Experimental conditions

Description	Condition		
Particle	fly ash		
Tube velocity (m/s)	12, 15, 18		
Tube diameter (mm)	10, 12		
Stage number	1, 2, 3, 4, 5, 1+5		
Shape of discharge electrode	wire, screwed, sharp edge		
Applied voltage (kV)	20, 30, 40		
Inlet concentration (g/m^3)	1, 3, 5		
Operating time (min)	4		

4.1.2.1. 압력손실 측정

전기 다층 다단 임팩션 시스템에서 각 stage에 걸쳐 발생하는 압력손 실은 시스템 특성을 평가하기 위해 집진효율과 더불어 설계의 중요한 인 자가 된다. 본 시스템에서 압력손실에 영향을 미치는 주요 변수로는 hole 통과유속(tube 통과유속), hole 끝에서 plate까지의 거리, plate간 거리 및 stage 수 등이 있다. 이들 변수의 조합에 따라 압력손실 특성이 변화될 수 있다 (Parker, 1995).

 $\Delta P = P_n - P_{n+1} = f(\rho v^2, d_1, d_2, etc.)$

(4.1)

여기서, P_n 및 P_{n+1} 은 각각 plate 전단부 및 후단부에서의 압력, ρ 는 가스의 밀도, v는 hole 통과유속, d_1 는 hole 끝에서 plate까지의 거리, d_2 는 plate간 거리를 의미한다.

본 연구에서는 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 압력손실 특성을 해석 하기 위해 stage 수, 유입부 다공성 플레이트 설치 유·무, hole 통과유 속, 튜브직경 등의 물리적 변수에 따른 실험적 연구를 수행하였다.

4.1.2.2. 집진효율 측정

본 시스템의 집진효율 특성을 알아보기 위하여 중량법을 이용했다. 장 치 입·출구에서 포집된 분진의 중량을 측정하고 다음 식에 의해 집진효 율을 계산한다.

$$\eta_t(\%) = \frac{m_{in} - m_{out}}{m_{in}} \times 100 \tag{4.2}$$

여기서, η_t 는 총괄집진효율 (%), m_{in} , m_{out} 은 입·출구에서 포집된 분 진의 중량(g)을 나타낸다 (Yoa and Jang, 2014). 본 시스템에서 집진효율 에 영향을 미치는 주요 변수로는 방전극에 인가하는 인가전압, 시스템 유속 (tube 통과유속), 본체 stage 수 등이 있으며, 집진효율에 작용하는 주 메커니즘은 관성력에 의한 임팩션 효과와 미세입자에 대한 난류 확 산, 집진판에 작용하는 전기력 등이 있다.

본 연구에서는 전기 다층 다단 임팩션 시스템에서 stage 수, 유입부 다 공판 유·무, 유입유속, 방전극 종류. 인가전압, 튜브직경에 따른 집진효 율을 측정하였다.

4.1.3. 결과 및 고찰

4.1.3.1. 압력손실 특성

(가) Stage 수, 유입유속 변화에 따른 압력손실 특성

본 시스템에서 각 stage에 걸쳐 발생하는 압력손실은 시스템 특성을 평 가하기 위해 집진효율과 더불어 시스템 설계의 중요 인자가 된다. 압력손실 에 영향을 미치는 주요 물리적 변수로 시스템 유입유속, 단 수, 튜브직경 및 플레이트 간의 간격 등을 들 수 있다. 압력손실은 식 (4, 1)에 의해 해석될 수 있으며 이들 변수에 따라 압력손실 특성이 변화될 수 있다.



(1) Tube 직경 12mm

Fig. 4.9는 tube 직경 12mm, 본체 1~5 stage에서 유입유속 v_{in} = 2.76,
3.46, 4.15 m/s (tube 통과유속 v_t = 12, 15, 18 m/s)에서 압력손실 측정값을 나타낸다. 단 수가 1에서 5까지 변화함에 따라 v_{in} = 2.76 m/s에서 12, 25,
40, 53, 66 mmH₂O, v_{in} = 3.46 m/s에서 19, 40, 63, 83, 103 mmH₂O v_{in} = 4.15 m/s에서 28, 58, 91, 120, 148 mmH₂O로 나타났다.



Fig. 4.9. pressure drop with stage number and inlet velocity (tube diameter = 12mm).

(2) Tube 직경 10mm

Fig. 4.10은 tube 직경 10mm, 본체 1~5 stage에서 유입유속 v_{in} = 1.92, 2.40, 2.88 m/s (튜브통과유속 v_t = 12, 15, 18 m/s)에서 압력손실 측정값 을 나타낸다. Stage 수가 1에서 5까지 변화함에 따라 v_{in} = 1.92 m/s에서 13, 27, 44, 54, 70 mmH₂O, v_{in} = 2.40 m/s에서 20, 42, 69, 86, 111 mmH₂O, v_{in} = 2.88 m/s에서 30, 61, 99, 124, 160 mmH₂O로 나타났다. stage 수 증가에 따라 유속 증가에 의한 압력손실 증가치는 더욱 커지는 데, 동일 stage에서 압력손실은 식 (4.1)에 의해 유속의 제곱에 비례해서 증가함을 알 수 있다.



Fig. 4.10. pressure drop with stage number and inlet velocity (tube diameter = 10mm).

(다) 본체 5 stage에서 유입유속 변화에 따른 압력손실 특성(유입부 다공성 플레이트 설치 시)

(1) Tube 직경 12mm

Fig. 4.11은 tube 직경 12 mm에서 유입부 다공성 플레이트의 유·무에 따른 압력손실 측정값을 나타낸다. 유입부 다공성 플레이트 없이 본체 stage 수가 5 stage인 경우 v_{in}=2.76, 3.46, 4.15 m/s일 때 66, 103, 148 mmH₂O의 압력손실을 나타냈고 5 stage의 본체에 유입부 다공성 플레이 트를 추가 설치한 경우 v_{in}=2.76, 3.46, 4.15 m/s일 때 91, 142, 204 mmH₂O의 압력손실을 나타냈다.



Fig. 4.11. Comparison of pressure drop with inlet porous plate (5stage, tube diameter 12mm).

(2) Tube 직경 10mm

Fig. 4.12는 tube 직경 10 mm에서 유입부 다공성 플레이트의 유·무에 따른 압력손실 측정값을 나타낸다. 유입부 다공성 플레이트 없이 본체 stage 수가 5 stage인 경우 v_{in}=1.92, 2.40, 2.80 m/s일 때 70, 111, 160 mmH₂O의 압력손실을 나타냈고 5 stage의 본체에 유입부 다공성 플레이 트를 추가 설치한 경우 v_{in}=1.92, 2.40, 2.80 m/s일 때 96, 150, 216 mmH₂O의 압력손실을 나타냈다.



Fig. 4.12. Comparison of pressure drop with and without inlet porous plate (5 stage, tube diameter 10mm).

4.1.3.2. 전압-전류곡선 특성

(가) 유입부 다공성 플레이트 설치 유・무에 따른 전압-전류 곡선

Fig. 4.13은 유입부 다공성 플레이트 설치 유·무에 따른 전압-전류 곡 선이다. v_{in} =3.46 m/s에서 유입부 다공성 플레이트가 없는 경우 코로나 방전이 시작되는 전압(방전 개시전압)은 11.6 kV이고 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.02, 0.10, 0.25 mA의 전류 값을 나타냈다. 유입부 다공성 플 레이트가 있는 경우 방전 개시전압은 10.5 kV이고 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.03, 0.11, 0.27 mA로 유입부 다공성 플레이트가 없는 경우에 비해 0.01~0.02 mA 높은 전류 값을 나타냈다. 또한 더 낮은 전압에서 코로나 방전이 시작됨을 알 수 있다. 유입부 다공성 플레이트를 설치함 에 따라 부분적으로 방전극에서 집진판까지 거리가 짧아져 전류 값이 증 가한 것으로 판단된다.



Fig. 4.13. Characteristics of voltage-current with inlet porous plate $(v_{in}=3.46 \text{ m/s}, \text{ wire discharge electrode}).$

(나) 방전극 형상에 따른 전압-전류 곡선

Fig. 4.14는 방전극 형상에 따른 전압-전류 곡선이다. 유입부 다공성 플레이트를 설치하고 v_{in} =3.46 m/s에서 측정하였다. Wire 방전극의 경우 방전 개시전압은 10.5 kV이며, 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.03, 0.11, 0.27 mA의 전류 값을 나타냈고 screwed 방전극의 경우 방전 개시전압은 16.0 kV이며, 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.01, 0.05, 0.15 mA로 wire 방 전극에 비해 낮은 전류 값을 나타냈다. 방전극의 두께가 얇을수록 같은 인가전압에서 더 높은 코로나 전류 값을 나타낸다 (Jae, 2008). Sharp edge 방전극의 경우 방전 개시전압은 12.0 kV로 나타났으며, 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.06, 0.18, 0.38 mA의 전류 값을 나타냈다. 동일한 인 가전압에서 sharp edge 방전극은 wire 방전극에 비해서 높은 전류 값을 나타냈고, 방전극의 날카로운 모서리가 집진판을 향하고 있기 때문에 동 일한 인가전압에서 높은 코로나 전류 값을 나타낸다 (Kim at el., 2001).



Fig. 4.14. Characteristics of voltage-current with shape of discharge electrode $(v_{in}=3.46 \text{ m/s}, \text{ with inlet porous plate}).$

(다) 유입유속에 따른 전압-전류 곡선

Fig. 4.15~4.17은 유입유속에 따른 전압-전류 곡선이다. 유입부 다공 성 플레이트를 설치하고 방전극 종류별로 유입유속의 변화에 따른 전압-전류 곡선을 측정하였다.

Wire 방전극의 경우 방전 개시전압은 유입유속에 상관없이 10.5 kV 이며, v_{in} =2.76 m/s에서 인가전압 20, 30, 40 kV일 때 0.03, 0.11, 0.27 mA의 전류 값을 나타냈다. v_{in} =3.46, 4.15 m/s에서도 20, 30, 40 kV로 전 압을 인가했을 때 0.03, 0.11, 0.27 mA로 v_{in} =2.76 m/s와 같은 전류 값을 나타냈다.

Screwed 방전극의 경우 방전 개시전압은 유입유속에 상관없이 16.0 kV이며, v_{in} =2.76, 3.46, 4.15 m/s에서 20, 30, 40 kV로 전압을 인가했을 때 유입유속에 상관없이 같은 전류 값인 0.01, 0.05, 0.15 mA를 나타냈다.

Sharp edge 방전극의 경우 방전 개시전압은 유입유속에 상관없이 11.5 kV이며, v_{in} =2.76, 3.46, 4.15 m/s에서 20, 30, 40 kV로 전압을 인가 했을 때 유입유속에 상관없이 같은 전류 값인 0.06, 0.18, 0.38 mA를 나 타냈다.

전류 값은 방전극에서 방출되는 전자가 집진판으로 이동하면서 측정 되는데, 음극 코로나 방전의 경우 유입유속에 비해 집진판으로 이동하는 전자의 이동속도가 매우 빠르기 때문에 방전극의 종류에 상관없이 유입 유속의 증가가 전자 이동의 방해요소로 작용하지 못하는 것으로 해석된 다.



Fig. 4.16. Characteristics of voltage-current with inlet velocity (screwed discharge electrode, with inlet porous plate).



(라) 분진공급 유·무에 따른 전압-전류 곡선

Fig. 4.18~4.20은 분진공급 유·무에 따른 전압-전류 곡선이다. 유입
부 다공성 플레이트를 설치하고 v_{in}=3.46 m/s에서 측정하였다. 방전극 종
류별로 분진공급 유·무에 따른 전압-전류 곡선을 측정하였다.

Wire 방전국의 경우 방전 개시전압은 분진공급 유·무에 관계없이 10.5 kV이며, 분진공급을 하지 않았을 경우, 인가전압 20, 30, 40 kV 일 때 0.05, 0.15, 0.32 mA의 전류 값을 나타냈고, 3 g/m³으로 분진공급을 할 경우, 인가전압 20, 30, 40 kV일 때 0.03, 0.11, 0.27 mA의 전류 값을 나타냈다.



Fig. 4.18. Characteristics of voltage-current with dust supply (wire discharge electrode, v_{in} =3.46 m/s, with inlet porous plate).

Screwed 방전극의 경우 방전 개시전압은 분진공급 유·무에 상관없이 16.0 kV이며, 분진공급을 하지 않았을 경우, 인가전압 20, 30, 40 kV일 때 0.02, 0.11, 0.24 mA의 전류 값을 나타냈고, 3 g/m³으로 분진공급을 할 경우, 인가전압 20, 30, 40 kV일 때 0.01, 0.05, 0.15mA의 전류 값을 나타냈다. 인가전압이 높아질수록 전류 값의 증가치는 0.01~0.09 mA로 높아짐을 알 수 있다. Wire 방전극에 비해 전류 값의 증가치는 더 높아 졌는데, 이는 screwed 방전극의 경우 wire 방전극에 비해 전계강도가 낮 기 때문에, 음극 코로나 방전으로 인해 하전된 분진들에 의한 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.



Fig. 4.19. Characteristics of voltage-current with dust supply (screwed discharge electrode, v_{in} =3.46 m/s, with inlet porous plate).

Sharp edge 방전극의 경우 개시전압은 유입유속에 상관없이 11.5 kV 이며, 분진공급을 하지 않았을 경우에 인가전압 20, 30, 40 kV일 때 0.06, 0.19, 0.39 mA의 전류 값을 나타냈고, 3 g/m³으로 분진공급을 할 경우에 인가전압 20, 30, 40 kV일 때 0.06, 0.18, 0.38 mA의 전류 값을 나타냈다. 분진공급의 유·무에 따라 0~0.01 mA정도로 거의 차이가 발생하지 않 았다. Wire, screwed 방전극과 달리 전류 값의 차이가 거의 없는데, 이는 sharp edge 방전극의 경우 wire 방전극에 비해 전계강도가 크기 때문에, 음극 코로나 방전으로 인해 하전 된 분진의 영향을 적게 받는 것으로 판 단된다.



Fig. 4.20. Characteristics of voltage-current with dust supply (sharp edge discharge electrode, v_{in} =3.46 m/s, with inlet porous plate).

4.1.3.3. 입자상 오염물질 집진효율 특성

(가) 본체 stage 수, 유입유속 변화에 따른 집진효율 특성

(1) Tube 직경 12mm

Fig. 4.21은 본체 stage 수, 유입유속의 변화에 따른 집진효율 특성을 나타낸다. 유입농도는 3 g/m^3 이다.

1 stage의 경우 v_{in} =2.76, 3.46, 4.15 m/s에서 집진효율은 78.0, 79.3, 80.1%, 2 stage의 경우 85.5, 87.1, 88.4%, 3 stage의 경우 88.7, 91.7, 93.0%로, 4 stage의 경우 91.9, 94.2, 95%, 5 stage의 경우 93.4, 95.6 96.2%의 효율을 나타냈다.



Fig. 4.21. Collection efficiency with inlet velocity and stage number (tube diameter = 12mm, inlet concentration 3g/m³).

(2) Tube 직경 10mm

Fig. 4.22는 본체 stage 수, 유입유속의 변화에 따른 집진효율 특성을 나타낸다. 유입농도 3 g/m³1 경우 1 stage, v_{in} =1.92, 2.40, 2.88 m/s에서 집진효율은 78.6, 80.2, 81.1%, 2 stage의 경우 86.4 88.2, 89.7%, 3 stage 의 경우 89.4, 92.3, 94.0%로, 4 stage의 경우 92.7, 95.1, 96.3%, 5 stage의 경우 94.2, 96.9, 97.4%의 효율을 나타냈다.



Fig. 4.22. Collection efficiency with inlet velocity and stage number (tube diameter = 10mm, inlet dust concentration 3g/m³).

Stage 수가 증가할수록 임팩션 효과 및 난류 재순환 유동에 의한 와류 확산 효과의 증대로 집진효율이 증가하며 stage 수 증가에 따른 집진효 율 증가구배는 후단으로 갈수록 낮아지는데 이는 입경이 큰 입자는 높은 관성력에 의해 전단에서 거의 집진되고 후단으로 갈수록 포집되지 않은 미세입자의 집진효율이 낮아지기 때문이다. 유입유속이 증가하면 식(2.6) 에 의해 Stokes number가 커지게 되며 이에 따라 집진효율이 증가한다. 또한 이러한 결과는 본 실험실에서 선행연구 되었던 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진효율과 비교하였을 때 다단 다공성 플레이트 는 tube 직경 10mm, tube 통과 유속 15 m/s에서 0.85 m³/min의 처 리유량, 115 mmH₂O의 압력손실, 92.3 %의 집진효율을 나타냈으며 본 장치는 동일 조건에서 1.13 m³/min의 처리유량, 111 mmH₂O의 압력손실, 96.9%의 집진효율로 4.6%의 집진효율 차를 나타냈으며 압 력손실과 처리유량 측면에서도 본 시스템이 우수한 것으로 나타났다. 이는 전술하였던 다층 다단 다단 다공성 플레이트 시스템의 문제점 인 재비산을 다층(복층)의 다공성 플레이트를 2단 이상 배열함으로써 분진을 함유한 가스가 tube를 통과하면서 높은 속도의 분사류를 형 성하여 다음 단의 집진면의 black hole을 향하게 되며, 이 때 높은 관성력의 분진은 기류를 이탈하여 플레이트의 black hole을 통해 black box 내에 포집하고 또한 일부 포집되지 않은 입자를 포함한 기류 일부를 블랙박스 내로 재유입하여 난류 확산에 의해 추가적인 포집효과 때문인 것으로 판단된다.

(나) 5 stage에서 유입유속에 따른 집진효율 특성(유입부 다공성 플레이트 설치 시)

Fig. 4.23~24는 유입부 다공성 플레이트 설치 시 5 stage, tube 직경 12mm, 유입농도 3 g/m^3 일 경우 유입유속의 변화에 따른 집진효율 특성 을 나타낸다.

(1) Tube 직경 12 mm

유입부 다공성 플레이트가 설치되지 않은 경우, 유입유속 v_{in} =2.76, 3.46, 4.15 m/s에서 93.4, 95.6 96.2% 유입부 다공성 플레이트 설치한 경 우 94.0, 96.4, 97.0% 집진효율을 나타냈다.



Fig. 4.23. Collection efficiency with inlet velocity and stage number (tube diameter = 12mm, inlet dust concentration 3g/m³).

(2) Tube 직경 10 mm

유입부 다공성 플레이트가 설치되지 않은 경우, 유입유속 v_{in} =1.92, 2.40, 2.88 m/s에서 94.2, 96.9, 97.4%의 효율을 나타냈다. 유입부 다공성 플레이트 설치한 경우 94.8, 97.5, 98.2%의 집진효율을 나타냈다.



Fig. 4.24. Collection efficiency with inlet velocity and stage number (tube diameter = 10mm, inlet dust concentration 3g/m³).

(다) 방전극 형상에 따른 집진효율 특성

Fig. 4.25는 본체 5 stage, tube 직경 12 mm, 유입농도 3 g/m³, 유입유 속 v_{in} = 3.46에서 방전극 형상, 인가전압에 따른 집진효율을 나타낸다. 인 가전압 20, 30 kV에서 wire 방전극의 경우 98.8, 99.5%의 효율을 나타냈 으며, screwed 방전극은 97.1, 98.5%의 효율로 wire 방전극에 비해 전반 적으로 낮은 효율을 나타냈다. 이는 인가전압 30 kV에서 wire 방전극에 비해 낮은 전류 값을 나타냈고, 전압인가의 유무에 따라 집진효율 상승 폭이 wire 방전극에 비해 상대적으로 적다. Sharp edge 방전극의 경우 98.9, 99.6%로 wire 방전극에 비해 높은 집진효율을 나타냈다.





with inlet velocity and shape of discharge electrode

(5 stage, applied voltage 30 kV, inlet dust concentration 3 g/m^3).

(라) 5 stage에서 인가전압, 유입유속 변화에 따른 집진효율 특성

Fig. 4.26~27은 본체 5 stage, 유입농도 3 g/m^3 , shape edge 방전극을 사용하였을 경우, 인가전압 및 유입유속 변화에 따른 집진효율 특성을 나타낸다.

(1) Tube 직경 12 mm

유입유속 v_t =2.76, 3.46, 4.15 m/s에서 전압인가를 하지 않은 경우 집진 효율은 93.4, 95.6 96.2%, 인가전압 20 kV의 경우 96.8, 98.3, 98.8%, 인가 전압 30 kV의 경우 98.0, 98.8, 99.2%로 나타났다.



Fig. 4.26. Collection efficiency with inlet velocity and applied voltage (sharp edge discharge electrode, inlet dust concentration 3 g/m^3).

(2) Tube 직경 10 mm

유입유속 v_t =1.92, 2.40, 2.88 m/s에서 전압인가를 하지 않은 경우 집진 효율은 94.2, 96.9, 97.4%, 인가전압 20 kV의 경우 97.7, 98.8, 99.3%, 인가 전압 30 kV의 경우 98.8, 99.2, 99.6%로 나타났다.





(마) 5 stage에서 전압인가 시 집진효율 특성

(유입부 다공성 플레이트 설치 시)

Fig. 4.28~29는 유입부 다공성 플레이트 설치 시 5 stage, 유입농도 3 g/m^3 , shape edge 방전극을 사용하였을 경우, 인가전압 변화에 따른 집 진효율 특성을 나타낸다.

(1) Tube 직경 12 mm

유입부 다공성 플레이트 설치 시, 유입유속 v_{in} =3.46 m/s, 인가전압 0, 20, 30 kV에서 96.4, 98.9, 99.6%의 집진효율을 나타냈다. 이는 유입부 다 공성 플레이트를 설치 않은 경우 95.6, 98.3, 98.8%의 집진효율보다 0.6~ 0.8%의 집진효율이 상승한 결과이다.



Fig. 4.28. Collection efficiency with applied voltage and inlet porous plate (sharp edge discharge electrode, v_{in} =3.46 m/s, inlet dust concentration 3 g/m³).

(2) Tube 직경 10mm

유입부 다공성 플레이트 설치 시, 유입유속 v_{in} =2.40 m/s, 인가전압 0, 20, 30 kV에서 97.5, 99.2, 99.6%의 집진효율을 나타냈다. 이는 유입부 다 공성 플레이트를 설치 않은 경우 96.9, 98.8, 99.2%의 집진효율보다 0.4~ 0.6%의 집진효율이 상승한 결과이다.



Fig. 4.29. Collection efficiency with applied voltage and inlet porous plate (sharp edge discharge electrode, $v_{in}=2.40$ m/s, inlet dust concentration 3 g/m³).

(바) 방전극 위치, 인가전압 변화에 따른 집진효율 특성(유입부 다공성 플레이트 설치)

유입부 다공성 플레이트 설치 시, 5 stage, tube 직경 12mm, sharp edge 방전극을 이용하여 v_{in} = 3.46 m/s 조건에서 Fig. 4.30과 같이 방전 극의 위치를 변경하며 집진효율을 측정하였다.



Fig. 4.30. Discharge electrode position.

(a)위치에 방전극이 위치하였을 때 인가전압 20, 30 kV에 따라 98.9,
99.6%, (b) 위치에 위치하였을 때 97.6, 98.5%, (a)+(b)위치에서 모두
방전극을 위치하였을 때 99.1, 99.7%의 집진효율을 나타냈다.





concentration 3 g/m^3).

4.1.4. 결 론

- 압력손실은 유입부 다공성 플레이트가 없는 경우 stage 수, 유입유속이 증가함에 따라 증가했다. tube 직경 12 mm, stage 수가 1에서 5까지 변 화함에 따라 v_{in} = 2.76 m/s에서 12, 25, 40, 53, 66 mmH₂O, v_{in} = 3.46 m/s에서 19, 40, 63, 83, 103 mmH₂O v_{in} = 4.15 m/s에서 28, 58, 91, 120, 148 mmH₂O로 나타났다.
- 2. 유입부 다공성 플레이트 설치 시 5 stage인 경우, tube 직경 12 mm, v_{in} =2.76, 3.46, 4.15 m/s일 때 66, 103, 148 mmH₂O의 압력손실을 나타냈고 tube 직경 10 mm, v_{in}=1.92, 2.40, 2.88 m/s일 때 91, 142, 204 mmH₂O의 압력손실을 나타냈다.
- 3. 5 stage, tube 직경 12 mm, v_{in}=3.46 m/s에서 유입부 다공성 플레이트 가 없는 경우 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.02, 0.10, 0.25 mA의 전류 값을 나타냈고, 유입부 다공성 플레이트 설치 시 0.03, 0.11, 0.27 mA로 유입부 다공성 플레이트가 없는 경우에 비해 0.01~0.02 mA 높은 전류 값을 나타냈다.
- 4. 방전극 형상에 따른 전압-전류 특성을 알아보기 위해 유입부 다공성 플 레이트를 설치하고, tube 직경 10mm, v_{in}=3.46 m/s에서 실험했다. Wire 방전극은 인가전압 20, 30, 40 kV에서 0.03, 0.11, 0.27 mA의 전류 값을 나타냈고 screwed 방전극은 0.01, 0.05, 0.15 mA, Sharp edge 방전극은 0.06, 0.18, 0.38 mA의 전류값을 나타냈다. 같은 인가전압에서 sharp

edge, wire, screwed 방전극 순으로 코로나 전류 값이 높다.

- 4. 유입부 다공성 플레이트 설치 시, 유입유속에 따른 전압-전류 특성은 Wire, screwed, sharp edge 방전극을 사용했을 때 전류 값은 유입유속 에 관계없이 인가전압에만 영향을 받았다. 이는 유입유속에 비해 집진 판으로 이동하는 전자의 이동속도가 매우 빠르기 때문에 방전극의 종류 에 상관없이 유입유속의 증가가 전자 이동의 방해요소로 작용하지 못하 는 것으로 해석된다.
- 5. 유입부 다공성 플레이트를 설치 시, 분진공급의 유·무에 따른 전압-전 류 특성은 유입농도 3 g/m³에서 Wire, screwed 방전극은 분진공급을 할 경우 같은 인가전압에서 더 낮은 전류 값을 나타냈고, Sharp edge 방전극은 분진공급의 유·무에 따라 차이가 거의 발생하지 않았다. 이는 방전극 형상에 따른 전계강도에 차이가 나므로 하전된 분진이 전류 값 에 영향을 미치는 정도가 다른 것으로 해석된다.
- 6. 본체 stage 수, 유입유속 변화에 따른 집진효율 특성을 알아보기 위해 유입부 다공성 플레이트 설치 없이 실험한 결과, 5 stage, tube 직경 12 mm, v_{in}=2.76, 3.46, 4.15 m/s의 경우 1 stage에서 78.0, 79.3, 80.1%, 2 stage에서 85.5, 87.1, 88.4%, 3 stage에서 88.7, 91.7, 93.0%로, 4 stage에 서 91.9, 94.2, 95%, 5 stage에서 93.4, 95.6 96.2%의 집진효율을 나타냈 다.
- 7. 방전극 형상에 따른 집진효율 특성은 유입부 다공성 플레이트를 설치 시, 5 stage, tube 직경 12mm, 인가전압 30 kV, 유입유속 2.76, 3.46,

4.15 m/s에서 wire 방전극의 경우 98.6, 99.2, 99.6%, screwed 방전극은 98.1, 98.7, 99.2%, Sharp edge 방전극의 경우 98.8, 99.2, 99.6%의 집진효 율을 나타냈다. Screwed 방전극의 경우 같은 조건에서 상대적으로 낮은 집진효율을 나타냈으며, wire와 sharp edge 방전극의 경우 낮은 유속 (v_{in} =2.76 m/s)에서 sharp edge 방전극의 효율이 더 높게 나타났다. 이 는 방전극 형상에 따른 전압-전류 특성이 집진효율에 영향을 미치는 것 으로 판단된다.

- 9. 유입부 다공성 플레이트 설치 시, 전압인가에 따른 집진효율 특성은 유 입유속 v_{in}=3.46 m/s, 인가전압 0, 20, 30 kV 에서 98.8, 99.2, 99.6%의 집진효율을 나타냈다. 이는 유입부 다공성 플레이트를 설치 않은 경우 95.6, 98.3, 98.8%의 집진효율보다 0.6~0.8%의 집진효율이 상승한 결과 이다.
- 10. 방전극 위치에 따른 집진 효율 특성은 sharp edge 방전극을 사용하여 유입유속 v_{in}=3.46 m/s에서 Fig. 4.30과 같이 방전극의 위치를 변경하여 집진효율을 측정하였다. (a) 위치에서 인가전압 20, 30 kV에 따라 98.9, 99.6%, (b) 위치에서 97.6, 98.5%, (a), (b) 모두 방전극을 위치하였을 때 99.1, 99.7%의 높은 집진효율을 나타냈다.
- 전기 다층 다단 임팩션 시스템은 필터 사용 없이 적정 압력손실 (142 mmH₂O)의 고효율 (99.7%)을 안정적으로 유지할 수 있으며, 높은 처리 유속에 의한 대유량 처리 (즉, 장치의 소형화)가 가능할 것으로 판단된 다.

4.2. 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템

4.2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치 구성을 살펴보면 흡입 송풍기, 분진공급 장치, 전원공급 장치, 방전극, 물분사 시스템, 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템, 유입유속 및 압력손실 등을 측정할 수 있는 계측시 스템으로 이루어져 있다. 유입유속의 경우 대기오염공정시험법에 의해 duct 중심부에서 0.707R 지점의 유속을 열선 풍속계 (model 6162, Kanomax, accuracy ±3%)를 이용해 측정하였으며, 압력손실의 경우 정 압 측정 장비(midi LOGGER GL800, GRAPHTEC, accuracy ±0.25%)를 이용해 측정했다. 집진효율의 경우 장치 입·출구에서 샘플링 한 뒤 중 량법을 이용해 측정하였다 (Yoa and Kim, 2013).

Fig. 4.32은 전체 시스템 구성에 대한 모식도이다.



Fig. 4.32. Schematic diagram of experimental apparatus for multi-staged multi-layered impaction system of mixed dry and wet type.


(a) A 3-dimensional view of the system.



Fig. 4.33. Schematic diagram of multi-staged multi-layered impaction system of mixed dry and wet type.

Fig. 4.33은 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 Lab scale 장치를 나타낸 것으로 (a)는 장치의 3차원 모식도 (b)는 장치의 평 면도이다. 다음과 같은 형태로 Lab scale 장치가 구성된 이유는 Lab scale 장치를 Pilot, Real scale로 scale-up 하였을 때 위의 구성을 하나의 모듈로써 반복적으로 대칭되게 설계되기 때문이다.

4.2.1.1. 플레이트의 구성

Fig. 4.34는 유입부 다공성 플레이트이다. 플레이트는 1 mm 두께의 스 틸 재질로 크기는 135×170 mm이다. Fig. 4.36은 본체 다공성 플레이트의 구성 및 배열이다. 좌측부터 1, 2, 3, 4, 5 stage의 다공성 플레이트이며 1 stage는 단층, 2 stage는 복층, 3~5 stage는 복층구조로 black hole과 tube 위치가 교차되도록 구성하였다. 복층의 경우 복층구조에 삽입된 tube를 빠져나온 분진은 black box내에 갇히게 되며 기류는 대각선 위의 out-flow hole을 통해 빠져나와 아래의 tube를 통해 다음 stage로 이동 하게 된다. 플레이트는 스틸 재질로 두께는 1 mm, 크기는 250×210 mm 이다. Tube는 외경 15 mm, 내경 12 mm, black hole의 직경은 15 mm이 며 stage간 거리는 10 mm, 복층 (2~5 stage)은 플레이트 사이 간격이 20 mm이다.



Fig. 4.34. Configuration of inlet porous plate.



Fig. 4.35. Configuration and arrangement of porous plate.

Fig. 4.36~38의 경우 1~3 stage의 정면도와 측면도이다. 1 stage의 경 우 tube의 길이는 11 mm이며 플레이트를 기준으로 앞으로 3 mm, 뒤로 7 mm만큼 나와 있다. 2 stage의 경우 tube의 길이는 43 mm이며 앞으로 4 mm, 뒤로 17 mm만큼 나와 있다. 17 mm 중 6 mm는 3 stage 내부에 삽입되었다. 3, 4 stage의 경우 2 stage와 같은 tube 길이를 가진다. 5 stage는 마지막 stage이므로 32 mm 길이의 tube를 이용해 앞으로 4 mm, 뒤로 6 mm만큼 나와 있다.







Fig. 4.37. Front and side view of 2 stage.



Fig. 4.38. Front and side view of 3, 4, 5 stage.

4.2.1.2. 휴대용 연소가스 측정기 (Portable Flue Gas Analyzer, E8500)

가스 측정에 사용된 휴대용 연소가스 측정기(Portable Flue Gas Analyzer, E8500)는 내부 Thermoelectric Chiller 내장, 자동 드레인 펌프 내장, 피톳튜브로 가스유속 측정되며 표준 측정항목은 *O*₂, *CO*, *NO*, *NO*_X, 선택측정항목은 *NO*₂, *SO*₂, *H*₂*S*, *CO*₂, *C*_X*H*_Y, *CO*가 있으며 본 실험에 사용 한 *SO*₂의 측정농도 범위는 0~4000 ppm이다. 이 기기를 덕트의 입구와 출구에서 실시간으로 가스 농도를 측정하였다.



4.2.2. 실험방법

 Table. 4.3은 다공성 플레이트의 tube를 통과하는 유속과 시스템 유입

 유속에 대한 표이다. 유입유속(v_{in}=2.07, 2.76, 3.46 m/s)은 16개의 내경

 12 mm인 내경 12 mm인 tube를 통과하는 유속 (v_t=9, 12, 15 m/s) 유속

 을 결정한 후, 이와 장치 전·후의 내경 100 mm인 관을 통과하는 유량

 이 같아질 때의 유속을 유입유속으로 사용한다.

Table 4.4는 본 실험에 대한 조건을 요약한 것이다.

Table 4.3. Inlet velocity and tube velocity with tube diameter

Tube diameter	Tube velocity	Flow rate	Inlet velocity
(mm)	(m/s)	(m ³ /min)	(m/s)
12	9	0.98	2.07
	12	1.30	2.76
	15	1.63	3.46

Гable	4.4.	Experimental	conditions

Description	Condition	
Particle	fly ash	
Tube velocity (m/s)	9, 12, 15	
Tube diameter (mm)	12	
Stage number	1, 2, 3, 4, 5, 1+5	
Shape of discharge electrode	sharp edge	
Applied voltage (kV)	20, 30, 40	
Inlet concentration (g/m ³)	1, 3, 5	
Gas	SO ₂ , NO ₂	
Gas inlet concentration (ppm)	30	
water spray (mL/min)	150, 300	
Operating time (min)	4	

4.2.2.1. 압력손실 측정

본 연구에서는 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템의 압력 손실 특성을 해석하기 위해 stage 수, 유입부 다공성 플레이트 설치 유·무, 유입유속, 물분사량 등의 물리적 변수에 따른 실험적 연구를 수 행하였다.

4.2.2.2. 입자상 오염물 집진효율 측정

본 연구에서는 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템에서 stage 수, 유입부 다공판 유·무, 유입유속, 방전극 종류 인가전압, 물 분 사량 등의 물리적 변수에 따른 집진효율의 특성을 연구하였다.

4.2.2.3. 가스상 오염물 제거효율 측정

액적분사에 의한 흡수 (absorption) 메카니즘은 가스상 오염물의 주요 처리방법 중의 하나로 물질 이동 원리를 이용하여 분리·제거하는 방법이 다. 물질이 용액내로 이동할 때 물리·화학적 평형관계가 존재하며, 가스상 오염물을 흡수액과 접촉시킬 때 물리적 평형한계 내에서 접촉 면적을 크 게 하고 접촉시간을 충분히 유지시키는 것이 중요하다. 물리적 평형관계 는 Henry의 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Sawyer et al, 2008).

$$P_{A} = HX_{A}$$
 (4.3)
여기서, $P_{A} = 기체분압$,
 $H = \text{Henry 상수}$
 $X_{A} = 액상 중 가스농도$

- 99 -

(가) SO₂ 제거효율 측정

SO₂ 제거효율을 물분사량 및 유입유속, 흡수액으로 증류수와 암모니아수 (NH₄OH)를 이용하여 실험을 수행하였다.

암모니아 수용액과 SO2의 반응식은 다음과 같다.

 $SO_2 + 2NH_4OH \rightarrow (NH_4)_2SO_3 + H_2O$ $(NH_4)_2SO_3 + SO_2 + H_2O \rightarrow 2NH_4HSO_3$ $NH_4HSO_3 + NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_3$

식 (4.4)

SO₂와 NH₄OH의 몰 비를 1:6, 1:4, 1:2로 조절하여 실험을 수행하였다.

(나) NO2 제거효율 측정

NO₂ 제거효율을 물분사량 및 유입유속, 흡수액으로 증류수와 암모니아수 (NH₄OH)를 이용하여 실험을 수행하였다.

암모니아 수용액과 NO₂의 반응식은 다음과 같다.

 $6NO_2 + 8NH_4OH \rightarrow 7N_2 + 20H_2O \qquad (4.5)$

NO₂와 NH₄OH의 몰 비를 1:4, 3:8, 3:4로 조절하여 실험을 수행하였다.

4.2.3. 결과 및 고찰

4.2.3.1. 압력손실 특성

Fig. 4.39는 본체 1~5 stage, 5 stage에 유입부 다공성 플레이트가 설치 된 경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s (tube 통과유속 v_t = 9, 12, 15 m/s)에서 압력손실 측정값을 나타낸다. 단 수가 1에서 5까지 변화함에 따 라 v_{in} = 2.07 m/s에서 11, 18, 25, 38, 42 mmH₂O, v_{in} = 2.76 m/s에서 12, 25, 43, 54, 70 mmH₂O, v_{in} = 3.46 m/s에서 19, 40, 65, 85, 109 mmH₂O로 나타났다. 단 수 증가에 따라 유입유속증가에 의한 압력손실 증가치는 더욱 커지는데, 같은 stage에서 압력손실은 식 (4.1)에 의해 유속의 제곱에 비례 해서 증가함을 알 수 있다. 유입부 다공성 플레이트 설치 시 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 58, 97, 148 mmH₂O의 압력손실을 나타낸다.



Fig. 4.39. Pressure drop with inlet velocity and stage number.

Fig. 4.40은 5 stage에서 물 분사를 하지 않은 dry type과 물 분사 (water spray) 300 mL/min의 압력손실을 비교한 그림이다. dry type의 경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 압력손실 42, 70, 109 mmH₂O, 물분사의 경우 각각의 유입유속에서 압력손실 43, 71, 111 mmH₂O로 물 분사가 없는 dry type의 경우 보다 1~2 mmH₂O정도 압력 손실이 증가됨을 볼 수 있다. 이는 분사 액적과 기류와의 충돌에 의한 저항 증가에 따른 영향으로 판단된다.



Fig. 4.40. Comparison of pressure drop with water spray and inlet velocity (5 stage, water spray = 300 mL/min).

4.2.3.2. 입자상 오염물질의 집진효율 특성

(가) 본체 stage 수, 유입유속 변화에 따른 집진효율 특성

Fig. 4.41은 물 분사가 없는 경우, 시스템 유입 유속 및 stage 수 변화에 따른 본 시스템의 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s (튜브통과 유속 v_t = 9, 12, 15 m/s)에서 1 stage의 경우 76.0, 77.3, 78.1%, 5 stage의 경우 91.2, 92.5, 93.0%의 효율을 나타내었다. 유입유속이 증가하면서 임팩션 효과의 증대 및 난류강도에 의한 와류 확산 효과가 부가되면서 집진효율은 상승한다 (Yoa, 2004).



Fig. 4.41. Collection efficiency with inlet velocity and stage number (inlet concentration =3 g/m^3).

(나) 유입부 다공성 플레이트 설치 유·무에 따른 집진효율 특성.

Fig. 4.42는 물 분사가 없는 경우, 5 stage에서 유입부 다공성 플레이트 설치 유·무에 따른 집진효율 특성을 나타낸 것이다. 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 유입부 다공성 플레이트를 설치하지 않은 경우 91.2, 92.5, 93.0% 유입부 다공성 플레이트를 설치한 경우 92.2, 93.5, 94.5%의 집 진효율을 나타내었다. 유입부 다공성 플레이트 설치 시 0.8~1.5%의 집진효 율 상승이 있었다. 이는 유입부 다공성 플레이트에 의한 추가적인 임패션 효과에 의한 것으로 판단된다.



Fig. 4.42. Collection efficiency with inlet velocity and inlet porous plate (inlet concentration =3 g/m^3).

(다) 유입유속 및 물분사량에 따른 집진효율 특성

Fig. 4.43은 5 stage에서 유입유속 및 물분사량에 따른 집진효율을 나타 낸 그림이다.

water spray = 150 mL/min의 경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s 에서 집진효율은 99.3, 99.4, 99.6%, 물 분사량 300 mL/min의 경우 99.4, 99.6, 99.8%의 집진효율을 나타낸다. dry type의 경우 유입유속이 증가함 에 따라 1.8%의 집진효율 증가를 나타내는 반면에 물 분사량 300 mL/min 의 경우 유속이 증가함에 따라 0.4%의 집진효율 증가를 나타냈 다. 이는 습식의 경우 낮은 유속에서도 액적에 의한 미세분진의 응집으로 인해 입경이 커진 분진이 충분한 관성력을 가지게 되어 나타나는 현상으 로 판단된다.



Fig. 4.43. Collection efficiency with inlet velocity and water spray (5 stage, inlet concentration =3 g/m^3).

(라) 유입농도에 따른 집진효율 특성

Fig. 4.44는 5 stage, v_{in} = 3.46 m/s에서 유입농도 1, 3, 5 g/m³ 에 따른 집진효율을 비교한 그래프이다. 건식의 경우, 유입농도가 증가함에 따라 2.5%의 집진효율이 증가함에 반해 물 분사량 300 mL/min의 경우 0.3%의 집진효율 증가를 보였다. 이는 dry type의 경우, 입자 농도가 증가하면서 입자간의 충돌로 인한 응집효과가 증대되며, 이로 인해 입경증가에 따른 관성력이 커지기 때문이다. 물 분사량 300 mL/min 경우, 건식에 비해 상 대적으로 높은 액·가스비에 의해 미세 액적과 입자간의 포집효과가 월등 하여 입자응집에 의한 효과를 약화시키기 때문이다.



Fig. 4.44. Comparison of collection efficiency with water spray and inlet concentration (5 stage).

(마) 유입유속 및 전압인가에 따른 집진효율 특성(유입부 다공성 플레이트 설치 시)

Fig. 4.45는 물분사가 없는 경우, 5 stage, sharp edge 방전극, 유입부 다 공성 플레이트가 설치, 유입유속 및 인가전압에 따른 집진효율을 나타낸 그래프이다. 인가 전압 0 kV의 경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에 서 92.0, 92.5, 94.5%, 인가 전압 20 kV의 경우 95.9, 96.5, 98.2%, 인가 전압 30kV의 경우 96.9, 97.2, 99.1%의 집진효율을 나타낸다.



Fig. 4.45. Comparison of collection efficiency with inlet velocity and applied voltage (inlet porous plate, 5 stage, inlet concentration =3 g/m^3)

(바) 물분사 및 전압인가에 따른 집진효율 특성(유입부 다공성 플레이트 설치 시)

Fig. 4.46은 5 stage, v_{in} = 3.46 m/s에서 물분사 및 전압인가에 따른 집 진효율을 비교한 그래프이다. 물 분사 150 mL/min,의 경우 인가전압 20, 30 kV에 따라 99.8, 99.9%, 물 분사량 300 mL/min의 경우 인가전압 20, 30 kV에 따라 99.8, 99.9%의 집진효율을 나타냈다.



Fig. 4.46. Comparison of collection efficiency with water spray and applied voltage (5 stage, v_{in} = 3.46 m/s, inlet concentration =3 g/m³).

4.2.3.3. 가스상 오염물질의 제거효율 특성

(가) SO₂ 가스 제거효율 특성

(1) 물분사량에 따른 제거효율 특성

Fig. 4.47은 5 stage, 유입유속 v_{in} = 2.07 m/s에서 물 분사량에 따른 SO₂ 제거효율을 나타낸 것이다. 물 분사량 150, 300 mL/min에서 SO₂ 제 거효율은 각각 50, 63.3%로 물 분사량의 증가에 따라 액·가스비가 커지면 서 흡수액과 가스의 접촉면적의 증가로 제거 효율은 상승한다.



Fig. 4.47. SO₂ removal efficiency with water spray (5 stage, v_{in} =2.76 m/s).

(2) 유입유속에 따른 제거효율 특성

Fig. 4.48은 유입유속에 따른 NO₂ 제거효율을 나타낸 것이다. 5 stage, 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 SO₂ 제거효율은 70, 63.3, 56.7 % 로 유입유속이 증가함에 따라 SO₂ 제거효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유량증대에 의한 액·가스비의 감소 (접촉면적의 감소)와 시스템 내 의 체류시간 즉, 가스·흡수액의 접촉시간을 감소시켜 제거효율의 저하를 초래하기 때문이다.



Fig. 4.48. SO₂ removal efficiency with inlet velocity (5 stage, water spray = 300 mL/min).

(3) NH4OH 사용에 따른 제거효율 특성

Fig. 4.49은 SO₂와 NH₄OH의 몰 비에 따른 SO₂ 제거율을 나타낸 것이 다. 5 stage, 물분사량 300 mL/min, 유입유속 v_{in} = 2.07 m/s에서 NH₄OH 의 농도에 따라 SO₂와의 몰 비를 조절하여 실험을 수행하였다. SO₂와 NH₄OH의 몰 비가 1:6, 1:4, 1:2 일 때 각각 80, 76.7, 73.7%의 제거효율을 나타냈다.

식 (4.4)의 반응식에 따라 SO₂와 NH₄OH는 1:2의 몰비로 반응한다. 하지 만 이론적 반응식에 따른 몰 비와 달리 실제 반응 시 SO₂와 NH₄OH가 정 량적으로 반응할 수 없기 때문에 NH₄OH를 실제 반응비에 해당하는 양보 다 과량으로 투입할수록 SO₂ 제거효율이 증가함을 알 수 있다.



Fig. 4.49. SO₂ removal efficiency with SO₂/NH₄OH mole ratio (5 stage, NH₄OH(aq) spray = 300 mL/min, v_{in} =2.07 m/s).

(가) NO2 가스 제거효율 특성

(1) 물분사량에 따른 제거효율 특성

Fig. 4.50은 5 stage, 유입유속 v_{in} = 2.07 m/s에서 물 분사량에 따른 NO₂ 제거효율을 나타낸 것이다. 물 분사량 150, 300 mL/min에서 NO₂ 제 거효율은 각각 35.0, 56.7%로 물 분사량의 증가에 따라 액·가스비가 커지 면서 흡수액과 가스의 접촉면적의 증가로 제거 효율은 상승하였다.



Fig. 4.50. NO₂ removal efficiency with water spray (5 stage, v_{in} =2.07 m/s).

(2) 유입유속에 따른 제거효율 특성

Fig. 4.50은 유입유속에 따른 NO₂ 제거효율을 나타낸 것이다. 5 stage, 물 분사량 300 mL/min, 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 NO₂ 제 거효율은 56.7, 50.0, 40.0 % 로 유입유속이 증가함에 따라 NO₂ 제거효율 이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유량증대에 의한 액·가스비의 감소 (접촉면적의 감소)와 시스템 내의 체류시간 즉, 가스·흡수액의 접촉시간을 감소시켜 제거효율의 저하를 초래하기 때문이다.



Fig. 4.50. NO₂ removal efficiency with inlet velocity (5 stage, water spray = 300 mL/min).

(3) NH4OH 사용에 따른 제거효율 특성

Fig. 4.51은 NO₂와 NH₄OH의 몰 비에 따른 NO₂ 제거율을 나타낸 것이 다. 분사량은 300 mL/min으로 동일한 조건이며 NH₄OH의 농도에 따라 NO₂와의 몰 비를 조절하여 실험을 수행하였다. NO₂와 NH₄OH의 몰 비가 1:4, 3:8, 3:4 일 때 각각 70.0, 66.7, 60.0%의 제거효율을 나타냈다.

식 (4.5) 반응식에 따라 NO₂와 NH₄OH는 3:4의 몰 비로 반응한다. 하지 만 이론적 반응식에 따른 몰비와는 달리 실제 반응 시 NO₂와 NH₄OH가 정량적으로 반응할 수 없기 때문에 NH₄OH를 과량으로 투입할수록 NO₂ 제거효율이 증가함을 알 수 있다.



Fig. 4.51. NO₂ removal efficiency with NO₂/NH₄OH mole ratio (5 stage, NH₄OH(aq) spray = 300 mL/min, v_{in} =2.07 m/s).

4.2.4. 결 론

본 연구에서는 건·습식 다층 다단 임팩션 시스템을 적용하여 분진입자 및 액적의 재비산을 최소화하였고 소형 장치규모로 99%이상의 고효율과 적정 압력손실을 유지할 수 있도록 하였다. 본 시스템의 압력손실 및 집 진특성을 해석하기 위해 시스템 유입유속, stage 수, 물분사량, 유입농도, 인가전압 등의 물리적 변수들에 따른 실험을 수행하여 시스템 최적 설계 를 위한 결과를 얻고자 하였다.

- 압력손실은 stage 수가 1에서 5까지 변화함에 따라 v_{in} = 2.07 m/s에서
 11, 18, 25, 38, 42 mmH₂O, v_{in} = 2.76 m/s에서 12, 25, 43, 54, 70 mmH₂O, v_{in} = 3.46 m/s에서 19, 40, 65, 85, 109 mmH₂O로 나타났다. 단 수 증가에 따라 유입유속증가에 의한 압력손실 증가치는 더욱 커지는데, 같은 stage에서 압력손실은 식 (4.1)에 의해 유속의 제곱에 비례해서 증 가함을 알 수 있다
- 2. 5 stage에서 물 분사를 하지 않은 dry type과 물 분사 (water spray) 300 mL/min의 압력손실은 dry type의 경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 압력손실 42, 70, 109 mmH₂O, 물분사의 경우 각각의 유입 유속에서 압력손실 43, 71, 111 mmH₂O로 물 분사가 없는 dry type의 경우 보다 1~142 mmH₂O정도 압력손실이 증가됨을 볼 수 있다. 이는 분사 액적과 기류의 충돌에 의한 저항증가에 따른 영향으로 판단된다.

3. 물 분사가 없는 경우, 시스템 유입 유속 및 stage 수 변화에 따라 유입

유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 1 stage의 경우 76.0, 77.3, 78.1%, 5 stage의 경우 91.2, 92.5, 93.0%의 효율을 나타내었다. 유입유속이 증가하 면서 임팩션 효과의 증대 및 난류강도에 의한 와류 확산효과가 부가되면 서 집진효율은 상승한다.

- 3. water spray = 150 mL/min의 경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s 에서 집진효율은 99.3, 99.4, 99.6%, water spray = 300 mL/min의 경우 99.4, 99.6, 99.8%의 집진효율을 나타낸다. dry type의 경우 유입유속이 증가함에 따라 1.8%의 집진효율 증가를 나타내는 반면에 water spray = 300 mL/min 의 경우 유속이 증가함에 따라 0.4%의 집진효율 증가를 나타냈다. 이는 습식 시스템의 경우 낮은 유속에서도 액적에 의한 미세 분진의 응집으로 인해 입경이 커진 분진이 충분한 관성력을 가지게 되어 나타나는 현상으로 판단된다.
- 4. 5 stage, v_{in} = 3.46 m/s에서 유입농도 1, 3, 5 g/m³ 에 따른 집진효율을 비교한 그래프이다. Dry type의 경우, 유입농도가 증가함에 따라 2.5% 의 집진효율이 증가함에 반해 물 분사량 300 mL/min의 경우 0.3%의 집진효율 증가를 보였다. 이는 dry type의 경우, 입자 농도가 증가하면서 입자간의 충돌로 인한 응집효과가 증대되며, 이로 인해 입경증가에 따른 관성력이 커지기 때문이다. 물 분사량 300 mL/min 경우, dry type 에 비해 상대적으로 높은 액·가스비에 의해 미세 액적과 입자간의 포집 효과가 월등하여 입자응집에 의한 효과를 약화시키기 때문이다.
- 5. 물분사가 없는 경우, 5 stage, sharp edge 방전극, 유입부 다공성 플레이 트가 설치, 유입유속 및 인가전압에 따른 집진효율은 인가 전압 0 kV의

경우 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 92.0, 92.5, 94.5%, 인가 전 압 20 kV의 경우 95.9, 96.5, 98.2%, 인가 전압 30kV의 경우 96.9, 97.2, 99.1%의 집진효율을 나타낸다.

- 6. 5 stage, v_{in} = 3.46 m/s에서 물분사 및 전압인가에 따른 집진효율은 물 분사 150 mL/min,의 경우 인가전압 20, 30 kV에 따라 99.8, 99.9%, 물 분사량 300 mL/min의 경우 인가전압 20, 30 kV에 따라 99.8, 99.9% 의 집진효율을 나타냈다.
- 7. 물 분사량에 따른 SO₂ 제거효율은 5 stage, 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76,
 3.46 m/s, 물 분사량 150, 300 mL/min에서 50, 63.3%로 물 분사량의 증 가에 따라 액·가스비가 커지면서 흡수액과 가스의 접촉면적의 증가로 제거 효율은 상승한다.
- 8. 유입유속에 따른 SO₂ 제거효율은 5stage, 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46 m/s에서 SO₂ 제거효율은 70, 63.3, 56.7 %로 유입유속이 증가함에 따라 SO₂ 제거효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유량증대에 의한 액·가스비의 감소(접촉면적의 감소)와 시스템 내의 체류시간 즉, 가스·흡 수액의 접촉시간을 감소시켜 제거효율의 저하를 초래하기 때문이다.
- 9. SO₂와 NH₄OH의 몰 비에 따른 SO₂ 제거효율은 5 stage, 물 분사량 300 mL/min, 유입유속 v_{in} = 2.07에서 SO₂와 NH₄OH의 몰 비가 1:6, 1:4, 1:2 일 때 각각 80, 76.7, 73.7%의 제거효율을 나타냈다. 이는 실제 반응 시 SO₂와 NH₄OH가 정량적으로 반응할 수 없기 때문에 SO₂와 NH₄OH

의 몰비를 1:4, 1:6으로 NH4OH를 과량으로 투입할수록 SO₂ 제거효율이 증가함을 알 수 있다.

- 10. 물 분사량에 따른 NO₂ 제거효율은 5 stage, 유입유속 v_{in} = 2.07,
 2.76, 3.46 m/s, 물 분사량 150, 300 mL/min에서 35.0, 56.7%로 물 분사
 량의 증가에 따라 액·가스비가 커지면서 흡수액과 가스의 접촉면적의
 증가로 제거 효율은 상승한다.
- 11. 유입유속에 따른 NO₂ 제거효율은 5stage, 유입유속 v_{in} = 2.07, 2.76,
 3.46 m/s에서 NO₂ 제거효율은 56.7, 50.0, 40.0 % 로 유입유속이 증가함
 에 따라 NO₂ 제거효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유량증대에
 의한 액·가스비의 감소(접촉면적의 감소)와 시스템 내의 체류시간 즉,
 가스·흡수액의 접촉시간을 감소시켜 제거효율의 저하를 초래하기 때문
 이다.
- 12. NO₂와 NH₄OH의 몰 비에 따른 SO₂ 제거효율은 5 stage, 물 분사량 300 mL/min, 유입유속 v_{in} = 2.07에서 NO₂와 NH₄OH의 몰 비가 1:4, 3:8, 3:4 일 때 각각 70.0, 66.7, 60.0%의 제거효율을 나타냈다. 이는 실제 반응 시 NO₂와 NH₄OH가 정량적으로 반응할 수 없기 때문에 NO₂와 NH₄OH의 몰비를 1:4, 1:6으로 NH₄OH를 과량으로 투입할수록 NO₂ 제 거효율이 증가함을 알 수 있다.

○ 입자상 오염물질의 집진특성은 5 stage, 물분사량 300 mL/min, 인가 전압 (30 kV), 유입유속 3.46 m/s에서 99.9%의 높은 집진효율을 나타내며 가스상 오염물질의 제거 특성은 5 stage, 유입유속 2.07 m/s, 흡수액

- 118 -

(NH4OH)을 사용하였을 때 SO₂는 80%, NO₂는 70%의 제거효율을 가진다. 이러한 결과는 입자상 오염물질 집진특성과는 상반적으로 시스템 유입유속 이 증가할수록 제거효율은 감소하므로 동시 제어를 위해서는 입자상과 SO₂ 의 제거 효율 목표치에 맞게 적정한 유입유속의 선정과 그에 따른 액·가스 비의 조절이 필요할 것으로 고려된다. 또한, 본 시스템의 액·가스비는 0.09 ~0.307 L/m³으로 기존의 고효율 습식 세정기인 벤튜리 스크러버의 액·가 스비 (1~2.7 L/m³)에 비해 매우 낮아 분사수 사용 감소에 의한 폐수처리 부담을 줄일 수 있다. 본 연구의 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템은 디미스터 사용 없이 액적 배출을 최소화하며 적정 압력손실에서 99%이상의 고효율로 대유량을 처리할 수 있으며 입자 및 가스상 물질을 동시에 처리할 수 있는 새로운 개념의 컴팩트형 집진 시스템이 될 수 있 을 것으로 판단된다.

V. Pilot 및 Real scale 집진 시스템

5.1. Pilot scale (50 CMM) 집진 시스템

5.1.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치 구성을 살펴보면 건·습식 다층 다단 임팩션 시스템 (Pilot scale, 50 CMM)과 분진 정량 공급 장치 (ROVO Feeder, ㈜ 화 인테크닉스, 한국), 정전압/정전류 공급장치 (-80 kV/20 mA, KSC, 한국)와 유입유속 및 압력 손실, 집진효율을 측정하기 위한 등속흡입장치 2대 (Cateco Method 5 Sampling Train, CleanAir, USA)의 계측시스템으로 이루어져 있 다.

Fig. 5.1은 전체 시스템 구성에 대한 모식도 이다.



Fig. 5.1. Schematic diagram of experimental apparatus.



Lab scale 장치의 실험 결과를 토대로 다음과 같이 기초 설계를 하였 으며 전기집진부 유입부는 면적 0.672 m²으로 처리유량 50 CMM일 때 전기 집진부 유입유속은 1.24 m/s 이다.



Fig. 5.2. Sketch of 50 CMM (Top view).



Fig. 5.3. Sketch of 50 CMM (Side view).

(가) 유입부 다공판

Fig. 5.4는 유입부 다공성 플레이트의 기초 설계 도면이다. 이는 Lab sclae 장치의 유입부 다공판 간격을 참고하였고 tube 개수는 가로 28개, 세로 9개로 총 504 개이며 처리유량이 50 CMM 일 경우 tube 통과유속 이 14.6 m/s로 Lab scale 집진 시스템의 tube 통과 유속 15 m/s에 근접 하도록 설계하였다.



Fig. 5.4. Drawing of inlet porous plate (50CMM)

(나) 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 다공성 플레이트 시스템

Fig. 5.5~5.9는 Pilot scale (50 CMM급)의 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 다공성 플레이트의 기초 설계 도면이다. 본 시스템의 주요 설계변 수는 tube 통과유속, tube 직경, tube 노즐 및 플레이트 간 간격 등이다. Lab scale의 실험결과 tube 통과 유속 15 m/s에서 적정 압력손실과 고효 율의 집진효율을 나타냄에 따라 주요 변수인 tube 통과유속, tube 직경, tube 노즐 및 플레이트 간 간격 등을 동일하게 유지 (동일 Reynolds number, Stokes number)하여 모듈수를 증가함에 따라 유량을 높혀 다층 다단 다공성 플레이트를 설계하였다. tube의 개수는 1set에 tube length 15 mm 168개, 49 mm 504개, 34 mm 168개로 총 3 set를 설치하였다.

0 0 0 0 0 o 0 0 0 0

Fig. 5.5. Drawing of porous plate. (50 CMM, 1 stage)



Fig. 5.7. Drawing of porous plate. (50CMM, 3 stage)



Fig. 5.9. Drawing of porous plate. (50 CMM, 5 stage)



Fig. 5.10. Multi-staged multi-layered impaction system of mixed dry and wet type (Pilot scale, 50 CMM)

5.1.1.1. 방전극

방전극은 Lab scale 장치를 이용한 실험 시에 가장 높은 집진효율을 나타낸 sharp edge 방전극을 사용하였다. Edge의 수는 Lab scale 장치 와 Pilot scale 장치의 유량에 비례하는 만큼 그 수를 늘려 설계하였다.



Fig. 5.11. Discharge electrode (Pilot scale, 50CMM)
5.1.1.2. 분진 공급 장치 (ROVO Feeder, ㈜ 화인테크닉스, 한국)



Fig. 5.12. Feeder (ROVO Feeder).

5.1.1.3. 등속흡입장치

(Cateco Method 5 Sampling Train, CleanAir, USA)



Fig. 5.13. Cateco Method 5 Sampling Train (CleanAir, USA)

5.1.2. 실험방법

5.1.2.1. 압력손실 측정

본 연구에서는 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템 (Pilot scale, 50 CMM)의 전·후단에 같은 직경과 길이의 tube를 압력 측정기 (Testo 354, Testo, Germany)에 연결하여 tube 통과유속 (처리유량)에 따라 압력손실을 측정하였다.

5.1.2.2. 집진효율 측정

본 실험은 대기오염공정시험기준 (환경부고시 제2014-9호, 2014.1.24, 일부 개정)의 절차에 따라 진행하였으며, 시험 유량은 50 m³/min으로 최종단 송풍 기 후단 측에서 유속을 측정하여 확인하였다. 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템(Piot scale, 50CMM)의 전단과 후단에 등속흡입장치를 설치하 고 원통여과지를 이용해 시험 대상 분진을 동시에 20 분간 포집하여 전단 및 하단부의 분진농도를 산출하여 집진효율을 측정하였다.

5.1.3. 결과 및 고찰

5.1.3.1. 압력손실 특성

Pilot scale 집진 시스템의 압력손실 측정결과는 40, 50 CMM (tube 통과 유속 $v_t = 12$, 15 m/s)의 경우 93, 145 mmH₂O으로 나타났다. 이러한 결 과는 Lab scale 집진 시스템에서의 압력손실 측정결과인 tube 통과유속 $v_t = 12$, 15 m/s의 경우 97, 148 mmH₂O와 비교하였을 때 Lab scale 집 진 시스템의 압력손실 특성이 Pilot scale 집진 시스템에 잘 반영되었음 을 알 수 있다.

5.1.3.2. 집진효율 특성

6	Water spray	Applied Voltage	Inlet (mg/m ³)	Outlet (mg/m ³)	Efficiency (%)
50 CMM	0	0 kV	1362 5		99.63
15 m/s)	0	30 kV	1514	1	99.93
40 CMM (tube velocity 12 m/s)	0	0 kV	1375	27	98.04
	0	30 kV	1375	4	99.71

Table. 5.1. Collection efficiency (Pilot scale, 50 CMM)

 Table 5.1은 Pilot scale 집진 시스템의 집진효율 측정결과를 나타낸 것으로

 50 CMM (tube 통과유속 v_t = 15 m/s)에서 물분사 (액·가스비 0.91

 L/m³) 및 30 kV 전압인가를 한 경우 99.93%로 Lab scale 집진 시스템에

 서 동일 조건에서 실험한 결과인 99.9%와 비교하였을 때 압력손실 결과

와 마찬가지로 본 시스템의 주요 설계변수인 tube 통과유속, tube 직경, tube 및 플레이트 간 간격 등의 물리적 조건을 Lab scale 집진 시스템과 동일하게 유지하여 scale-up 하였을 경우 동일 Reynolds 수, Stokes 수 에 의한 동일 유동 특성 입자운동 특성이 유지됨에 따라 집진효율이 근 사한 값으로 나타낸다.

5.1.3.3. 입자개수 측정기에 의한 입자분포와 집진효율 특성

Fig. 5. 34는 Pilot scale 집진 시스템에서 처리유량 50 CMM (tube 통과유속 $v_t = 15$ m/s), 물분사 및 전압인가를 하였을 경우 유입부 입· 출구에 입자개수기를 통한 측정결과를 나타낸 것으로 유입부 중량기준 분진 평균입경은 2.56 µm, 유출부 2.334 µm이다. 이러한 측정결과로 중 량 기준 집진효율을 산출하였을 때 Table. 5.6과 같이 총괄 집진효율은 99.13%, PM 2.5의 집진 효율은 99.15%, PM 10의 집진효율은 99.24% 를 나타낸다. 따라서 본 시스템의 PM 2.5와 PM 10의 입자 입경 범위 에서의 집진효율 또한 우수한 것으로 판단할 수 있다.



Fig. 5.14. Particle distribution.

inlet 입경별 중량						유입부 중량기준 평균입경(μm) : 2.561									
μm	0.30- 0.40	0.40- 0.50	0.50- 0.65	0.65- 0.80	0.80- 1.0	1.0- 1.6	1.6- 2.0	2.0- 3.0	3.0- 4.0	4.0- 5.0	5.0- 7.5	7.5– 10.0	10.0– 15.0	15.0- 20.0	>20.0
$\mu \mathrm{g}$	904.73	1478.4	1801.1	2110.6	4298.2	6369.4	20033.	29244.	5913.5	4885.2	2793.3	96.812	75.676	0	0
Outlet 입경별 중량						-	유출부 중	량기준	평균입경	(μm) : 2	2.334				
μm	0.30- 0.40	0.40- 0.50	0.50- 0.65	0.65- 0.80	0.80- 1.0	1.0-1 .6	1.6- 2.0	2.0- 3.0	3.0- 4.0	4.0- 5.0	5.0- 7.5	7.5– 10.0	10.0– 15.0	15.0– 20.0	>20.0
μg	56.015	59.420	106.29	82.302	83.538	81.179	61.897	32.986	4.8490	6.1072	11.504	4.9107	14.317	44.898	0
Collection efficiency of PM 2.5 (%) : 99.15						Co of 1	llection PM 10 (efficien (%) : 99	юу 9.19	collec ()	Total tion effic %) : 99.2	ciency 4			

Table. 5. 2. Particle distribution and collection efficiency (Pilot scale, 50C MM)

5.2. Real scale (800 CMM) 집진 시스템

5.2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치 구성을 살펴보면 건·습식 다층 다단 임팩션 시스템 (Real scale, 800CMM)과 분진 공급 장치, 정전압/정전류 공급장치 (-80 kV/20 mA, KSC, 한국)와 유입유속 및 압력 손실, 집진효율을 측정하 기 위한 실시간 유속계 (Testo 480, Testo, Germany), 압력 측정기 (Testo 354, Testo, Germany), 등속흡입장치 2대 (Cateco Method 5 Sampling Train, CleanAir, USA)의 계측시스템으로 이루어져 있다.

Fig. 5.14는 전체 시스템 구성에 대한 모식도이다.



Fig. 5.15. Schematic diagram of experimental apparatus.

5.2.1.1. 장치 기초 설계

전기 집진부는 15개의 channel로 구성 되었으며 집진판과 집진판의 간격은 147mm, 집진판의 길이는 1m로 설계되었으며 처리유량이 700~800 CMM일 경우 전기 집진부에서 2.65~3.00 m/s의 유속을 가진다. Pilot scale 집진 시스템의 전기 집진부 유속 (1.24 m/s)에 비해 높게 나타나는데 이는 Real scale 집진 시스템이 이동형으로 제작됨에 따라 유입부 크기의 공 간적 제약이 발생함에 따라 유입부의 크기가 작아져 상대적으로 빠른 유속으로 설계되었다.



Fig. 5.16. Drawing of real scale (Top view).



Fig. 5.17. Drawing of real scale (Side view).

Fig. 5.17은 장치 기초 설계를 바탕으로 기본적인 외형을 나타내는 도면이다.



Fig. 5.18. Drawing of real scale.



Fig. 5.19. Electrostatic multi-layered multi-staged impaction system of mixed dry and wet type (Real scale, 800 CMM).

(가) 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 다공성 플레이트 시스템

본 시스템의 주요 설계변수인 tube 통과유속, tube 직경, tube 및 플레 이트 간 간격 등의 물리적 조건을 Lab. scale 접진 시스템과 Pilot scale (50 CMM급) 접진 시스템의 다층 다단 다공성 플레이트와 동일하게 유 지 (동일 Reynolds 수, Stokes 수)하였으며 모듈수 증가를 통해 Tube 통 과 유속 15 m/s 기준으로 처리 유량은 835.5 CMM, 13 m/s 기준으로 724.1 CMM 처리유량을 가지도록 설계하였다. Fig. 5.19~5.23은 Real scale (800 CMM급) 접진 시스템의 다층 다단 다공 플레이트의 4 set 중 1 set의 도면을 나타내고 4 set 모두 Fig. 5.19~5.23과 동일한 간격과 크기로 제작하였다.



Fig. 5.20. Drawing of Real scale porous plate (1 stage).



Fig. 5.21. Drawing of Real scale porous plate (2 stage).



Fig. 5.22. Drawing of Real scale porous plate (3 stage).



Fig. 5.23. Drawing of Real scale porous plate (4 stage).



Fig. 5.24. Drawing of Real scale porous plate (5 stage).

Fig. 5.24~5.28은 Real scale (800CMM급) 집진 시스템의 다층 다단 다공 플레이트의 4 set 중 1 set의 tube 상세 배치도면이다. 앞서 설명 하였던 바와 같이 Lab scale 집진 시스템과 동일한 tube 통과유속, tube 직경, tube 및 플레이트 간 간격 등을 통해 동일 Reynolds 수, Stokes 수 를 유지하여 Lab 및 Pilot scale 집진 시스템의 압력손실 특성과 집진효 율 특성을 구현하고자 하였으며 4 set 모두 Fig. 5.19~5.23과 동일 간격 과 배치로 제작하였다.



Fig. 5.25. Drawing of Real scale porous plate (1 stage, arrangement).



Fig. 5.26. Drawing of Real scale porous plate (2 stage, arrangement).



Fig. 5.27. Drawing of Real scale porous plate (3 stage, arrangement).



Fig. 5.28. Drawing of Real scale porous plate (4 stage, arrangement).



Fig. 5.29. Drawing of Real scale porous plate (5 stage, arrangement).



Fig. 5.30. Real scale porous plate (assembly).

(나) 방전극

Fig. 5.30은 Real scale (800CMM급) 집진 시스템의 방전극이다. 총 15 개의 channel 에 하나의 방전극 이 배치되었으며 방전극의 edge 수는 Pilot scale 집진 시스템의 방전극 설계와 마찬가지로 유량에 비례하여 Lab scale 집진 시스템과 유사하게 설계하였다.



Fig. 5.31. Discharge electrode (Real scale, 800 CMM).



Fig. 5.32. Electrostatic section (Real scale, 800 CMM).



Fig. 5.33. Multi-layered multi-staged porous plate and water spray system (Real scale, 800 CMM)



Fig. 5.34. Electrostatic multi-layered multi-staged impaction system of mixed dry and wet type (Real scale, 800 CMM).

5.2.2. 실험방법

Real scale 집진시스템의 실험결과는 한국산업기술원 (KTL, Korea Testing Laboratory)에 의해 아래와 같은 방법으로 실험된 결과이다.

5.2.3.1. 압력손실 및 유량 측정

대기오염물질공정시험기준 (환경부고시 제2014-9호, 2014.1.24., 일부개정) 에 따라 등속흡입장치 (Cateco Method 5 Sampling Train, Clean Air, USA) 의 피토관을 이용하여 전·후단의 동압을 측정하여 식(5.1)을 통해 유입유속을 산출한다.

본 연구에서는 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템 (Real scale, 800 CMM)의 전·후단에 같은 직경과 길이의 tube를 압력 측정기 (Testo 354, Testo, Germany)에 연결하여 tube 통과유속 (처리유량)에 따라 압력손실을 측정하였다.

5.2.3.1. 배출가스 중 수분량

대기오염물질공정시험기준 (환경부고시 제2014-9호, 2014.1.24., 일부개정) 에 따라 등속흡입장치 (Cateco Method 5 Sampling Train, Clean Air, USA) 를 이용하여 액적 펌프 동작 유무에 따라 배출가스 중 수분량을 측정·비교하 여 액적 배출 방지여부를 확인하고자 하였다. 배출가스 중 수분량은 습한 가 스 중의 수증기의 부피백분율로 표시하고 다음 식에 의해 구한다.



여기서, X_w = 배출가스 중의 수증기의 부피 백분율 [%] m_a = 흡습 수분의 질량 (m_{a2}-m_{a1}) [g] V_m = 흡입한 건조 가스량 (건식가스미터에서 읽은 값) [L] θ_m = 가스미터에서의 흡입 가스온도 [℃] P_a = 대기압 [mmHg] P_m = 가스미터에서의 가스의 게이지압 [mmHg]

5.2.3.1. 집진 효율 측정

본 실험은 대기오염물질공정시험기준 (환경부고시 제2014-9호, 2014.1.24., 일부 개정)의 절차에 따라 진행하였으며, 실험 유량은 700~800 m³/min으로 건·습식 다층 다단 임팩션 시스템 (Real scale, 800 CMM)의 전단과 후단에 각각 등속흡입장치 (Cateco Method 5 Sampling Train, CleanAir, USA)를 설 치하고 원통여과지를 이용해 실험 대상 분진을 동시에 10분간 포집하여 전단 및 후단 측 분진농도를 산출하여 식 (4.2)를 통해 집진효율을 계산한다.

5.2.3. 결과 및 고찰

5.2.3.1. 압력손실 및 유량 측정 결과

Table. 5.3. Pressure drop (Real scale, 800 CMM)

\ ·	less-	Unit	Result		
	1	u Ot S	124.96		
Pressure drop	2	mmH ₂ O	125.13		
	Average		125.05		

위의 Table 5.2는 Real scale 집진 시스템의 처리유량 723.57 CMM에 서 압력손실을 측정한 결과로 2회 측정 후 평균값으로 나타낸다.

이러한 결과는 Lab scale 집진 시스템과 Pilot scale 집진 시스템의 실 험결과가 잘 반영된 결과로 기존 세정 집진기에 비해 낮은 압력손실 값 을 가진다,

		Unit	Inlot volocity	Outlet	
		OIIIt	iniet velocity	velocity	
Velocity	1		10.9	12.2	
	2	m/sec	11.1	12.0	
	Average		11.55		
Average flow rate		m ³ /min	723.57		

Table. 5.4. Velocity and flow rate (Real scale, 800 CMM)

위의 Table 5.3은 압력손실 측정과 동시에 이루어졌으며 2회 측정결과 의 평균값으로 723.57 CMM의 처리유량을 가짐을 나타내며 이는 계획 처리유량인 700~800 CMM을 만족하는 결과이다.

5.2.3.2. 배출가스 중 습도

Table. 5.5. Relative humidity with water spray (Real scale, 800CMM)

Water spray	unit	Relative humidity
0	%	54
×		55

Table. 5.4는 펌프 가동 유무에 따른 배출가스 상대습도를 측정한 결과로 펌프 가동한 경우 54%, 펌프를 가동하지 않은 경우 55%로 액적 분사를 하였 을 경우 후단의 습식 다층 다단 임팩션 시스템에 의해 demister없이 장치외 부로의 액적 배출이 방지되었음을 알 수 있다.

5.2.3.3. 집진효율

Table. 5.5는 Real scale 집진 시스템이 처리유량 723.57 CMM에서 각각의 실험조건에 의한 집진효율 측정결과를 나타낸다. 물 분사를 하 였을 경우 평균값으로 99.02%의 집진효율을 나타낸다. 이는 Lab 및 Pilot scale 집진 시스템의 물분사 시 집진효율에 비해 0.8% 정도 낮은 결과 값을 보이는데 Lab 및 Pilot scale 집진 시스템에 비해 Real scale 집진 시스템에서 사용한 물 분사노즐이 직경이 커 분사되는 액적의 직 경 또한 크기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. Real scale 집진시 스템의 물 분사 노즐직경을 Pilot scale 집진 시스템에 비해 크게 선정 한 이유는 유량이 커짐에 따라 Pilot scale 집진 시스템에 비해 Real scale 집진 시스템의 시스템 내 유속이 커짐에 따라 미세액적이 장치 를 통과해 직접 유출될 가능성이 있기 때문이다. 물 분사와 전압인가 (20 kV)를 모두 적용하였을 경우 99.38%로 높은 집진효율을 나타낸다.

		unit	Inlet dust concentration	Outlet dust Concentration	Collection efficiency (%)
	1		3488.543	45.793	98.69
water spray	2	/ 3	7184.829	47.190	99.34
	Average		_	_	99.02
IT control		mg/m°	6694.133	44.204	99.34
water spray +			7766.142	48.486	99.38
applied voltage					

Table. 5.6. Collection efficiency (Real scale, 800 CMM)

5.3. 결 론

본 연구에서는 Lab scale (1.63 CMM) 건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임 팩션 시스템의 실험 결과를 바탕으로 tube 직경 12mm, tube 통과유속 v_t =15 m/s, 기준으로 Pilot scale (50 CMM) 및 Real scale (800 CMM급) 건· 습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템을 설계·제작하였다. 본 시스템의 압력손실, 집진효율 특성을 알아보기 위해 유입유속, 인가전압의 물리적 변수 를 통한 실험적 연구를 진행하였다.

- Pilot scale 집진 시스템에서 압력손실은 40, 50 CMM (tube 통과유속 v_t =12, 15 m/s)의 경우 97, 151 mmH₂O으로 Lab. scale 집진 시스템의 압력손실과 비교할 때 동일 tube 통과 유속에서 96, 150 mmH₂O으로 적정한 압력손실을 나타낸다.
- 2. Pilot scale 집진 시스템에서 집진효율은 40, 50 CMM (tube 통과유속 v_t = 12, 15 m/s), 물 분사를 하였을 경우 98.04, 99.63 %, 물분사와 전 압인가(30kV)를 하였을 경우 99.93, 99.71 %로 나타난다.
- 3. Real scale 집진 시스템에서 압력손실은 723.51 CMM (tube 통과유속 v_t
 = 13 m/s)의 경우 125.05 mmH₂O으로 나타낸다.
- Real scale 집진 시스템에서 배출가스 중 상대습도는 액적 펌프를 가동 했을 경우 54%, 펌프를 가동하지 않은 경우 55%로 배출가스 중 액적 배출이 없는 것으로 판단된다.

5. Real scale 집진 시스템에서 집진효율은 723.51 CMM (tube 통과유속 v_t
= 13 m/s)에서 물 분사를 하였을 경우 99.02 %, 물분사와 전압인가(20 kV)를 하였을 경우 99.38 %, IT Control을 통한 물분사량, 인가전압을 조정하였을 경우 99.34%로 나타난다.



Ⅶ. 결 론

전기 다층 다단 임팩션 시스템

전기 다층 다단 임팩션 시스템의 압력손실, 집진효율, 전압-전류 특성 등을 해석하기 위해 유입유속, stage 수, 튜브직경, 인가전압 방전극 형상 및 위치 등의 물리적 변수에 따른 실험적 연구를 수행하였다.

처리유량 1.63 m³/min(tube 통과유속 $v_t = 15$ m/s), tube 직경 12 mm 에서 전압을 인가하지 않았을 경우 96.2 %, 인가전압 30 kV일 경우 99.7 %의 집진효율로 전기력 의존도 5% 이내로 유지할 수 있었다. 기존 전기 집진장치는 전기력 의존도 100%에 의해 장치의 대형화 및 탈진 시 재비 산에 의한 효율 저하를 초래할 수 있는 반면, 본 건식 시스템은 5% 이 내의 전기 의존도에 의한 장치 소형화 및 안정적 고효율 (재비산 방지 시스템)을 유지할 수 있는 집진 시스템이다. 또한, 본 시스템은 여과 집 진장치의 필터 막힘 및 필터 교체에 의한 문제점을 해결하기 위해 필터 사용 없이 적정 압력손실 (148 mmH₂O) 및 고효율 (99.7%)로 안정적인 운용이 가능한 시스템인 것으로 판단된다.

건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템

건·습식 혼합형 전기 다층 다단 임팩션 시스템 개발 및 상용화를 위한 연구를 하고자 하였다. 따라서 Lab. scale (1.63 m³/min) 집진 시스템을 통해 실험변수에 따른 압력손실, 집진효율특성, 전류-전압 곡선 특성, NO₂ 및 SO₂ 제거효율 특성을 실험적 연구를 통해 결과를 해석하였으며, 이에 따른 실험결과를 토대로 본 시스템의 주요 설계변수인 tube 통과유 속, tube 직경, tube 및 플레이트 간 간격 등의 물리적 조건을 Lab scale 집진 시스템과 동일하게 유지 (동일 Reynolds 수, Stokes 수에 의한 동 일 유동특성, 입자운동 특성 유지)되도록 Pilot scale (50 m³/min) 및 Real scale (800 m³/min) 집진 시스템을 설계·제작하였다.

Lab scale 집진 시스템은 처리유량 1.63 m³/min에서 물분사 (액·가스 비 0.36 L/m³) 및 전압인가 (30 kV)를 하였을 경우 압력손실 150 mmH₂O, 입자상 오염물의 집진효율 99.9% 흡수액 (NH₄OH) 사용 시 SO₂, NO₂ 제거효율은 각각 70, 80 %를 나타냈다.

Pilot scale 집진 시스템은 처리유량 50 m³/min에서 물 분사 (액·가스 비 0.91 L/m³) 및 전압 인가 (30 kV)를 하였을 경우 145 mmH₂O의 압력 손실, 99.93%의 집진효율을 나타냄에 따라 Lab scale 집진 시스템의 실 험결과가 Pilot scale 집진 시스템에서 잘 구현되었으며 Real scale 집진 시스템으로 scale-up이 가능하다고 판단하였다. 이와 같은 결과를 바탕 으로 Real scale 집진 시스템을 설계·제작하였으며 실험결과 처리유량 723.51 m³/min에서 물 분사 (액·가스비 0.82 L/m³) 및 전압 인가 (20 kV)를 하였을 경우 압력손실은 125.05 mmH₂O, 집진효율은 99.02%이며 배출가스 중 상대습도는 물 분사를 한 경우 54%, 물 분사를 하지 않은 경우 55%로 장치 외부로 액적이 배출되지 않았다.

따라서 본 시스템은 처리유량 723 m³/min에서 액적 배출 방지를 위한 demister 설치 없이 장치 외부로의 액적 배출을 제로화하였고 적정 압력 손실 (125 mmH₂O)에서 낮은 액·가스비 (0.82 L/m³)로 고효율 (99.38%) 의 집진효율을 나타냈으며 향후 실제 산업현장에 투입 가능한 대용량 집 진시스템으로 상용화를 위한 기초 모델이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ahn, G. C., Kim, B. H. and Lee, G. S. (2002) The Improvement of Collection Efficiency of Electrostatic Precipitator, Journal of the KIIS, 17(4), 25–30.
- Bang, S. H. (2013) A comparison of electrical characteristics and collection efficiency of wet and dry ESP. Thesis for the Degree of Master of Engineering, Hanseo University, Korea. pp. 36.
- Beitez J. (1993) Process engineering and design for air pollution control, PTR Pretice Hall, pp. 331, 414.
- Cho, B. H. and Kim, J. H. (1990) Air pollution prevention technology. Dong Hwa Technology, pp. 23, 107–144, 260–286.
- Coker AK. (1993) Understand cyclone design. Chemical Engineering Progress. Dec. pp. 51–55.
- Cooper CD and Alley FC. (2004) Air Pollution Control: A Design Approach. Kim DS and Kim TO, ed. Donghwa Technology, Seoul, Korea, pp. 116–117.
- Croom, Miles L. (1994) Filter Dust Collectors Design and Application, McGraw-Hill, Inc.

- Hong, S. C. and Cho, Y. M. (1996) The Electrostatic Charges and Charge Distributions on Coal Fly ash. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 18(5), 563–572.
- Jeon, B. I. and Hwang, Y. S. (2014) Characteristics of Metallic and Ionic Concentrations in PM10 and PM2.5 in Busan. Journal of Environmental Science International, 23(5), 819–827.
- Ji, J. H., Bae, G. N. and Hwang, J. H. (2001) Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor. J. KOSAE, 17(6), 441–450.
- Kim, D. R., Song, C. G., Lee, J. B. and Kim, J. S. (2008) Characteristics of Heavy Metallic Composition during Asian–Dust Event Focusing on March in 2007. Proceeding of the 46th Meeting of KOSAE(2008), Korean Society for Atmospheric Environment. pp. 372–374.
- Kim, C. L., Kwon, S. A., Lee, S. J. and Ko, C. B. (2013) Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 29(2) pp. 163–170.
- Kim, H. J., Han, B. W., Cho, G. B. and Hwang, S. C. (2013) Performance test of a simultaneous PM and SOx removal system for marine diesel engines. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers_B, 5, pp. 104–105.
- Kim, K. D., Cho, Y. S. and Yoa, S. J. (2002) Collection Characteristics of Multi-stage Porous Plate System with Impaction Effect. J KSEE, 24, 5, pp. 789–799.
- Kim, Y. J., Ha, B. K. Jeong, S. H., Hong, W. S., Yoa, S. J. and Yoo, J. S. (2001) A study of the Collection Characteristics of a Wide Plate-Spacing Electrostatic Precipitator I. Effect of Plate Spacing and Type of Discharge Electrode –. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 10, pp. 939–946.
- Kim, Y. J., Ha, B. K., Jeong, S. H., Hong, W. S., Ha, D. H. and Yoo, S. J. (2001) A study of the Collection Characteristics of a Wide Plate-Spacing Electrostatic Precipitator II. Effect of Wave Form of Pulse Energization –. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 1059–1064.
- Kohl, R. E. and Meinders, J. R. (1993) First ESP with Wide Plate Spacing Applied to a Cyclone Fired Boiler, Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conference on Electrostatic Precipitation, Washington, DC, USA, Vol. 1, pp. 11–15.
- Koo, J. H., Kim, M. C., Park, S. C., Park, T. S., Ahn, B. G., Oh, S. W., Lee, G. S. and Lee, S. J. (2006) Atmosphere Environmental Device Design II", Dong Hwa Technology, Seoul, Korea, pp. 226–233.

- Launder B. E. and Spalding D. B. (1979) Lectures in Mathematical Models of Turbulence.
- Lee, H. S. (1995) A Theoretical Study of Fabric Filter Characteristics. The Journal of Applied Science Technology, Vol. 4, No. 1, pp. 93–103.
- Lee, Y. C. and Doo, H. W. (2011) A Study on the IMO Regulations regarding GHG Emission from Ships and its Implementation. Journal of Navigation and Port Research, 35(5), 371–380.
- Lee, J. J. and Kim, J. H. (1997) Experimental Electrostatic Precipitator Design Studies : Effects of the Discharge Electrode Shapes on the Collection Efficiency. Bull Nat Sci. Yongin Univ, 2(2), 103–110.
- Makkonene, U., Hellen, H., Anttila, P. and Ferm, M. (2010) Size distribution and chemical composition of airborne particles in south-eastern Finland during different seasons and wildfire episodes in 2006. Sci. Total Environ., 408, 644–651.
- Oglesby, S. and Nichols G. B. (1970) A Manual of Electrostatic Precipitator Technology : Part I, Fundamentals. NtIS PB 196380, APTD 0610, National Air Pollution Control Administration, Cincinnati, Ohio, pp. 55–73

- Oglesby, S. and Nichols G. B. (1978) Electrostatic Precipitation, MARCEL DEKKER Inc., New York, USA, pp. 1–10.
- Oh, S. H., Kim, H. K. and Yoo, B. H. (2006) An Experimental Study on the Emission Characteristics of Diesel Particulate Matter. Proceedings of the Korean Society of Marine Engineers Conference, pp. 93–94.
- Parker C. (1995) Aerosol science and technology. Kim SD, KIm JH and Kim TS, ed. McGraw-Hill Inc. pp. 145.
- Robinson, M. (1971) Electrostatic Precipitation in Air Pollution Controled, W. Strauss, part I, Wiley-Interscience, New York.
- Sawyer C. N. , McCarty and Perry L. (2008) Chemistry for Environmental Engineering and Science, 5th Edition, McGraw-Hill, pp. 25–27.
- Seader J. D. and Henley J. E. (2006) Separation process principles (2nd edition). John Wiley & Sons, New York, U.S.A. pp. 108
- Seo G. S., Kim M. C., Kim S. C., Kim T. S., Son B. S., Yoon Y. H., Jung J. D. and Choi S. B. (2015) Air pollution control. Goomi, PP 384–386, 404.

- Shin, Y. C. (2005) Estimating Damage Cost of Dust-Sand Storm in Korea. Environmental and Resource Economics Review, 14(3), 673–697.
- Smith, W. B., and McDonald, J. R. (1976) Development of a Theory for the Charging of Particles by Unipolar Ions, J. Aerosol Sci., 7, 151–166.
- White, H. J. (1963) Industrial Electrostatic Precipitation, Palo Alto; Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp. 155–159.
- Willeke K. and Baron A. P. (1993) Aerosol measurement. Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., pp. 119
- Yoa, S. J. (2004) Study on th Collection Characteristics of Multi-stage Porous Plate System. Ministry of Trade, Industry & Energy, 11–14.
- Yoa, S. J. and Jang, C. I. (2014) Collection Characteristics of wet-type rotating porous disk system for air pollutants removal of marine diesel engines. Journal of Korean Society Fish Technology, 50(3), 318–325.
- 이정주, 김종호, 도연지. (1996) 전기집진기 효율향상을 위한 방전극 인가전 압 특성에 관한 연구. 용인대학교 논문집, Vol. 12.

조용수. (2002) Hybrid 집진 시스템의 최적 설계에 관한 연구, 박사학위논

문, 부경대학교.

- 천만영, 신은상, 강병욱, 강공언, 김대근. (2010) 「대기오염방지기술」. 신 광문화사, 한국, pp. 204-273.
- 하병길. (1999) Pilot 電氣集塵機를 利用한 高 比抵抗 石炭 Fly ash의 集塵 效率 改善에 關한 研究. 박사학위논문, 부경대학교.

