

광폭 전기집진기의 집진특성에 관한 연구 — I. 집진판 간격과 방전극의 영향 —

김 용 진[†], 하 병 길, 정 상 현, 홍 원 석, 여 석 준^{*} 유 주 식^{**}
한국기계연구원 열유체환경연구부, ^{*}부경대학교 환경공학과, ^{**}안동대학교 기계공학교육과

A Study on the Collection Characteristics of a Wide Plate-Spacing Electrostatic Precipitator — I. Effect of Plate Spacing and Type of Discharge Electrode —

Yong-Jin Kim[†], Byung-Kil Ha, Sang-Hyun Jeong,
Won-Seok Hong, Seok-Jun Yoo^{*}, Joo-Sik Yoo^{**}

Korea Institute of Machinery & Metals, 171 Jangdong, Yusong, Daejeon 305-343, Korea

^{}Department of Environmental Engineering, Bukyoung National University, Busan 608-737, Korea*

*^{**}Department of Mechanical Engineering Education, Andong National University, Andong 760-749, Korea*

(Received March 29, 2001; revision received July 25, 2001)

ABSTRACT: This study investigates the electrical and collection characteristics of a wide plate spacing electrostatic precipitator (ESP), using a pilot-scale one. Electrical operating characteristics and collection efficiency were measured for various shapes of discharge electrodes. The collection plate spacing ranged from 300 to 550 mm. Results of electrical characteristic and collection efficiency tests as a function of collection plate spacing, discharge electrode type, applied voltage, and particle diameter were obtained. Increasing the collection plate pitch and altering the corona electrode geometry was found to increase the collection efficiencies without increasing input power requirement. The best efficiency is achieved for the discharge electrode of twisted pin type.

Key words: Wide plate spacing electrostatic precipitator(광폭 전기집진기), Corona current(코로나 전류), Discharge electrode(방전극), Collection efficiency(집진효율)

기 호 설 명

E_{avg} : 평균 전계강도 [kV/m]

I : 전류 [mA]

T_g : 가스의 온도 [°C]

V_g : 가스의 속도 [m/s]

V : 전압 [kV]

P : 전기집진기 소비전력 [W]

Q : 유량 [m³/min]

SCP : 비코로나 전력 [W·min/m³]

1. 서 론

전기집진기는 대량의 배기가스를 처리할 수 있고 구조적으로 매우 단순하며 유지 및 보수가 용이하므로 대기로 방출되는 입자상 오염물질들을 제거하는 장치로 널리 사용되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 특히

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7475; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: yjkim@kimm.re.kr

수백 MW의 전력을 생산하는 석탄 화력발전소에 있어서는 플라이 애쉬를 제거하는 가장 경제적인 수단으로 사용되고 있다. 석탄 플라이 애쉬의 특성은 석탄의 화학적인 구성과 연소방법 및 연소 조건에 따라 다양하게 나타난다. 특히 황 함유율이 낮은 석탄으로부터 생성되는 플라이 애쉬의 전기저항은 집진기의 운전시에 역전리(back ionization)를 생성시킬 정도로 매우 높은 것으로 알려져 있다.

역전리는 집진된 분진층에 형성된 불평등 전계가 파괴되는 현상으로 집진판에 부착된 분진의 재비산을 동반한다. 이로 인하여 유동가스 속으로 분진이 재유입되어 집진효율이 감소하게 된다. 이와 같은 전기 비저항이 높은 분진의 역전리 문제를 해결하기 위한 기술적인 방안으로 고온 전기집진기와 섬유필터를 사용하였다. 그러나 이 방법들은 비경제적이며 때때로 2차적인 오염 문제를 유발하기도 한다. 고 비저항 분진의 집진 효율을 개선하는 데 효과적인 방안으로 역전리 억제효과가 있는 광폭 전기집진기(wide plate-spacing electrostatic precipitator, WPEP)와 이동전극형 전기집진기(moving electrode electrostatic precipitator, MEEP)가 사용된다.⁽⁵⁻¹⁰⁾

일반적으로 전기집진기의 성능은 비집진면적(specific collection area)의 크기에 의존한다. 이로 인하여 종래의 집진기 설계자들은 높은 집진 효율을 얻기 위하여 동일한 집진거리에 대하여 비집진면적을 증가시키는 것에 설계의 관점을 두었다. 즉 집진판 사이의 거리를 감소시켜, 집진판 간격을 주로 250~300 mm로 하여 설계하였다. 집진판 간격을 광폭화시킨 광폭 전기집진기의 가장 큰 특성은 집진판 간격의 증가로 인한 비집진면적의 감소에도 불구하고 집진효율은 비집진면적이 큰 경우에 비하여 최소한 같거나 높게 나타난다는 것이다. 최근에 설치비를 절감하고 집진 성능을 개선하며 집진기의 케이스를 확장하지 않고 집진판 간격을 300 mm에서 560 mm까지 넓히기 위해 많은 연구가 수행되고 있다.⁽⁸⁻⁹⁾ 따라서 적절한 방전극 구조와 집진판 간격은 고성능 광폭 전기집진기를 설계하기 위한 중요한 요인이다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 파일럿(pilot) 규모의 광폭 전기집진기를 제작하여 고 비저항 석탄 플라이 애쉬의 집진효율을 개선하기 위한 연구를 한다. 먼저 Part I에서는 집진판 간격과 방전극 형상이 집진

특성에 미치는 영향을 조사하고, 다음으로 Part II에서는 인가전압 파형에 따른 전류-전압 및 집진효율 특성을 조사한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 개요

고 비저항 석탄 플라이 애쉬의 집진효율 개선을 위한 파일럿 규모의 전기집진기는 석탄 화력발전소용 광폭 전기집진기의 기본적인 집진/방전부의 고효율화 개발모델에 대하여 Fig. 1과 같이 설치하였다. 본 시스템은 석탄 화력발전소의 처리 가스용량을 기초로 최대 2.5 MW급의 용량으로 처리 기체의 온도를 300°C까지 가능하도록 설계하였다.

본 연구에서 사용되는 Pilot 광폭 전기집진기 및 실험시스템의 전경은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 시스템의 전체 길이는 약 25m이며, 높이는 지상으로부터 4.8m에 이른다. 시스템은 크게 버너 및 기체 혼합로(furnace)로 구성되는 고온기체 공급시스템, 플라이 애쉬(fly ash)를 비롯한 시험 분진을 저장하는 사이로와 유입 덕트에 분진을 공급하는 분진 발생/공급 장치, 유속 및 집진, 전기특성을 실험하기 위한 전기집진기 본체, 고전압을 각각의 전기집진기에 독립적으로 공급하는 고전압시스템, 유량을 제어하는 I.D. 팬, 유량조절댐퍼, 시스템 및 전기집진장치의 전반적인 운영을 제어하는 제어반, 그리고 실험시 배출되는 분진을 포집하는 멀티 싸이클론과 백필터 등으로 구성된다.

광폭 전기집진기의 본체는 2레인(lane)으로 구성되며, 내부에는 집진판, 방전극, 고전압 공급장치, 절연 애자 및 케이싱 등으로 구성된다. 그리고 집진극은 상하에서 고정할 수 있도록 하여 전체적인 간격을 일정하게 유지할 수 있도록 하였으며 이때의 간격을 임의로 변화시킬 수 있도록 하였다. 방전극 프레임을 지지하는 지지대 상단에는 집진기 몸체와 전기적으로 절연시키기 위해 콘(cone) 모양의 세라믹 애자를 설치하였다. 이때의 애자실은 히터와 압축공기 주입에 의하여 항상 고온의 청정 표면을 유지하도록 제작하였다. 이때의 유량은 전체 전기집진기 유량의 5%에 해당되고 예열에는 약 2시간 정도가 소요된다. 주

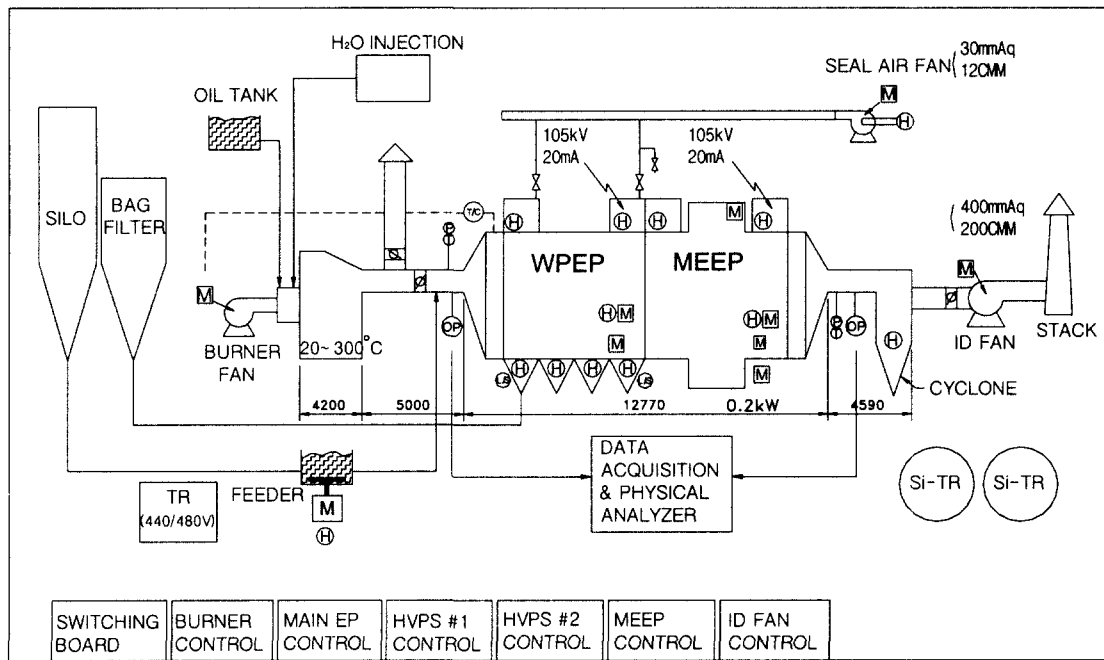


Fig. 1 Schematic of an experimental system.

요 사양을 Table 1에 나타내었다.

집진기의 제어는 그림의 하단에 있는 EP 제어 반에서 하게 되며 집진기에 인가되는 (-)의 고전압은 Si-Tr에서 발생하게 되고 발생된 고전압은 집진기 상부에 있는 애자실을 통과하여 방전극으로 유입된다. 본 실험에서 사용한 분진은 전기저항이 $3.5 \times 10^{11} \Omega\text{-cm}$ 의 값을 가지며, 입경은

0.2~15 μm 의 영역의 분포를 가지는 석탄 연소 플라이 애쉬이다. 분진은 분진공급장치에 의하여 집진기 본체의 좌측 유입구 덕트에 유입되게 되고 덕트 내부의 유동 혼합기에 의하여 일차 혼합되며 유입확대관에 설치되어 있는 유동분산장치에 의하여 집진기 내부로 균일하게 분산되어 유입하게 된다. EP 내부로 유입된 분진은 방전극과 집진극의 강한 전기에 의하여 포집되며 포집된 분진은 추타에 의하여 호퍼로 제거된다. 이때 유입·유출 덕트에서의 분진농도는 유입 덕트와 유출 덕트에 설치되어 있는 Opacity meter에 의하여 측정되고 측정된 신호는 데이터 수집/처리 P/C 시스템으로 전송되어 집진효율이 산정된다.

한편, 유속과 온도는 유입구 측에서 측정되어 데이터 수집 시스템으로 전송되고 입경별 집진효율은 유입확대부와 유출축소부에서 샘플링 시스템과 APS(Aerodynamic Particle Sizer)에 의하여 측정되어 데이터 처리 시스템에 의하여 처리된다.⁽¹¹⁾

Table 1 Specification of a wide plate spacing electrostatic precipitator

Description	Specification
Type	Dry, Horizontal gas flow
Plate height	1,950 mm
Plate spacing	300~500 mm
Number of fields	1
Number of gas passages	1~2
Plate length (1 field)	2,915 mm
Nominal flow rate	180 m ³ /min
Nominal gas velocity	1.2 m/s
Nominal gas temperature	120°C
Discharge electrode voltage	-105 kV
Discharge electrode current	20 mA

2.2 집진판 간격에 따른 집진효율 측정

집진효율을 측정하기 전에 집진기 내부의 고전압에 대한 안정성을 알아보고 인가전압을 예측하

기 위하여 실내 온도(air load)에서의 인가전압에 대한 코로나 전류를 측정한다. 그리고 유속과 온도를 실험조건에 맞춘다. 실험유동조건이 완료되면 먼저 분진이 없는(gas load) 상태에서 인가전압과 코로나 전류를 측정하고 다음에는 분진유입시(particle load)의 인가전압과 코로나 전류를 측정한다.

전압-전류 곡선에 의하여 안정성이 있는 최고의 전압을 인가전압의 한계로 하여 집진판 간격의 영향을 비교할 수 있는 전계강도별로 집진효율을 측정한다. 인가전압은 가능한 높은 전압을 인가하고자 하였으며 동일한 조건에서 집진효율을 비교하기 위하여 평균 전계강도 340, 280 및 200 kV/m를 집진판 간격별로 인가하였다. 인가전압의 상한은 break down voltage보다 낮은 다소 안정된 인가전압을 취하였는데 이는 집진기 내부의 spark에 의하여 고전압 하전장치 및 각종 계측기가 교란됨으로 인하여 실험수행의 어려움 때문이다. 이와 같은 이유로, 다소 높은 인가전압에 대하여는 실험이 매우 어려웠으나 방전극들의 비교를 위하여 위에서 말한 바와 같은 전계강도를 기준으로 하여 실험을 수행하였다.

집진효율은 운동 입경을 이용하여 0.4 μm 에서부터 입경별 갯수를 측정할 수 있는 APS를 사용하여 전기집진기 본체의 전·후단부에 위에서부터 아래로 일정간격의 6지점을 취하여 샘플링 포트브를 1 lane과 2 lane의 중심부에서부터 중심부까지 즉 방전극에서 방전극까지의 거리만큼 이송시키면서 측정한다. 이는 종적인 농도분포의 불균일에 의한 오류를 피하기 위하여 종으로 6지점을 취하고, 횡적인 지점들의 불균일한 농도분포에 의한 샘플링의 오류를 피하기 위하여 이송시키면서 측정하는 것이다. 이렇게 샘플링된 입경

별 갯수를 전단과 후단 각각에 대하여 산술 평균하여 각각의 입경별 갯수에 대한 집진효율을 산정함으로써 입경별 집진효율을 구한다. 본 실험에서의 집진효율은 동일조건에 대하여 3번을 측정하여 평균하였으며, 이에 대한 실험오차는 대략 3% 이내로 나타났다. 집진판 간격에 따른 집진효율 측정과 방전극효과 실험에 대한 조건을 Table 2에 요약하였다.

2.3 방전극 비교실험

방전극 형상이 집진효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 RT(rectangular), ST(saw tooth) 및 TP(twisted pin and pipe)형의 세 종류의 방전선에 대한 실험을 하였다.

방전극 비교실험은 집진판 간격실험에서 가장 높은 집진효율을 나타내는 450 mm의 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 집진판 간격에 따른 집진효율을 측정하는 것과 같이 입경별 집진효율을 측정하고 이와 동시에 분진농도 모니터로 집진효율을 측정하였다. 또한 방전극 비교실험에는 SCP를 사용하였다. 방전극을 교체할 때에는, 방전판은 최전단의 방전 와이어 두 개만 달리하므로 방전판 전체를 교체하지 않고 두 와이어 부분만을 교체하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 전기적 특성

먼저 전기집진기의 전기적인 특성을 조사하기 위하여 인가전압과 코로나 전류와의 관계를 Fig. 2~4에 나타내었다. Fig. 2는 전기집진기에 가장 널리 사용되고 있는 RT형 방전극에 있어서의 집진판 간격에 따른 전압-전류 특성을 나타낸다. 코로나 전류는 인가전압의 증가와 함께 증가하며 집진판 간격이 좁을수록 동일인가전압에서의 코로나 전류가 증가한다.

Fig. 3은 ST형 방전극을 사용한 전기집진기에 인가된 평균 전장(인가전압/극간거리)과 그에 따른 코로나 전류 특성을 나타내고 있다. 이 경우에는 집진판 간격에 의한 차이가 적으며 집진판 간격이 증가할수록 코로나 전류가 높아진다.

다음에는 여러 가지의 방전극(RT, ST, TP형)에 대한 V-I 특성을 조사하여 Fig. 4에 나타내었

Table 2 Experimental conditions

Particle	Fly ash
Discharge electrode	RT, ST, TP
Plate spacing	300, 400, 450, 500 mm
Applied electric field	320, 280, 240 kV/m
Burner type	Light oil
Temperature	120°C
Gas velocity	1.1 m/s
Particle load	5 g/m ³
High voltage power supply	SPC, MPC

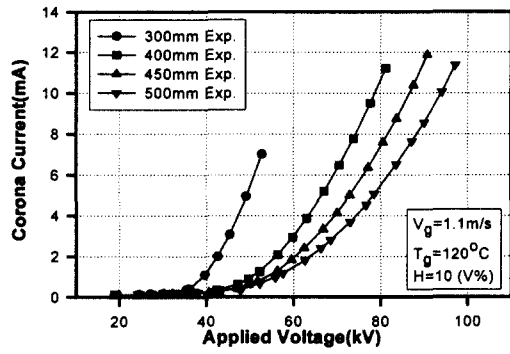


Fig. 2 Corona current as a function of applied voltage for several plate spacings (300 mm, 400 mm, 450 mm, 500 mm) with a discharge electrode of rectangular type (RT).

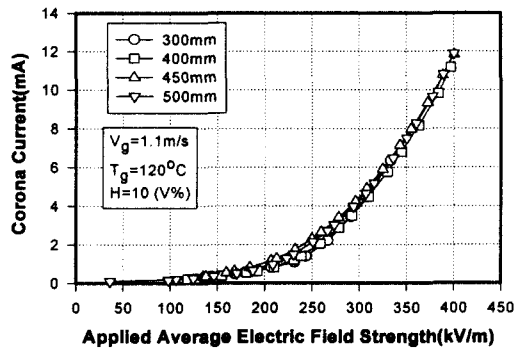


Fig. 3 Corona current as a function of applied average electric field strength for several plate spacings with a discharge electrode of saw tooth type (ST).

다. 이 결과에서는 집진판 간격이 좁을수록 코로나 개시 전압과 spark-over 전압이 하락한다는 것을 알 수 있다. 그리고 동일한 인가 전압에 대해서 집진판 간격이 넓을수록 코로나 전류가 낮아진다. 방전극의 종류에 대해서 살펴보면, ST형 방전극의 코로나 전류가 가장 높고 다음으로 TP형 방전극이며 RT형 방전극이 가장 낮은 코로나 전류를 갖는다. ST형 방전극에 있어서는 방전극의 날카로운 모서리가 집진판을 향하고 있기 때문에 전압-전류 곡선이 가장 큰 기울기를 보여준다. 그러나 집진판 간격이 증가함에 따라 방전극의 형상에 따른 전압-전류 특성의 차이는 점차적으로 감소한다.

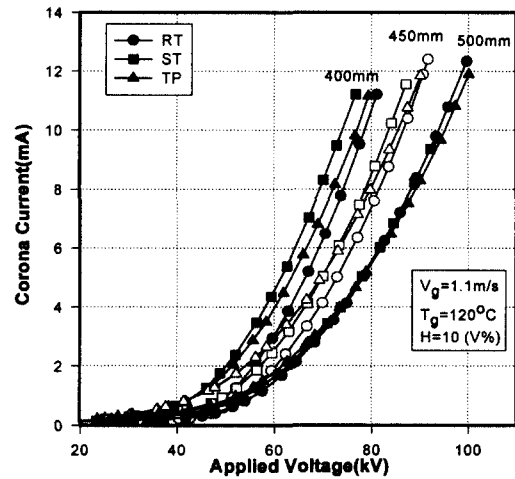


Fig. 4 Corona current as a function of applied voltage for the discharge electrodes of RT, ST, and TP types.

3.2 집진효율 특성

동일한 평균 전기장도 340, 280 및 200 kV/m에 대하여 집진판 간격별로 집진판 간격과 방전극 형상에 따른 플라이 애쉬의 집진효율을 측정하였다. Fig. 5에 RT형 방전극에 대한 실험결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인가전장이 증가함에 따라 집진효율이 전체적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고, 전기집진기의 집진효율

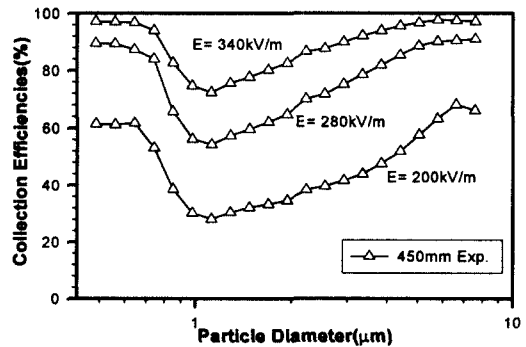


Fig. 5 Collection efficiency as a function of particle diameter for several average electric field strength of 200 kV/m, 280 kV/m, and 340 kV/m with a discharge electrode of rectangular type (RT) and a 450 mm plate spacing.

은 입자의 전기력과 유체의 저항에 따라서 결정되는데, 일반적으로 입경 $0.1\ \mu\text{m}$ 이상의 입자 영역에서 집진효율은 입경에 따라 감소하다가 증가되는 특성을 가지며,⁽¹²⁾ 이에 따라 최소의 집진효율을 갖는 입경 영역이 존재한다. 본 실험에서는 그림에서 보는 바와 같이 동일 전장에서 집진효율이 입경 $1\ \mu\text{m}$ 부근의 영역에서 가장 낮으며 이보다 입경이 큰 경우에는 입자의 직경이 증가함에 입자의 하전량이 입경의 제곱에 비례하여 급격히 증가하므로 집진효율이 증가한다. 또한 분진입경이 작아지면 확산하전이 증가되는 반면에 유체에 대한 입자의 항력이 상대적으로 감소되므로 입자의 전기적 이동속도(migration velocity)가 증가되어 집진효율은 입경이 작아질수록

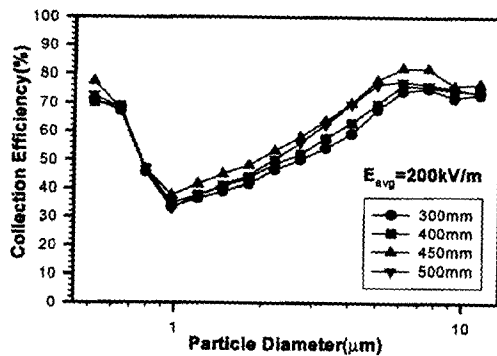


Fig. 6 Collection efficiency as a function of particle diameter for several plate spacings with a discharge electrode of TP type.

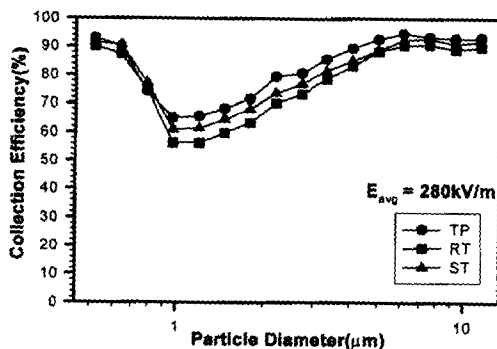


Fig. 7 Collection efficiency as a function of particle diameter for the discharge electrodes of TP, RT, and ST types with plate spacing of 450 mm.

증가하게 된다.⁽¹²⁾

Fig. 6은 TP형 방전극의 집진판 간격별 집진효율을 나타내는 것인데, 여기에서는 집진판 간격 450 mm에서 집진효율이 가장 높은 것을 볼 수 있다. 그리고 방전극의 종류별 집진효율을 알기 위하여 집진판 간격 450 mm에 대한 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 TP형의 방전극의 경우가 집진효율이 가장 높으며 RT형의 집진효율이 가장 낮음을 볼 수 있다. 전기집진기에서 방전극의 변화에 의하여 영향을 주는 것으로는 전장의 세기분포와 코로나 전류값이 있다. Fig. 4에서의 ST형의 방전극의 경우가 코로나 전류값은 높더라도 TP형에 비하여 집진효율이 Fig. 7에서 오히려 낮은 것은 TP형의 방

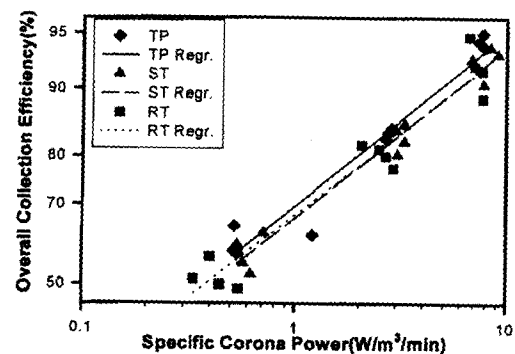


Fig. 8 Overall collection efficiency as a function of specific corona power for the discharge electrodes of TP, ST, and RT types with plate spacing of 450 mm.

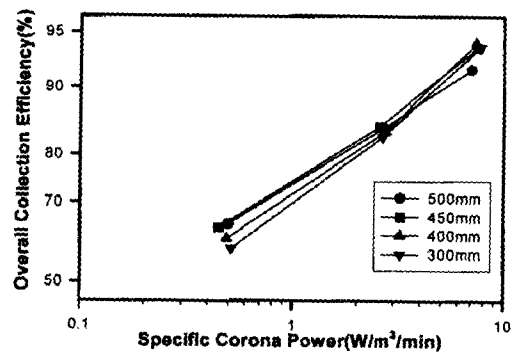


Fig. 9 Overall collection efficiency as a function of specific corona power for several plate spacings with a discharge electrode of TP type.

전극의 중심부 원통 실린더에 의한 전장분포가 ST에 비하여 강화되기 때문으로 생각된다.

다음에는 집진판 간격과 방전극 종류 및 전계 강도별로 측정된 비코로나 전력에 대한 총괄 집진효율을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 전기집진기에 있어서 비코로나 전력은 집진기의 성능을 검토하는 중요한 변수 중의 하나이다.⁽⁶⁾ 집진판 간격이 동일하지 않은 경우에는 동일한 소비전력이라 하더라도 그 처리유량이 다르므로 비교가 곤란하다. 따라서 전기집진기에 인가되는 전압과 그때의 코로나 전류로 나타나는 전력을 유량으로 나눈 값인 비코로나 전력, SCP(specific corona power)를 사용하여 집진효율 성능을 조사한다.

Fig. 8은 집진판 간격과 방전극 종류별 집진효율의 비교를 위하여 SCP에 대한 3번씩의 총괄 집진효율을 측정하여 평균한 값(오차 3% 이내)을 나타낸 것으로, 전반적으로 비코로나 전력의 증가에 대한 집진효율의 증가율은 3방전극 모두 비슷한 경향을 보였다. 그러나, 그림에서 보면 입경별 집진효율과 마찬가지로 TP형 방전극의 집진효율이 상대적으로 다소 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 TP형의 경우 강체형의 중간지지 파이프(pipe)에 의한 전장(electric field)을 강화시킴과 동시에 핀(pin)에 의한 집중적인 코로나 전류의 발생으로 전장과 하전전류를 모두 강화시켜 컬룸력을 증가시키고 이에 따라 집진효율의 증가결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

끝으로 Fig. 9에는 여러 가지의 집진판 간격에 대해 TP형 방전극에 대한 총괄 집진효율을 조사하여 나타내었다. Fig. 9에서 최대 집진효율은 집진판 간격 450 mm에서 나타난다. SCP가 낮은 영역에서는 집진판 간격이 좁은 경우가 가장 집진효율이 낮다. 그러나 스파크 개시 전압에 가까운 SCP 영역에서는 집진판 간격에 따른 집진효율의 차이가 감소한다. 일반적으로 전기집진기의 집진판 간격이 높을수록 하전입자의 영향에 의하여 평균적인 공간 전장, 특히 벽면 주위에서의 전장의 세기가 증가된다고 알려져 있으며,^(7,8,10) 또한 잘 알려진 도이취 식에 의하면⁽¹⁻⁴⁾ 판 간격이 증가할수록 주유동속도에 대한 이동속도의 영향으로 집진효율이 감소되는데, 이상의 두 상반효과에 의하여 주어진 판 간격 및 방전극에 대하여 최대의 집진효율을 가지는 영역이 존재함을 유추할 수 있는데, 이 결과로부터 방전극과 집진

판 간격을 적절하게 조절함으로써 석탄 플라이 애쉬의 집진효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

실험실 규모의 광폭 전기집진기를 제작하여 집진판 간격과 방전극 형상이 집진특성에 미치는 영향을 조사하였다. 이상에서 코로나 전류는 인가전압의 증가와 함께 증가하며, 주어진 방전극에 대하여, 집진판 간격이 좁을수록 동일 인가전압에서의 코로나 전류가 증가한다. 그리고 ST형, TP형, RT형 방전극 가운데에서 ST형 방전극의 코로나 전류가 가장 높고, RT형 방전극은 가장 낮은 코로나 전류를 가진다. 그리고 집진효율에서는 인가 전장의 증가에 따른 증가효과가 크게 나타나며, 또한 본 실험에서는 TP형의 방전극의 경우가 주어진 소비전력에 대하여 가장 높은 집진효율을 나타냈으며, RT형의 경우가 상대적으로 가장 낮은 값을 나타낸다. 그리고 본 실험의 영역에서는 입자의 지름이 약 1 μm 부근에서 가장 낮은 집진효율을 나타내며 이 값을 전후하여 입자의 지름이 감소하거나 증가하면 집진효율이 증가하는 특성을 보였다. 그리고 비코로나 전력의 증가에 따른 집진효율의 증가율은 방전극의 종류에 관계없이 거의 같은 증가율을 갖는다.

후 기

본 연구는 환경부 G7 연구의 일환으로 수행되었으며, 환경부 및 두산중공업(주)의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Oglesby, S. and Nichols, G. B., 1978, Electrostatic Precipitation Technology, Marcel Dekker Inc., New York.
- Robinson, M., 1971, Electrostatic Precipitation, in Air Pollution Control, ed. W. Strauss, Part 1, Wiley-Interscience, New York.
- White, H. J., 1963, Industrial Electrostatic Precipitation, Palo Alto: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., pp. 155-159.

4. Lloyd, D. A., 1988, *Electrostatic Precipitator Handbook*, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia.
5. Kim, Y. J., Jeong, S. H., Hong, W. S., Ha, B. K., Cho, S. S. and Ham, B. H., 1998, Effect of the Plate Spacing and Discharge Electrode Shape on the Efficiency of Wide Plate Spacing Electrostatic Precipitator, *Proceeding of 7th International Conf. of ESP*, pp. 590-595.
6. Kim, Y. J., Jeong, S. H., Hong, W. S., Ha, B. K., Whang T.K., Moon, S. C., Cho, S. S. and Ham, B. H., 1998, Experimental Study on Wide Pitch Electrostatic Precipitator, *Korea Air Pollution Research Association Conference Abstract*, pp. 219-220.
7. Kim, Y. J., Jeong, S. H., Hong, W. S., Ha, B. K., Ham, B. H. and Moon, S. C., 1996, Role of Electrostatic Precipitator Design Parameters on Coal Fly Ash Collection Efficiency, *Proc. of AAAR 15th Annual Conference*, p. 91.
8. 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. 1-15.
9. Pajak, J. R., 1996, Rigid Discharge Electrode & Wide Spacing Electrostatic Precipitators in Poland, *Proc. 6th International Conference on Electrostatic Precipitation*, Budapest, Hungary, pp. 100-105.
10. Rea, M. and Bogani, V., 1993, Influence of the Electrode Geometry and of the Operating Characteristics on the Efficiency of Electrostatic Precipitators, *Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth International Conference on Electrostatic Precipitation*, Washington, DC, USA, Vol. 1, pp. 221-228.
11. Ha, B. K., 1999, Improvement of Collection Efficiency for High Resistivity Coal Fired Fly Ash with Pilot-scale Electrostatic Precipitator, Ph.D. Thesis, Pukyong National University.
12. Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., 1988, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, Chap. 7, pp. 411-432.