

이동 전극형 전기집전기의 집진특성에 관한 연구

– I. 집진판 이동 속도의 영향 –

김 용 진[†], 하 병 길, 정 상 현, 문 상 철*, 유 주 식**

한국기계연구원 환경기계기술연구부, *두산중공업(주) 환경설비설계실, **안동대학교 기계교육과

A Study on the Collection Characteristics of a Moving Electrode Electrostatic Precipitator

– I. Effect of Collection Plate Velocity –

Yong-Jin Kim[†], Byung-Kil Ha, Sang-Hyun Jeong, Sang-Cheol Moon*, Joo-Sik Yoo**

Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jangdong, Yusung, Daejeon 305-343, Korea

*Doosan Heavy Industries & Constructions Co., LTD., P.O. Box 77, Changwon 641-792, Korea

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

(Received March 11, 2004; revision received July 30, 2004)

ABSTRACT: This study investigate the effect of collection plate velocity on the electrical and collection characteristics of a moving electrode electrostatic precipitator (MEEP). Though a high resistivity fly ash is attached at the collecting electrode, the MEEP has very stable characteristics of voltage and corona current. Collection efficiency, corona current, and overall collection efficiency are increased, as the magnitude of the collection plate velocity increases.

Key words: Moving electrode electrostatic precipitator(이동 전극형 전기집전기), Collection plate(집진판), Corona current(코로나 전류), Collection efficiency(집진효율)

기호설명

D_p	: 입자의 지름 [μm]
I	: 전류 [mA]
T_g	: 가스의 온도 [$^\circ\text{C}$]
V	: 전압 [kV]
V_p	: 집진판의 이동속도 [m/min]
W_p	: 집진판 간격 [mm]
ρ_p	: 입자 밀도 [g/m^3]

1. 서 론

전기집전기는 대량의 배기가스를 처리할 수 있고 구조적으로 매우 단순하며 유지 및 보수가 용이하므로 대기로 방출되는 입자상 오염물질들을 제거하는 장치로 널리 사용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 특히 수백 MW의 전력을 생산하는 석탄 화력발전소에 있어서는 플라이 애쉬를 제거하는 가장 경제적인 수단으로 사용되고 있다. 석탄 플라이 애쉬의 특성은 석탄의 화학적인 구성과 연소방법 및 연소조건에 따라 다양하게 나타난다. 특히 황 함유율이 낮은 석탄으로부터 생성되는 플라이 애쉬의 전기저항은 집진기의 운전시에 역전리(back ionization) 또는 역코로나(back corona)를 생성시킬 정도로 매우 높은 것으로 알려져 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7475; fax: +82-42-868-7284

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

역전리는 집진판에 부착된 분진층에 의하여 발생하므로 역전리를 억제하기 위하여 탈진율을 높혀 분진층의 두께를 감소시킴으로써 역전리를 방지 또는 감소시킬 수 있다. 탈진율을 높이는 방법으로는 추타식의 경우 추타강도를 높이면 된다. 그러나 추타강도가 높을 경우 추타장치와 집진판의 내구성에 문제를 일으킬 수 있으며 추타강도를 높게 하여도 근본적으로 집진판에 부착된 분진은 제거되지 않는다. 이와 같은 이유로 집진판에 부착된 분진을 깨끗이 탈진시킬 수 있는 방법이 필요하게 되었고 이동전극형 전기집진기가 비저항이 높은 분진의 집진효율을 개선을 위하여 개발되었다.

이동전극형 전기집진기는 집진판에 부착된 고비저항 분진의 분진층에서 발생하는 역전리를 억제하기 위하여 집진판을 회전하는 브러쉬로 탈진하는 것으로 분진의 제거효율이 매우 높기 때문에 역전리를 억제하는 데 적합하다. 이동전극형 전기집진기는 일본의 Hitachi에서 1979년 개발되었으며 이에 대한 연구와 현장 적용이 지속적으로 진행되고 있다.⁽⁴⁾

고비저항 분진의 집진효율을 개선하는 데 효과적인 방안으로 역전리 억제효과가 있는 광폭 전

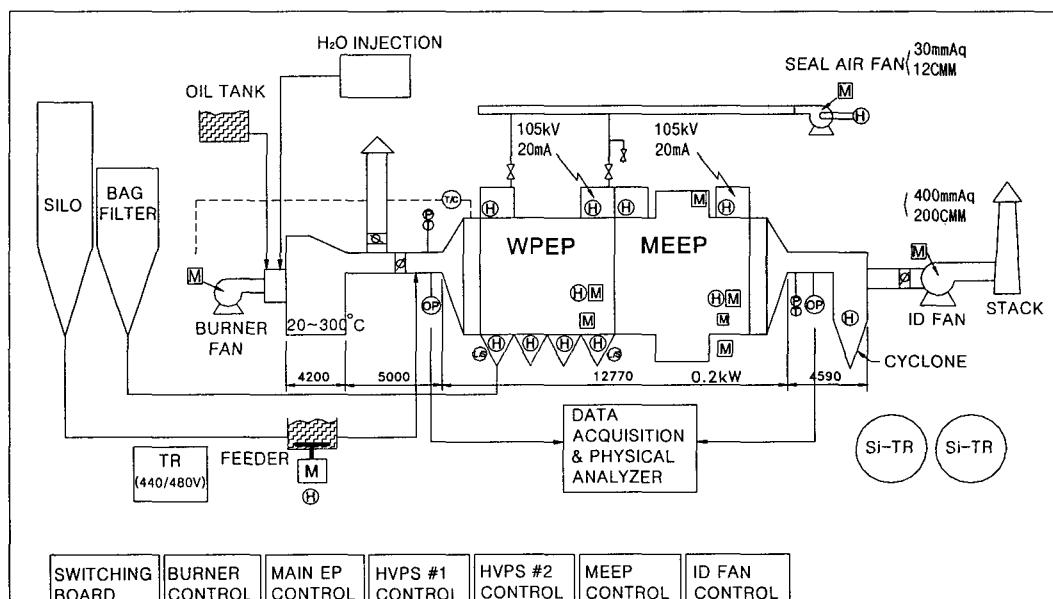
기집진기(WPEP)와 이동전극형 전기집진기(MEEP)가 사용된다.⁽⁵⁻¹⁰⁾ 김용진 등^(11,12)은 파일럿(pilot) 규모의 광폭 전기집진기를 제작하여 집진판 간격과 방전극 형상 및 인가전압 파형이 집진특성에 미치는 영향을 조사하였다. 전기집진기에서 고저항 분진의 집진효율의 저하는 역전리 및 재비산으로 인한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이와 같은 고저항 석탄 플라이 애쉬의 집진효율 개선에 관한 연구를 한다. 이를 위하여 발전용량 2.5 MW급의 파일럿 이동전극형 전기집진기를 제작하여 그 특성을 조사하고, 아울러 고정 전극형 전기집진기의 특성과 비교한다.

먼저 Part I에서는 이동전극형 전기집진기의 집진판의 이동 속도가 집진특성에 미치는 영향을 조사하고, 다음으로 Part II에서는 펄스 파형 및 분진 농도에 따른 집진특성을 조사한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 개요

본 연구에서 사용되는 전기집진기 및 실험시스템의 전경은 Fig. 1에서 보는 바와 같다.^(11,13) 시



H: Heater

T: Temperature

M: Motor

T/C: Temperature Control

OP: Opacity meter

P: Pressure

L/S: level Sensor

Fig. 1 Schematic of an experimental system.

스템의 전체 길이는 약 25m이며, 높이는 지상으로부터 4.8m에 이른다. 시스템은 크게 버너 및 기체 혼합로(furnace)로 구성되는 고온기체 공급 시스템, 플라이 애쉬(fly ash)를 비롯한 시험분진을 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, 유량조절 댐퍼, 시스템 및 전기집진장치의 전반적인 운전을 제어하는 제어반, 그리고 실험시 배출되는 분진을 포집하는 멀티 싸이클론과 백필터 등으로 구성된다.

이동전극형 전기집진기의 본체는 3개의 집진통로(lane)와 1개의 집진부(field)로 구성되며, 내부에는 집진판, 방전극, brush, 절연애자 및 케이싱 등으로 구성된다.⁽¹³⁾ 그리고 집진극은 상하의 구동장치와 연결되어 구동시에 집진판 사이의 전체적인 간격을 일정하게 유지할 수 있도록 하였으며, 방전극 프레임을 지지하는 지지대 상단에는 집진기 몸체와 전기적으로 절연시키기 위해 cone 형의 세라믹 애자를 설치하였다. 이때의 애자실은 히터와 압축공기 주입에 의하여 항상 고온의 청정 표면을 유지하도록 제작하였다. Pilot 이동전극형 전기집진기의 본체의 주요 설계사양을 Table 1에 요약하였다.

집진기의 제어는 그림의 하단에 있는 EP 제어반에서 하게 되며 집진기에 인가되는 (-)의 고전압은 Si-Tr에서 발생하게 되고 발생된 고전압은 집진기 상부에 있는 애자실을 통과하여 방전

Table 1 Specification of a moving electrode electrostatic precipitator

Description	Specification
Type	Dry, Plate to plate, Horizontal gas flow
Discharge electrode	Hammer (3 rpm)
Collecting electrode	Moving plate & Brush
Plate spacing	460 mm
Number of gas passages	3
Plate length	2,050 mm
Effective plate height	2,090 mm
Effective plate area	25.71 m ²
Discharge voltage limit	-105 kV
Discharge current limit	20 mA

극으로 유입된다. 이때 분진은 분진공급장치에 의하여 집진기 본체의 좌측 유입구 덕트에 유입되게 되고 덕트 내부의 유동혼합기에 의하여 일차 혼합되고 유입확대관에 설치되어 있는 유동분산장치에 의하여 집진기 내부로 균일하게 분산되어 유입하게 된다. 전기집진기 내부로 유입된 분진은 방전극과 집진극의 강한 전계에 의하여 포집되며 포집된 분진은 추타에 의하여 호퍼로 제거된다. 이때 유입·유출 덕트에서의 분진농도는 유입덕트와 유출덕트에 설치되어 있는 Opacity meter(OP)에 의하여 계측되고 계측된 신호는 데이터 수집/처리 P/C 시스템으로 전송되어 집진효율이 산정된다. 입경별 집진효율을 측정하는 데는 비색계인 OP를 사용할 필요가 없다. 그러나 실험측정 중 분진공급상태 및 배출상태의 시간에 따른 모니터링을 위하여 전·후단에 OP를 설치하여 정상상태 및 균일공급 등을 체크하면서 실험하는 것이 신뢰성 높은 실험을 할 수 있다.

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.

2.2 실험조건

이동전극형 전기집진기에 대한 제반 실험조건

Table 2 Experimental conditions

Description	Conditions	
Gas velocity (m/s)	0.9	1.1
Flow rate (CMM)	156	190
Specific collecting area (m ² /m ³ /min)	0.165	0.135
Gas temperature (°C)	110	
Fly ash mass load (g/m ³)	2, 5, 10	
Electrical resistivity of fly ash (Ω-cm)	8×10 ¹²	
Plate spacing (mm)	460	
Applied voltage (kV)	40, 42, 45, 46	
Plate velocity (m/min)	0, 0.5, 1.0, 1.5	
Pulse period	1 (DC), 4, 9	
Pulse width (ms)	8.3	
Pulse ratio (%)	50	
Pulse frequency (Hz)	120	

을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 집진판의 이동속도가 0인 경우는 고정형 460 mm 광폭전기 집진기를 나타내며, 펠스주기⁽¹²⁾가 1인 경우는 직류를 나타낸다.

2.3 집진판 이동속도 변화

이동전극형의 집진판 이동속도에 따른 집진효율 특성을 알아보기 위하여 이동속도를 조절할 수 있는 인버터를 설치하여 이동속도를 0, 0.5 m/min, 1.0 m/min 및 1.5 m/min의 속도로 이동하면서 집진효율을 측정하였다. 집진판 이동속도에 따라 1회전하는 데 소요되는 시간은 1.5 m/min일 경우가 5.7분이며 0.5 m/min 및 1.0 m/min인 경우는 17분 및 8.6분이 각각 소요된다. 따라서 이동속도에 따른 전기 및 집진특성 실험을 위하여는 설정된 집진판이 최소한 1회전 이상 회전한 후에 수행하여야 한다. 본 실험에서는 모든 조건들을 설정하여 정상상태로 유지하면서 집진판 이동속도를 설정하고 집진판을 가동하였을 경우 1회전 만으로는 모든 조건이 정상상태를 유지하지는 않았으므로 기본적으로 2회에서 1.5회 회전한 후에 실험을 수행하였다.

2.4 인가전압 및 전류

인가전압별 집진효율 및 소비전력에 따른 집진효율을 측정하기 위하여 인가전압을 55, 51, 46, 45, 42 및 40 kV로 설정하여 실험하였으며 이때의 인가전압과 코로나전류는 10초 간격으로 데이터 로그로 전송되어 저장된다. 이 전압과 전류를 곱하여 평균하고 초당 유량을 나누어 단위유량당 소비전력으로 산정하였다.⁽¹³⁾

3. 결과 및 논의

먼저 고정형과 이동전극형의 효과를 비교하기 위하여 이동전극형 전기집진기의 집진판을 고정시킨 경우와 회전시킨 경우에 대하여 전기 및 집진특성을 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 A는 집진판이 정지한 상태에서 고온의 가스만이 유입되는 영역(gas load), B는 집진판이 정지된 상태에서 분진이 5 g/m^3 로 유입되는 영역(particle load), C는 집진판을 정지시킨 상태에서 가동시 인가전압이 회복되는 기간, D는 인가전압이 완전히 회복된 이동전극형의 정상상태를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 B영역의 고정형

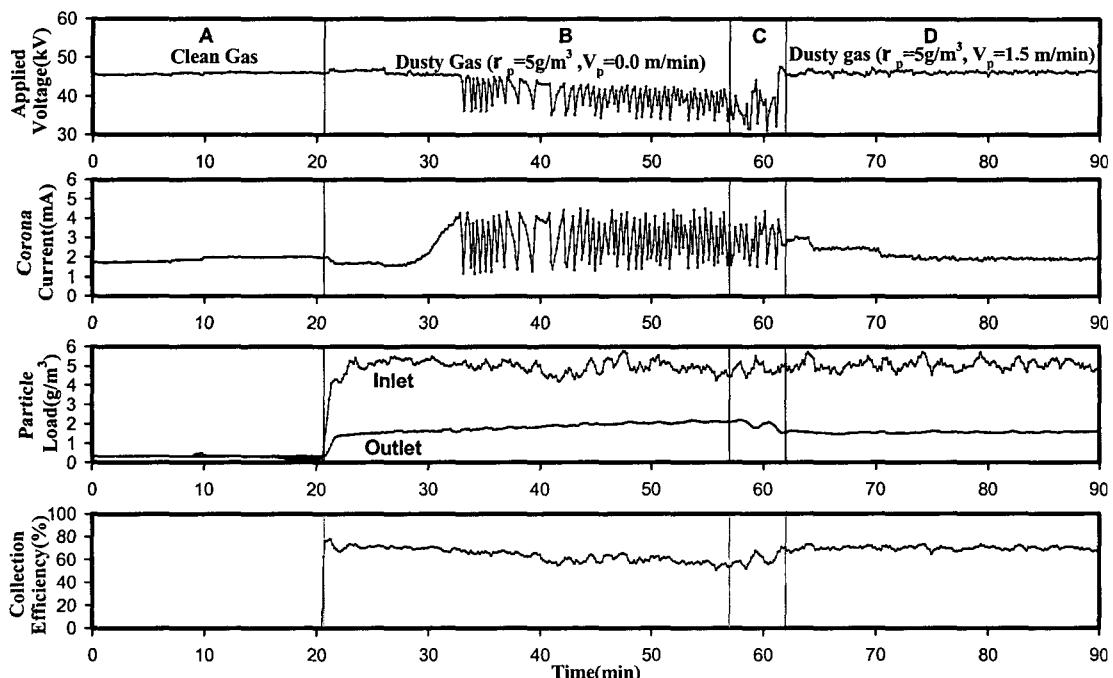


Fig. 2 Record of various signals to represent the characteristics of MEEP.

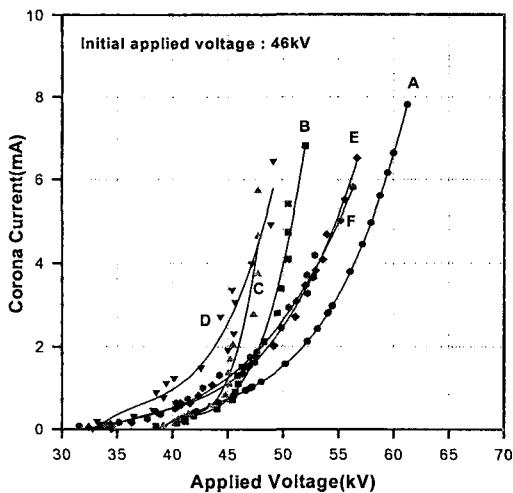


Fig. 3 Corona current as a function of applied voltage for various operating conditions with gas temperature (110°C), plate velocity (0.5 m/min), and gas velocity (0.9 m/s).

인 경우에는 시간의 경과에 따라 분진이 집진판에 누적됨으로써, 집진효율이 서서히 감소하게 되며, 전기특성도 매우 불안정한 상태를 보여주고 있다. 이는 고전압 하전장치의 역코로나로 인하여 인가전압을 하락시키는 것으로 집진기의 집진과는 무관한 무효전력을 감소시키기 위한 power supply의 제어에 의한 것이다. 그런데 D영역에서

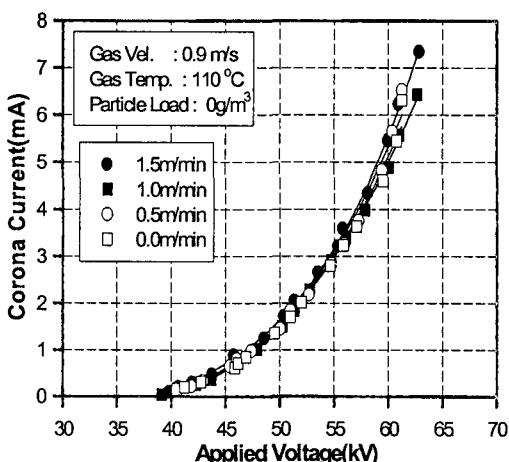


Fig. 4 Corona current as a function of applied voltage for several plate velocities with gas load.

는 부착분진이 탈진되는 것에 의해 전기집진기의 초기 조건이 유지되므로 안정된 전기특성과 집진효율의 상승을 보여주고 있다.

Fig. 3은 입구분진농도 5 g/m³ 집진판 운전조건에 따른 전압-전류 특성곡선이다. Fig. 3에서 A, B, C, D, E는 각각 다음을 나타낸다. A : 집진 초기, B : 집진판 정지상태에서 분진이 집진판에 계속 누적되는 상태, C : 집진판 정지상태에서 분진이 집진판에 계속 누적되어 운전이 곤란한 상태, D : 집진판이 운전되는 상태, E, F : 집진판의 운전이 정상상태에 도달한 경우. 그림에서 A, B 및 C는 집진판이 정지한 상태에서 시간이 경과함에 따라 집진판의 분진부착에 따른 인가전압의 감소와 상대적으로 동일 인가전압에서의 코로나 전류가 증가하는 것을 나타내며, 이러한 영역에서는 인가전압의 증가에 따라 코로나 전류가 급격히 증가하는 역코로나 현상을 볼 수 있으며 이에 따른 breakdown voltage(최고인가 가능전압)이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이로 인하여 Fig. 2에서 본 바와 같이 인가전압의 등락이 발생하게 된다. 그리고 그림의 D, E 및 F는 이동전극의 집진판이 이동 및 탈진됨에 따라 전류가 초기의 조건으로 회복되어 가는 현상을 나타내는 것으로, 먼지가 부착되지 않은 초기상태의 경우와 같이 전압-전류 특성곡선의 기울기가 완만해지는 것을 볼 수 있다. 그러나 E와 F곡선이 A곡선과 완전히 일치하지 않는데 이는 곡선 A는 집진판에 전체

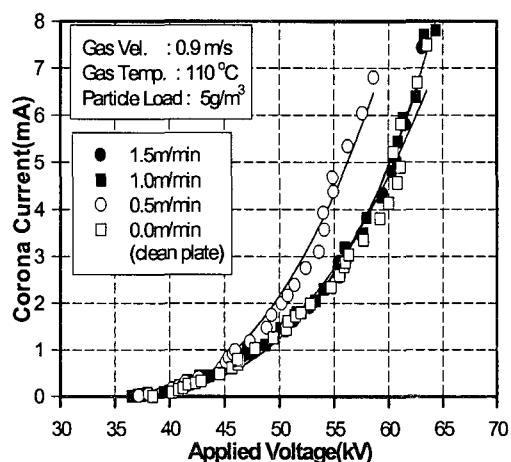


Fig. 5 Corona current as a function of applied voltage for several plate velocities with particle load.

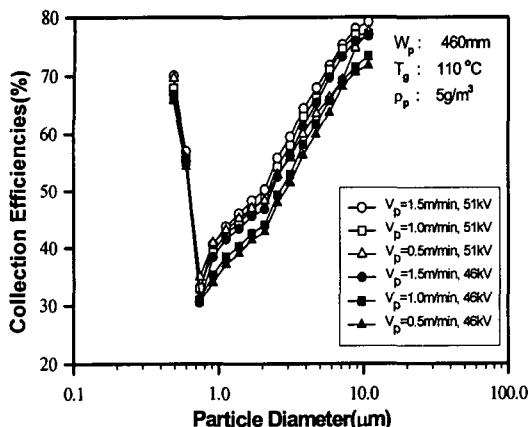


Fig. 6 Collection efficiency as a function of particle diameter for several plate velocities and applied voltages.

적으로 분진이 고르게 2분간 부착한 것이고, E와 F곡선은 집진판이 이동하면서 브러쉬로 분진을 제거하게 되므로 브러쉬를 지난 초기의 집진영역이 가장 깨끗한 상태이고 반면에 브러쉬를 지나기 직전의 집진영역은 가장 분진층이 두터운 상태이므로 이에 따라 곡선 A와 E, F는 완전히 일치하지는 않게 된다. 그렇지만, 이상의 실험결과로부터 이동전극형 전기집진기의 인가전압에 대한 코로나 전류특성이 매우 안정된 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 gas load와 particle load에 대한 이동전극형 전기집진기의 전압-전류 특성곡선이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 집진판에 분진이 부착되지 않는 gas load 상태에서는 전압-전류 특성이 집진판의 이동속도와 무관하게 일정한 것을 볼 수 있는데 이로써 집진판의 이동에 따른 혼들림에 의한 전류의 증가 현상 없이 집진판이 안정적으로 이동하는 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 알 수 있는 것은 집진판에 대한 분진부하가 증가할수록 코로나 전류가 증가한다는 것이다. 일반적으로 분진농도가 증가할수록 코로나 전류가 감소하는 것으로 알려져 있지만 그것은 집진판이 청결한 상태에서 집진판에 부착되지 않은 공간에 존재하는 분진에 의하여 전자와 이온들의 이동속도가 감소되므로 인하여 나타나는 것을 말하는 것으로서 Fig. 4에서의 의미와는 다른 것이다.

Fig. 6은 집진판 이동속도가 0.5 m/min, 1.0 m/min 및 1.5 m/min인 경우에 인가전압 46 kV와

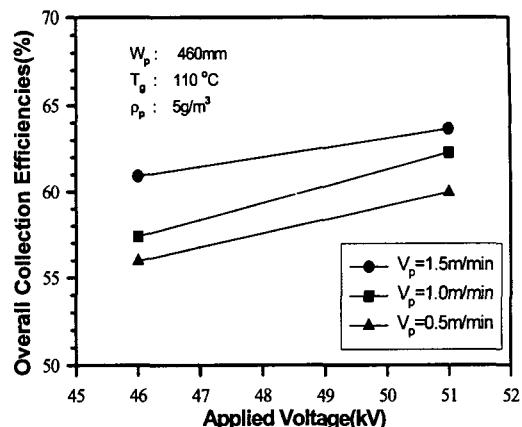


Fig. 7 Overall collection efficiency as a function of applied voltage for several plate velocities.

51 kV를 인가하였을 때의 입경별 집진효율을 측정한 것으로 집진판의 이동속도가 집진효율에 미치는 영향을 보여준다. 그럼에서 보는 바와 같이 모든 크기의 입자에 대해 집진판 이동속도가 빠를수록 집진효율이 높은 것을 알 수 있다.

끝으로 집진판 이동속도별 총괄 집진효율을 조사하여 Fig. 7에 나타내었다. 집진판 이동속도의 변화는 집진판의 체류시간을 변화시키고, 집진판의 체류시간에 따라 집진판에 부착된 분진량이 달라지므로 이에 따른 집진효율의 차이를 볼 수 있다. 결국, 본 실험의 영역에서 집진판 이동속도가 증가할 경우 총괄 집진효율이 증가한다는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

전기집진기에서 고 저항 분진의 집진효율의 저하는 역전리 및 재비산으로 인한 것으로 알려져 있으며 이를 개선하기 위하여 발전용량 2.5 MW급의 파일럿 이동전극형 전기집진기를 제작하여 고 저항 석탄 플라이 애쉬의 집진효율 개선에 관한 연구를 하였다.

비저항이 높은 분진의 유입에도 이동전극형 전기집진기의 코로나 전류가 고정전극형 전기집진기에 비하여 매우 안정된 상태를 보인다. 본 실험에서 수행한 모든 크기의 입자($D_p < 10 \mu\text{m}$)에 대해 집진판 이동속도가 빠를수록 집진효율이 높아진다는 것을 관찰하였다. 집진판 이동속도가 증

가하면 총괄 집진효율이 함께 높아진다.

참고문헌

1. Oglesby, S. and Nichols, G. B., 1978, Electrostatic Precipitation Technology, Marcel Dekker Inc., New York.
2. Robinson, M., 1971, Electrostatic Precipitation, in Air Pollution Control, ed. W. Strauss, Part 1, Wiley-Interscience, New York.
3. Lioyd, D. A., 1988, Electrostatic Precipitator Handbook, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia.
4. Asano, H., Ootsuka, M. and Yano, T., 1984, Recent result of applications of the moving electrode electrostatic precipitator for coal fired utility boilers, Proc. 2nd Int. Electrostatic Precipitator Conf., Kyoto, Japan, Vol. 2, pp. 800-804.
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. Kim, Y.-J., Ha, B.-K., Jeong, S.-H., Hong, W.-S., Yoa, S.-J. and Yoo, J.-S., 2001, A study on the collection characteristics of a wide plate-spacing electrostatic precipitator -I. Effect of plate spacing and type of discharge electrode, J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 13, No. 10, pp. 939-946.
12. Kim, Y.-J., Ha, B.-K., Jeong, S.-H., Hong, W.-S., Ha, D.-H. and Yoo, J.-S., 2001, A study on the collection characteristics of a wide plate-spacing electrostatic precipitator -II. Effect of wave form of pulse energization, J. of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 13, No. 11, pp. 1059-1064.
13. 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.