

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.4.423

고내구성 하전 및 집진 방식 전기집진기의 미세입자 제거 특성[§]

김학준* · 한방우* · 홍원석* · 신완호* · 송동근*
· 정상현* · 김용진*† · 오원석** · 황규동** · 유성연**

* 한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부, ** 충남대학교 기계설계공학과

Evaluation of Fine-Particle Removal Performance of Novel ESP with Highly Durable Chargers and Collectors

Hak-joon Kim*, Bangwoo Han*, Won-seok Hong*, Wan-ho Shin*, Dong-keun Song*,
Sang-hyeon Jung*, Yong-jin Kim*†, Won-suk Oh**, Kyu-dong Hwang**, Seong-yeon Yoo**

* Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials
** Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University

(Received December 22, 2009 ; Revised February 4, 2010 ; Accepted February 9, 2010)

Key Words: Electrostatic Precipitator(전기집진기), Anti-Corrosive(내부식), Fine Particles(미세입자), Collection (집진)

초록: 반도체 공정에서 배출되는 미세입자를 포집하기 위하여 전기집진장치가 적용되고 있으나, 배출가스 내 포함된 강부식성 오염원에 의한 전기집진장치 내부 오염 및 부식 문제가 심각하여, 이를 해결하기 위한 방안이 절실하다. 본 연구에서는 탄소섬유로 이루어진 하전부와 PET 필름 사이에 금속 박막이 삽입된 집진부로 이루어진 내부식 전기집진장치를 개발하여, 하전부 및 집진부 인가전압, 처리유량, 하전부 채널 수 등의 운전 조건에 따른 전기집진기의 초미세입자 집진 성능을 평가하였다. 평균입경이 100 nm인 KCl 입자를 시험입자로 사용하였으며, 전기집진기 전/후단 입자 농도 변화를 측정하기 위하여 SMPS를 사용하였다. 본 연구에서 개발된 9채널 하전부와 65 mm 집진부로 구성된 전기집진기의 성능평가 결과, 500 m³/hr 유량조건에서 하전부 및 집진부에 7 kV와 10 kV를 각각 인가하였을 때, 300 nm입자에 대한 포집효율이 90% 이상으로 높게 나타났다.

Abstract: Electrostatic precipitators (ESPs) used currently in industries for removing fine particles from semiconductors have to be made of expensive anticorrosive metallic materials in order to maintain their particle-removal performance. To satisfy the economical demands of industries, a novel ESP was developed; in this ESP, the charger is made of carbon fibers and collection plates consist of PET films among which an aluminum sheet is inserted. The ESP was evaluated by changing the voltages applied to the chargers and collection plates, flow rates, and number of charging channels. KCl particles with mean diameters of 100 nm were used, and a scanning mobility particle sizer was used to measure the changes in particle number concentrations upstream and downstream of the ESP. The experimental results showed that more than 90% of the particles were removed by using the ESP containing ionizers with nine channels and 65-mm collection plates at 500 m³/hr when voltages of 7 kV and 10 kV were applied to the ionizers and collection plates, respectively.

1. 서론

첨단 반도체 및 디스플레이 산업의 시장규모는 2007년 기준 3,300억 달러였으며, 년 평균 12%씩 지속적으로 상승하고 있고, 관련 산업은 국내 21세기 주력 산업으로 인식되고 있다. 한편, 이와 같은 시장의 성장에도 불구하고 반도체 공정에서

배출되는 다량의 환경오염성 가스와 미세 백연 입자의 배출량은 날로 증가하여, 2010년 환경부 규정에는 대기 배출 규제가 반도체 시설까지 확대 적용될 전망이다. 특히, 반도체 공정에서 배출되는 초미세입자는 강부식성 산성가스과 함께 대기오염의 주요 원인임은 물론, 인체에 치명적인 영향을 미치므로 대기로 배출되기 전 후처리가 반드시 필요하다. 반도체 공정 배기가스에 포함되어 있는 산성, 염기성 가스상 물질 및 입자상 물질을 제거하기 위하여 일반적으로 습식 스크러버

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author. yjkim@kimm.re.kr

가 널리 사용되고 있다. 습식 스크러버의 경우, 산성 및 염기성 가스상 물질의 제거 성능은 매우 우수하지만, 입자상 물질을 제거하는 메커니즘이 관성충돌에 크게 의존하기 때문에 $1\ \mu\text{m}$ 이하 크기의 초미세입자에 대한 제거 성능은 매우 낮다.⁽¹⁾ 이와 같은 습식 스크러버의 미세입자 집진 효율을 높이기 위하여 여국현의 다수 연구자와 Jaworek의 다수 연구자들은^(1,2) 습식 스크러버에 정전 분무 기술을 적용하여 스크러버의 입자상 물질 제거 효율을 높이고자 하였다. 그러나, 이와 같은 정전 스크러버 역시 하전된 입자와 반대 극성의 물과의 관성충돌을 이용하여 입자상 물질을 제거하며, 정전기력에 의한 제거의 효과가 미약하기 때문에 초미세입자 집진 성능은 여전히 낮다.

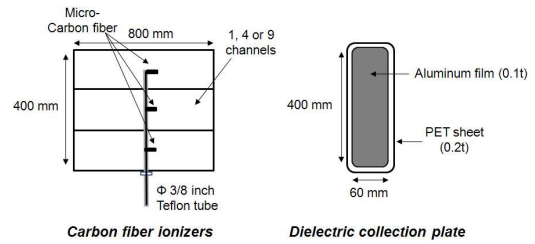
한편, 최근 들어 반도체 공정 배기가스 내 입자상 물질을 제거하기 위하여 필터 방식 및 전기 집진방식의 입자상 물질 제거 장치가 적용되고 있다. 황순철의 다수 연구자들은⁽³⁾ 습식 전기집진 기술을 적용하여 반도체 배기가스 내 초미세입자를 60~90% 제거하였다. 그러나, 반도체 공정으로부터 발생하는 입자상 물질은 pH 3 이하의 강산성, 강부식성 물질과 함께 배출되므로, 기존의 필터 방식이나 전기집진방식으로는 차압 상승 및 내구성 문제 때문에 장시간 집진성능 유지하기가 어렵다.⁽⁴⁾

이와 같은 집진방식의 문제점을 해결하기 위하여 최근 들어 내부식성 재질을 활용한 고효율, 저배압 전기집진장치가 반도체 후처리 장치로 개발되어 적용되고 있으나, 이 역시 Inconel이나 Hastelloy C와 같은 고가의 금속 물질을 사용하기 때문에 경제성 측면에 한계가 존재한다.

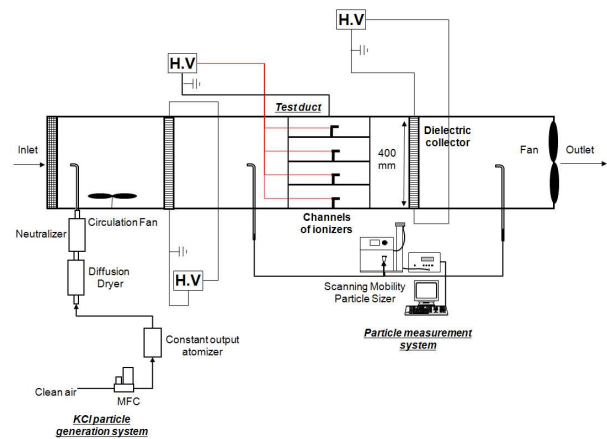
따라서, 본 연구에서는 반도체 공정에서 배출되는 강부식성 가스 내 초미세입자상 물질을 제거하기 위하여 내부식성 하전부 및 집진부로 구성된 전기집진장치를 개발하여, 전기집진장치의 운전 조건(하전부 및 집진부 인가전압, 풍량 등)에 따른 성능 평가 실험을 수행하였으며, 본 장치가 대용량화 될 경우 발생할 수 있는 효율 감소 문제를 해결하기 위한 방안에 대해 실험적으로 모색하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 하전장치는 오존 등과 같은



(a) Schematic of the ionizers and collection plates



(b) Schematic of the performance test

Fig. 1 Experimental setup for the performance test of an ESP

2차 오염물질이 전혀 발생되지 않으면서 다량의 음극 또는 양극 이온을 발생시킬 수 있는 수 μm 의 탄소섬유 다발로 이루어져 있다.^(5,6) Fig. 1(a)에서와 같이, 본 연구에서는 미세입자의 하전율을 높이기 위하여 하전부를 다수의 채널로 구성하였으며, 각각의 채널 내부 중앙에는 수 μm 의 탄소섬유 다발로 이루어진 1개의 하전장치를 설치하였다. 또한, 본 연구에 사용된 집진장치는 내산성 재질의 $400 \times 60 \times 0.1\ \text{mm}$ PET 필름 두장 사이에 0.1 mm 두께의 알루미늄 박막을 삽입한 집진부 수십 장을 직류격자 형태로 배열하여 제작하였으며, 흡수 번째 집진부에 고전압 인가하고 짝수 번째에는 접지를 시켜 집진부 한쪽 면에 하전된 입자가 포집되도록 하였다.

Fig. 1(b)는 본 연구에서 개발된 내부식성 전기 집진장치의 집진성능평가를 위한 단일 덕트형 ($400 \times 400\ \text{mm}$) 성능평가 시스템을 나타내었다. $1\ \mu\text{m}$ 이하의 미세입자를 발생시키기 위하여 질량비 1:100의 KCl 용액을 사용하였으며, Atomizer

(Model 3076, TSI, USA)에 1~3 L/min의 청정공기를 유입시켜 발생된 KCl 입자를 시험 덕트의 상류측에 공급하여, 덕트 하류측 송풍기에 의해 유입되는 시험 공기와 혼합되도록 하였다. 전기집진장치 전단 입자 농도를 20~600 nm의 입경영역에서 $10^4 \sim 10^5$ 개/cm³의 범위 내로 고르게 유지시켰으며, 오염 입자 유입을 최소화 및 유동 균일화를 위하여 덕트 상류 측에 정류격자 형태의 HEPA (High Efficiency Particulate Air)필터를 설치하였으며, 덕트 상류 측에는 입자 교반용 팬을 작동시켰다. 또한, 하전되지 않은 중성입자들만 전기 집진장치로 유입시키기 위하여 상류 측에 별도의 전기집진장치를 설치하였고, 10 kV의 고전압을 인가하여 하전된 입자를 제거하였다.

시험 공기 유량 300 m³/hr, 유전체 박막 집진부의 인가전압이 5 kV인 조건에서 탄소섬유 하전부의 인가전압을 5, 7 및 10 kV로 변화시키고, 공기유량 300 m³/hr, 하전부의 인가전압 7 kV인 조건에서 유전체 박막 집진부의 인가전압을 2, 5 및 10 kV로 변화시키면서 하전부 및 집진부 인가전압별 집진효율을 각각 측정하였다. 또한, 하전부의 인가전압 7 kV 및 집진부의 인가전압 10 kV의 조건에서 유량을 300, 400 및 500 m³/hr로 변화시켜 유량별 집진효율을 측정하였다. 또한, 500 m³/hr 유량 조건에서 탄소섬유 하전부 채널수를 증가시키면서 전기집진장치의 100 nm크기 입자 집진효율 변화를 측정하였다. 미세입자 집진효율은 내부식 하전/집진부의 상류측 및 하류측에서의 입경 분포를 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)를 이용하여 교대로 측정하여 그 비를 이용하여 아래 식 (1)로부터 산출하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{n_0}{n_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

η : 제거 효율(%)

n_i : 입구 측 입자 농도(개/cm³)

n_0 : 출구 측 입자 농도(개/cm³)

3. 실험 결과 및 고찰

Table 1은 4채널 하전부 덕트의 접지 유무 및 탄소섬유 하전장치의 개수에 따른 이온농도 변화를 나타내었다. 탄소섬유 장치에 고전압을 인가

Table 1 Ion concentrations by varying the numbers of ionizers with and without electrical ground (E.G)

Number of channels	Ion concentration (E+07 #/cm ³)		Applied voltage to ionizers
	w/o E.G	w/ E.G	
1	2.11	2.25	7 kV
2	2.25	3.95	
3	2.17	6.46	
4	2.26	7.98	

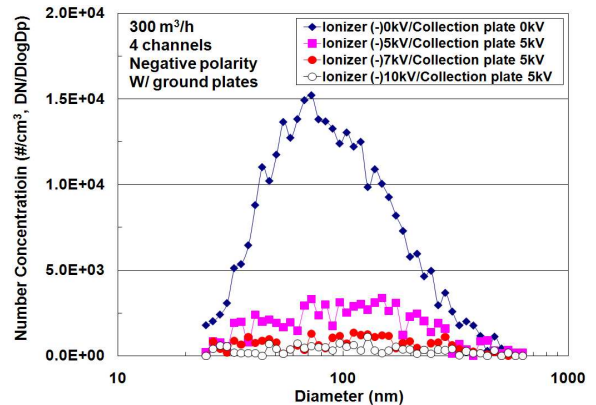


Fig. 2 Changes in the size distributions of test particles by changing the applied voltage to ionizers at a constant applied voltage to collection plates

시킬 경우, 접지판이 없을 때 탄소섬유 하전장치의 개수와 관계없이 이온이 약 2×10^7 개/cm³ 가량 발생되었으나, 접지판을 설치했을 경우 탄소섬유 하전장치의 개수에 비례하여 이온 농도가 증가하였다. 특히, 접지판 설치 시 4개의 탄소섬유 하전장치에서는 약 8×10^7 개/cm³의 이온이 발생되었다. 접지판이 없을 경우 탄소섬유 각각의 하전장치는 서로에게 전기적으로 간섭을 주어 4개의 하전장치에 고전압을 인가할 경우, 벽면부로부터 가장 가까운 위치에 존재하는 1개의 탄소섬유 하전장치에서만 이온이 발생한다. 그러나, 각각의 탄소섬유 하전장치를 접지판으로 독립시키게 되면, 각각의 하전장치는 서로 독립적으로 이온을 발생시키므로 이온 발생량은 하전장치 채널 개수만큼 증가하게 된다. Fig. 2는 유량 300 m³/hr 조건에서 4채널 탄소섬유 하전장치의 변화

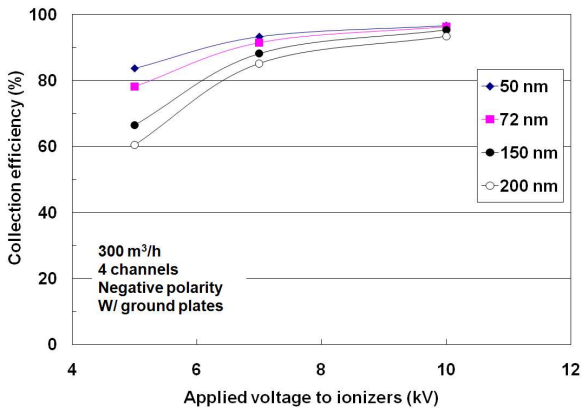


Fig. 3 Collection efficiencies as a function of the applied voltages to ionizers for different particle sizes

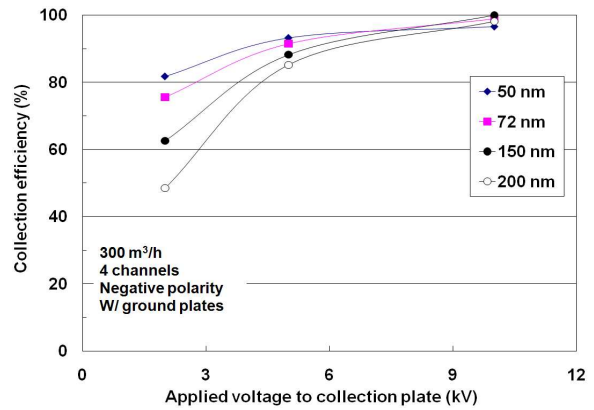


Fig. 5 Collection efficiencies as a function of the applied voltages to collection plates for different particle sizes

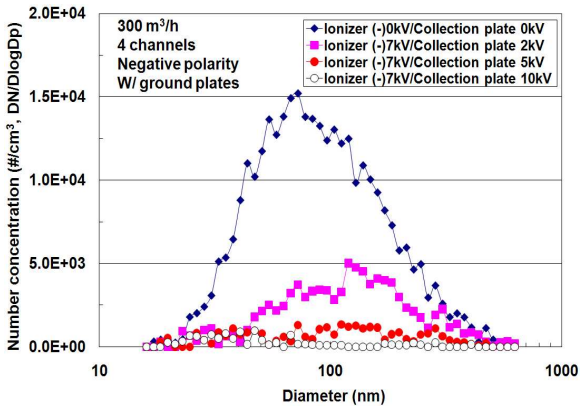


Fig. 4 Changes in the size distributions of the particles by changing the applied voltage to collection plates at a constant applied voltage to ionizers

에 따른 입경분포를 나타내었다. 개별적으로 집진된 내부식 집진부는 65 mm 길이로 제작하였고, 인가전압은 5 kV로 고정시켰으며, 하전부에는 0~10 kV의 전압(음극)을 인가시켰고, 인가전류는 0.1 mA 이하였다. Fig. 2에서와 같이, 시험입자의 최대 농도 입경은 100 nm 미만이었으며, 대부분의 입자들은 1 μm 이하의 입경 영역에 존재하였다. 하전부의 인가전압을 증가시킬수록 전기집진장치 집진부 후단부의 농도가 급격히 감소하였으며, 특히 하전부에 10 kV 인가시켰을 때 모든 입경 영역에서 입자 농도가 10³ 개/cm³ 이하로 감소하였다. 이는 하전부의 인가전압을 증가시킬수록 탄소섬유와 접지극 사이에 작용하는 전기장의 세기가 증가하여 이온발생량이 증가하고, 이로 인해 입자대전율이 증가하였기 때문이다.⁽⁷⁾

Fig. 3은 하전부의 인가전압에 따른 시험입자 집진효율을 입경별로 나타내었다. Fig. 3에서와 같이, 100 nm 이하 입경영역에서 하전부에 인가전압이 5 kV(음극)이상이면 집진효율은 80% 이상으로 높게 나타났다. 한편, 100~200 nm 입자의 포집효율은 100 nm 이하의 입자효율보다 최대 20% 낮게 나타났다. 이는 이 영역의 입자 크기보다 작은 입자들은 확산현상으로 인해 입자와 이온간의 충돌이 활발하여 대전율이 높기 때문이다.⁽⁷⁾ 반면, 하전부에 인가전압을 10 kV(음극) 인가하였을 때 입경과 무관하게 집진효율이 90% 이상으로 높게 나타났다.

Fig. 4는 유량 300 m³/hr 조건에서 65 mm 길이의 개별 집진된 내부식성 박막 집진부의 인가전압 변화에 따른 입경분포 변화를 나타내었다. 하전부는 4채널 탄소섬유 하전장치를 사용하였고, 하전부 인가전압은 7 kV(음극)로 고정하였다.

박막 집진부의 인가전압을 증가시킬수록 후단부 입자 농도가 급격히 감소하였고, 이는 집진부 인가전압을 증가시킬수록 하전된 입자의 전기 이동도가 증가하여 입자포집량이 증가하였기 때문이다.⁽⁷⁾ Fig. 5는 박막 집진부의 입경에 따른 인가전압별 집진효율을 나타내었다. 입경에 따른 효율 변화는 Fig. 3과 동일한 경향을 나타내었다. 특히, 하전부에 7kV(음극)를 인가한 상태에서 집진부에 10 kV를 인가하였을 경우 전 입경영역에서 포집효율이 95% 이상으로 매우 높게 나타났다. Fig. 6은 시험 공기 유량이 300, 400 및 500 m³/hr 조건에서 탄소섬유 하전장치의 인가전압이 7 kV(음극), 65 mm 길이의 개별 집진된 내부식 박막

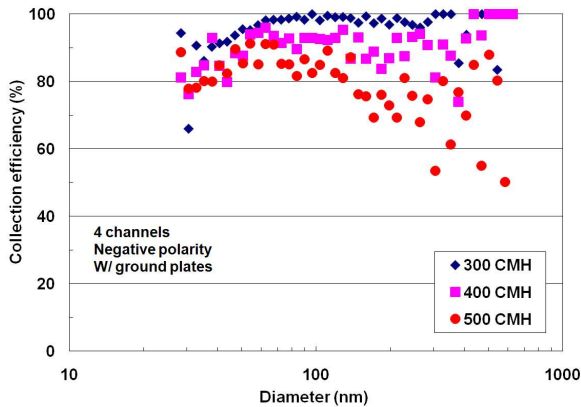


Fig. 6 Changes in size dependent collection efficiencies by varying air flow rates

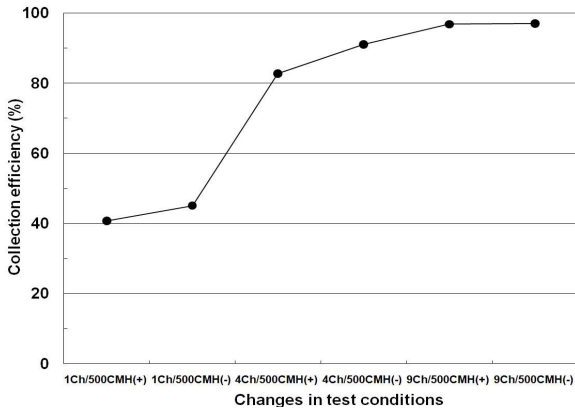


Fig. 7 Changes in collection efficiency of 100 nm particles by changing the number of ionization channels and voltage polarity at 500 m³/hr

집진부의 인가전압이 10 kV일 때의 입경별 집진 효율 분포를 나타내었다. Fig. 6에서와 같이, 유량이 증가할수록 집진효율이 감소하였다. 특히 유량이 500 m³/hr 일 때 최대 농도 입경인 100 nm 입자에 대한 포집효율이 99%에서 80%대로 감소하였다. 이는 유량이 증가함에 따라 미세입자가 탄소섬유 하전장치에서 충분한 시간을 갖지 못하여 입자하전율이 감소하고, 또한 집진부에서 체류시간이 감소하여 하전된 입자가 충분히 집진되지 못했기 때문이다.

Fig. 7은 유량 500 m³/hr 일 때, 탄소섬유 하전장치의 인가전압을 7 kV, 65 mm 길이의 내부식 박막 집진부의 인가전압을 10 kV로 고정시켰을 때의 탄소섬유 하전장치의 채널수에 따른 100 nm 입자에 대한 집진효율 변화를 보여주고 있다. 탄소 섬유 채널 수가 1개 일 때 양극(+) 및 음극

(-) 인가전압에서 100 nm입자 기준으로 각각 40.7%, 45.1% 이던 집진효율이 채널 수가 4개로 증가할 때, 82.7% 및 91.1%로 증가하였고, 9개 채널에서는 각각 96.8% 및 97.0%를 나타내었다. 이는 탄소섬유 하전장치의 채널 수를 증가시킴으로써 대용량의 조건에서도 고효율 집진이 가능함을 보여주고 있다. 한편, 탄소 섬유하전장치에 음극(-)과 양극(+)을 적용할 경우의 효율 차이가 10%이하로 미미하였다.

3. 결론

본 연구에서는 탄소섬유를 이용한 하전부와 PET 필름이 코팅된 집진부를 결합한 내부식 재질의 2단 전기집진장치를 개발하여, 하전부 및 집진부 인가전압, 하전부 채널수, 유량 변화 등에 따라 전기집진장치를 실험적으로 평가하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 기존 전기집진장치에 사용되었던 금속재질의 방전극(와이어, 강체 예지 등)을 사용하지 않더라도 내부식성 성질이 있는 탄소 섬유를 이용하여 다량의 이온을 발생시킬 수 있었다.

(2) 기존 전기집진장치에 사용되었던 금속재질의 집진판을 사용하지 않더라도 금속박막을 PET로 코팅한 집진판을 사용하여 초미세입자를 90% 이상 저감할 수 있었다.

(3) 하전부 및 집진부의 인가전압을 증가시킬수록, 하전부의 채널수를 증가시켜 하전부의 채널당 유입되는 오염공기량을 감소시킬수록 본 전기집진장치의 집진효율을 향상시킬 수 있었으며, 이는 본 장치가 대용량 부식성 가스 정화를 위해 스케일-업이 될 경우 야기될 수 있는 효율 저감 문제를 해결할 수 있는 주요 설계 변수임을 실험적으로 확인하였다.

후 기

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업 및 한국기계연구원의 주요사업 (NK149C, NK154D)의 지원으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Yeo, K.H., Yoo, K.H., Son, S.W and Kim,

- Y.S., 2006, "An Experiment On Particle Collection And Gas Removal in a 2-Stage Electrostatic Wet Scrubber," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 9, pp. 745~752.
- (2) Jaworek, A, Balachandran, W, Krupa, A., Kulon, J. and Lackowski, M., 2006, "Wet Electrostatic for State of the Art Gas Cleaning," *Environmental Science and Technology*, Vol. 40, No. 20, pp. 6197~6207.
- (3) Hwang, S.C., Yoon, S.H., Han, B. and Kim, Y.J., 2005, "A Study on the Characteristics for the Collecting Mist of Hybrid Electrostatic Precipitator Using Dielectric Coagulation System," Proceeding of the 39th meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, PD11, pp. 429~431.
- (4) Tsai, C.J., Miao, C.C., and Lu, H.C., 1997, "White Smoke Emission from a Semiconductor Manufacturing Plant," *Environment International*, Vol. 23, No. 4, pp. 489~496.
- (5) Han, B., Kim, H.J., Kim, Y. J. and Sioutas, C., 2008, "Unipolar Charging of Fine and Ultra-Fine Particles Using Carbon Fiber Ionizers," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 42, pp. 793~800.
- (6) Han, B., Hudda, N., Ning, Z., Kim, Y. J. and Sioutas, C., 2009, "A Novel Bipolar Charger for Submicron Aerosol Particles Using Carbon Fiber Ionizers," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 40, No. 4, pp. 285~294.
- (7) Hinds, W.C., 1999, *Aerosol Technology*, Awiley-Interscience Publication, New York, pp. 316~345.