

## 전기하전식 세정집진장치 개발에 관한 기초 연구 A Basic Study on Developing an Electrocharged Scrubber

김 종 호

한서대학교 환경공학과

(1998년 11월 10일 접수, 1999년 3월 10일 채택)

Jong-Ho Kim

*Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

(Received 10 November; accepted 10 March 1999)

### Abstract

This study has been performed to develop an efficient electrocharged scrubber. To improve collection efficiency of the scrubber, electric-charger was installed at the forefront of the packed crossflow scrubbers, and an experiment of changing discharge electrode shape and fluctuating electric field strength was undertaken.

After using a light-oil boiler for generation of particles in the about 80% weight of submicron size particles was exhausted. Collection characteristics of the electrocharged scrubber were similar to those of two-stage electrostatic precipitator. In this study the collection efficiency of submicron size particles has been much improved, compared with the previous ones.

In an experiment of changing discharge electrode and electric field strength, a needle-spike shape wire electrode showed a higher collection efficiency than round shape wire. The collection efficiency becomes increased with an increase of electric field strength.

**Key words :** electrocharged scrubber, light-oil boiler, particle size distribution, discharge electrode shape, electric field strength, collection efficiency

### 1. 서 론

오늘날 환경보전이 세계적 관심사가 되면서, 환경 파괴를 막고 환경의 질을 쾌적하게 유지하고자 하는 운동이 범 지구적으로 일어나고 있다. 특히 산업 시설에서 배출되는 오염물질로 인하여 환경오염이 심화되면서 이들 오염물질의 양을 저감하고자 하는 노력은 기술적인 발전을 요구한다. 따라서 산업장의 배출시설에서는 각종 오염물질 처리장치들을 최대

효율로 운전하거나 보다 높은 효율을 갖는 처리장치들로 교체하여 오염물질 배출을 저감해야 하는 시점에 있다.

대기오염물질 배출시설에서 발생하는 오염물질의 처리는 오염물질별의 성상(가스상 또는 입자상)과 그 특성에 맞는 다른 장치를 사용하지만 현실적으로는 한 배출시설에 몇 종류의 처리장치를 설치하는 것이 보통이다.

그러나 세정집진장치는 한 처리장치 내에서 가스상 및 입자상 오염물질을 동시에 제거하는 장치로

써 물 또는 처리용도에 맞는 용액을 사용하여 오염 물질을 처리한다. 이 장치는 세정액을 별도로 처리해야 하고, 다른 처리장치에 비해 입자상물질의 효율이 다소 떨어지나, 동시에 여러 오염물질을 처리하고, 처리가스의 온도를 낮추어 유량을 줄이고, 이것은 처리비용을 낮춘다는 장점이 있기 때문에 많이 사용하는 처리장치이다. 그런데, 강화된 오염물질 배출규제는 보다 높은 효율을 요구하기 때문에 기존의 세정집진장치를 다른 고효율의 처리장치로 교체하거나 보완해야 하는 상황이다. 따라서 세정집진장치의 효율을 증대시키기 위해 여러 연구가 진행되었는데, Kazushige의 Ionizing wet scrubber와 분무탑(spray tower)의 노즐에 고전압을 인가하는 방안 등의 전기집진의 원리를 부가하는 것이다(박영욱과 손재익, 1994; Kazushige, 1994; Pilat *et al.*, 1974; Seymour and Harold, 1984). 그런데 이러한 장치들은 정전기력을 부가하기 위해 고전압을 사용하면 세정액과의 전기적인 안전과 세정집진장치의 구조를 바꾸어야 하는 등의 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 세정집진장치의 성능을 입자상물질에 대해서만 그 효율을 향상시키기 위해 submicron 입자를 처리 가능하게 보완하는 기초 연구를 수행하였다. 기존의 세정집진장치의 구조를 변화시키지 않으면서도 전기적으로도 안전하게 쿨롱력을 부가하여, 정전기적인 집진원리를 세정집진원리에 포함시키는 기초 실험을 실시하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 보일러, 전기하전식 세정집진기, 분진측정장치 등으로 구성하였다.

보일러는 경유를 11 l/hr로 연소시키는 난방용으로 연속적으로 운전할 수 있게 냉각수를 계속하여 공급하고 배출시켰다. 보일러에서 발생하는 배기 가스는 직경이 12.5 cm인 원형 덕트를 이용하여 전기하전식 세정집진기로 연결하였고, 세정집진기의 출

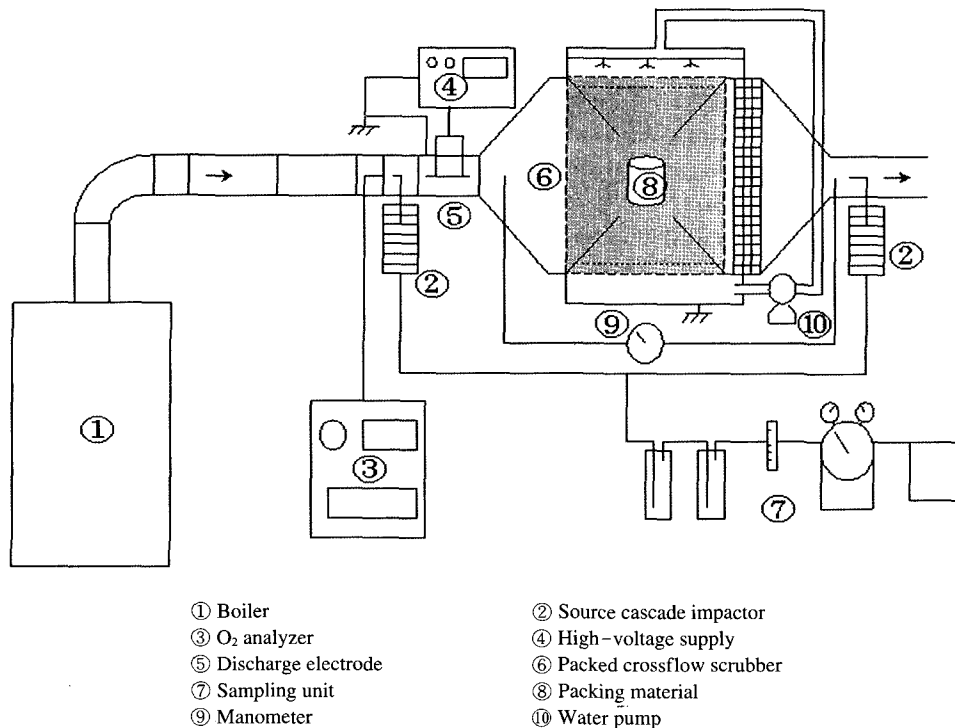


Fig. 1. A schematic diagram of experimental equipment.

구에도 같은 크기를 덕트를 연결하여 처리된 가스를 배출시켰다.

전기하전식 세정집진기는 Fig. 1에 나타난 것처럼 세정집진기 앞부분의 덕트에 하전부를 설치하여 분진을 하전시켰다. 하전부는 원통형 전기집진기의 형태로 20 cm 길이의 방전극을 원형덕트 중심에 1개를 설치하였고, 방전극의 종류를 바꾸어 실험 할 수 있도록 제작하였다. 하전부의 고전압 인가장치는 0~ -40 kV, 0~10 mA로 변화시킬 수 있도록 제작하였다. 세정집진기는 일반적으로 많이 설치하는 교차류형 충전탑 (packed crossflow scrubbers)으로 크기가 300 mm × 370 mm × 450 mm (L : H : W)이고, 충전물질은 세라믹 재질의 링 (ring)을 사용하였다.

분진의 측정은 입경별 분포를 파악하기 위하여 Source test cascade impactor (Mark V, Pollution Control Systems Corp.)를 사용하였다. 이 측정장치의 측정 범위는 0.2~11.0 μm이며, 11단으로 나누어 입경 분포를 측정한다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 기존 세정집진원리에 정전기력을

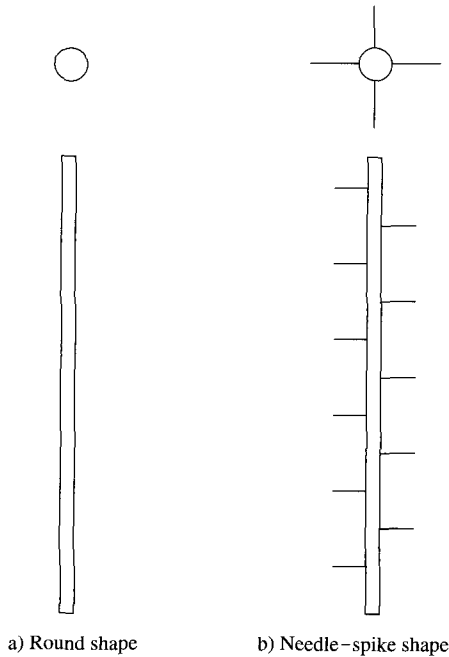


Fig. 2. Shape of the discharge electrodes.

부가하기 위해 세정집진기의 구조는 변화시키지 않고, 그대로 이용하면서 하전부를 추가로 설치하였다. 세정집진기 자체의 성능향상을 위한 요소들은 고려하지 않고, 전기집진의 원리인 하전부의 정전기적인 특성들에 대해서만 변화시켜 가며 효율을 측정하였다.

먼저 분진의 발생을 일정하게 하기 위해 보일러의 공기비를 1.3으로 맞추어 운전하였다.

전기하전식 세정집진기의 성능을 파악하기 위해 우선 세정집진기만의 효율을 측정하고, 전기 하전부에 전기장강도와 방전극을 변화시켜 가며 집진효율을 측정하였다. 전기장강도는 1 kV/cm, 2 kV/cm, 3 kV/cm로 변화시켰고, 방전극은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 원형 (round wire) 방전극과 최근 들어 산업 시설에 많이 사용하고 있는 가시철심 (needle-spike wire) 방전극에 대해 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분진발생

공기비 1.3으로 운전하였을 때 보일러의 배기가스 온도는 287°C, 수분량은 10.5%, 배기가스량은 4.3 m<sup>3</sup>/min 이었다. 분진배출량은 41.2 mg/Sm<sup>3</sup>으로 측정되었는데, 배출계수를 적용하여 계산한 값과 유사한 농도로 발생되었다. 입경별 중량농도 분포는 Fig. 3에 나타냈는데, 발생하는 분진의 약 80% 정도가 0.1~1.0 μm 범위에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 중유나 석탄을 연소했을 때 발생하는 분진의 상당량이 1.0~10.0 μm 범위에 분포하고 있는 것과 비교하여, 경유 연소시에 submicron 입자들이 많이 발생하는 것을 보여 주고 있다(김신도 등, 1995; Joma et al., 1992).

그런데, 현재 중유 연소 보일러에는 집진장치가 설치되어 있고, 경유보일러에는 그렇지 않다. 정부의 연료 규제정책에 의거하여 SO<sub>2</sub>의 발생량을 줄이기 위해 대형보일러에도 경유를 사용하게 되면, 발생하는 분진의 양은 적으나 집진장치가 설치되어 있지 않기 때문에 분진양은 크게 줄일 수 없을 것이다. 이때 오히려 경유 연소시 발생하는 상당량의 미세 먼지가 발생하리라 예상되므로 이에 대한 대책이 절실히 필요하다고 판단된다.

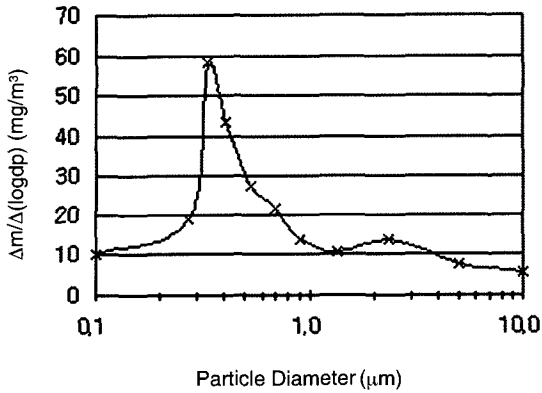


Fig. 3. Size distribution of particle obtained from light-oil combustion.

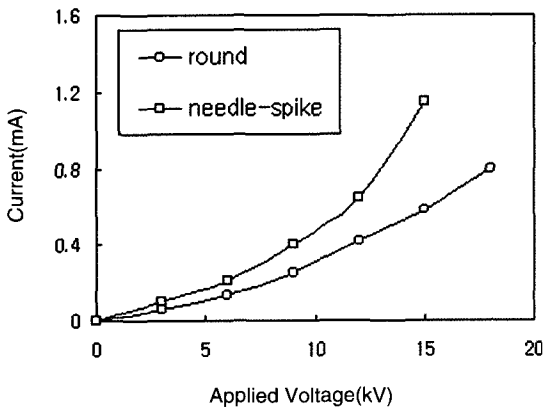


Fig. 4. Characteristic curves of the current-voltage for the electrode configuration of Fig. 2.

### 3.2 집진효율

본 실험에 사용한 세정집진기인 교차류형 충전탑의 액기비는 2.5 l/m<sup>3</sup>로 일반적으로 충전탑에 적용하는 값과 같게 조절하였으며, 이때 압력손실은 10~25 mmH<sub>2</sub>O로 측정되었다. 이러한 조건에서 교차류형 충전탑의 총괄 집진효율은 47.8%이었다. 이는 경유연소 보일러에서 발생하는 분진이 Fig. 3에 나타난 것과 같이 submicron의 작은 입자들로 구성되었기 때문에 세정집진 기작을 고려해 볼 때 낮은 효율로 측정된 것이라 사료된다. 또한 이러한 경유연소 보일러에서 배출되는 분진의 입경 분포는 본 연구에서 실험하려고 하는 전기하전식 세정집진기

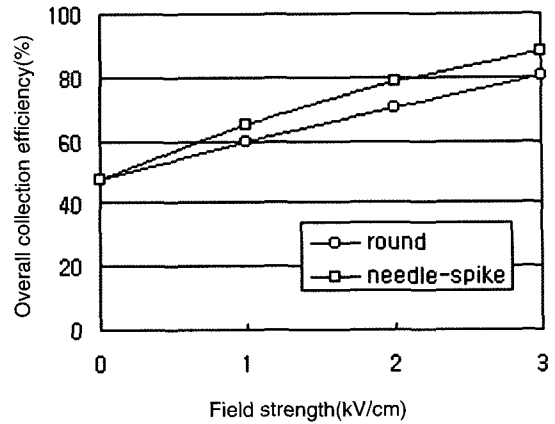


Fig. 5. Overall collection efficiencies of the electro-charged scrubber.

의 성능을 시험하는데 매우 알맞다고 판단된다.

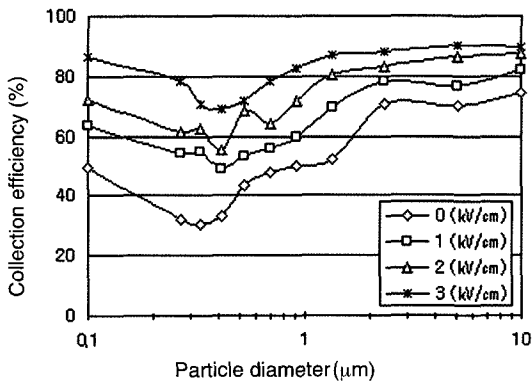
전기하전식 세정집진기의 집진효율에 영향을 줄 수 있는 하전부의 전류-전압특성을 방전극의 종류별, 전기장강도별로 측정하여 Fig. 4에 나타냈다. 날카로운 부분(sharp edges)이 많은 가시철심 방전극이 같은 전기장강도에서 높은 전류를 방전하는 것으로 나타났다. 또한 가시철심 방전극은, 전압을 -18 kV 이상으로 인가하면 스파크가 발생하여 집진실험을 -18 kV까지로 제한하여 실시하였다.

Fig. 5에는 방전극 종류에 따라 전기장 강도별로 총괄 집진효율을 나타냈다. 총괄 집진효율은 원형방전극의 전기장 강도가 1, 2, 3 kV/cm일 때 각각 61.1, 70.5, 80.3%이었고, 가시철심 방전극에서는, 각각 65.1, 78.4, 88.4%로 나타났다. 전기장 강도가 클수록 집진효율이 향상하였으며, 가시철심 방전극이 원형보다 좋은 결과를 나타냈다. 이것은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 가시철심 방전극은 동일한 전기장 강도에서 방전 전류량이 많아, 결과적으로 전력소비가 많은 방전극이 집진효율이 높은 것으로 나타났다.

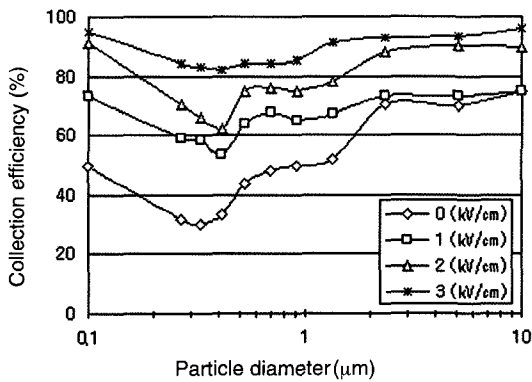
또한 부분 집진효율은 Table 1과 Fig. 6에 방전극의 종류별, 입경별로 나타내었다. 교차류형 충전탑에서의 효율은 전체적으로도 낮은 수준이며, 0.1~1.0 μm 범위의 분진들은 더욱더 낮은 효율을 나타내고 있다. 이에 반해 전기하전식 교차류형 충전탑에서는 작은 입자들에 대해 상대적으로 높은 집진효율을

Table 1. Collection efficiencies of the electrocharged scrubber.

size range (μm)	without charge	round (%)			needle-spike (%)		
		1 kV/cm	2 kV/cm	3 kV/cm	1 kV/cm	2 kV/cm	3 kV/cm
7.5~	74.7	82.3	87.3	89.9	74.7	89.9	95.9
3.7~7.5	70.0	76.7	86.7	90.0	73.3	90.0	93.3
1.9~3.7	70.7	78.0	82.9	87.8	73.2	87.8	92.7
1.1~1.9	52.2	69.6	80.4	87.0	67.4	78.3	91.3
0.8~1.1	50.0	60.0	72.0	82.5	65.0	75.0	85.0
0.6~0.8	48.0	56.0	64.0	78.0	68.0	76.0	84.0
0.5~0.6	43.8	53.1	68.8	71.9	64.1	75.0	84.4
0.4~0.5	33.3	48.9	55.6	68.9	53.3	62.2	82.2
0.3~0.4	30.2	54.7	62.3	70.8	58.5	66.0	83.0
0.2~0.3	31.8	54.5	61.4	78.2	59.1	70.5	84.1
~0.2	49.7	63.5	72.3	86.2	73.2	91.2	95.0
overall	47.8	62.0	70.5	80.3	65.9	78.4	88.4



a) Round shape electrode



b) Needle-spike electrode

Fig. 6. Collection efficiencies obtained from various field strengths.

나타내고 있는데, 전기장 강도가 커감에 따라 0.1~1.0 μm 부분의 집진효율이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

본 연구의 전기하전식 세정집진장치는 하전부와 집진부가 분리되어 하전부에서 정전기력에 의해 입자가 하전되고 세정집진기의 물에 의해 집진되는 형태로 만들어졌으며, 이는 2단형(2-stage) 전기집진기와 다소 유사한 형태이다. 그러나 하전부는 하전과 동시에 집진도 되리라 판단되는데, 이는 하전부가 원통형 전기집진기와 유사한 형태로 만들어졌기 때문이다. 하전부인 원형덕트내에서 입자가 하전되면서 방전극 주위의 덕트에 집진판 삼아 집진될 수도 있을 것이다. 이에 대해 Table 2는 하전부를 원통형 전기집진기와 같다고 가정하고 집진효율을 계산한 결과 값들이다. 이때 하전량의 계산은 식 (1), (2)와 같으며, 효율 계산식은 Deutsch 식을 근거로 하였다(오명도 등, 1994; Hinds, 1982; White, 1963). 또한 여기서 덕트내의 유속은 6.5 m/s이며, 집진판의 면적은 방전극의 설치 시작에서부터 세정집진장치의 외함이 시작되기 전까지로 하였다.

$$n_f = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \frac{E_p d_p^2}{e} \tag{1}$$

$$n_a = \frac{d_p \kappa T}{e^2} \ln \left[1 + \frac{\pi d_p C N_o e^2 t}{\kappa T}\right] \tag{2}$$

$$\omega = \frac{q E_p C_c}{3 \pi \mu d_p} \tag{3}$$

Table 2. Calculated collection efficiencies of the cylindrical electrostatic precipitator.

size range ( $\mu\text{m}$ )	round (%)			needle-spike (%)		
	1 kV/cm	2 kV/cm	3 kV/cm	1 kV/cm	2 kV/cm	3 kV/cm
7.5~	39.7	61.6	75.3	39.9	61.8	75.5
3.7~7.5	24.7	40.7	52.7	25.0	41.0	53.0
1.9~3.7	14.8	24.6	32.3	15.2	24.9	32.9
1.1~1.9	10.7	17.5	22.6	11.2	17.9	23.3
0.8~1.1	8.9	14.2	17.9	9.3	14.6	18.7
0.6~0.8	8.0	12.6	15.6	8.5	13.1	16.4
0.5~0.6	7.3	11.3	13.7	7.8	11.9	14.6
0.4~0.5	6.8	10.5	12.4	7.4	11.1	13.4
0.3~0.4	6.6	10.0	11.6	7.2	10.7	12.7
0.2~0.3	6.4	9.8	11.0	7.1	10.5	12.2
~0.2	6.4	9.7	9.8	7.5	11.0	11.7
overall	10.8	17.0	20.7	11.4	17.7	21.7

Table 3. Net collection efficiencies of the electrocharged scrubber.

size range ( $\mu\text{m}$ )	round (%)			needle-spike (%)		
	1 kV/cm	2 kV/cm	3 kV/cm	1 kV/cm	2 kV/cm	3 kV/cm
7.5~	42.6	25.7	14.6	34.8	28.1	20.4
3.7~7.5	52.0	46.0	37.3	48.3	49.0	40.3
1.9~3.7	63.2	58.3	55.5	58.0	62.9	59.8
1.1~1.9	58.9	62.9	64.4	56.2	60.4	68.0
0.8~1.1	51.1	57.8	64.6	55.7	60.4	66.3
0.6~0.8	48.0	51.4	62.4	59.5	62.9	67.6
0.5~0.6	45.8	57.5	58.2	56.3	63.1	69.8
0.4~0.5	42.1	45.1	56.5	45.9	51.1	68.8
0.3~0.4	48.1	52.3	59.2	51.3	55.3	70.3
0.2~0.3	48.1	51.6	67.2	52.0	60.0	71.9
~0.2	57.1	62.6	76.4	65.7	80.2	83.3
overall	51.3	53.5	59.6	54.6	60.7	66.7

$$\eta_{\text{sp}} = 1 - \exp\left(-\frac{\omega A}{Q}\right) \quad (4)$$

Deutsch 식은 전기집진기의 효율을 여러가지 측면에서 과대 평가하고 있는데 (Zhao and Zhang, 1994; Zhao and Zhang, 1992) 특히, 본 연구와 관련하여서는, 유속이 6.5 m/s로 매우 높아 재비산의 가능성이 많으나 이를 고려하지 못하고 있다. 그러나 재비산을 고려할 만한 이렇다할 식이 아직 개발되지 않았기 때문에 Deutsch 식을 적용하였다 (Tsai and Mills; 1995).

Table 3에는 본 실험의 전기하전식 세정집진기에서 측정된 효율값 (Table 1)에서 Table 2의 계산한 하전부의 효율값을 제하고 나타낸 값이다. 따라서

이 값은 순수하게 전기하전식 세정집진장치에 의해서 집진효율이 향상된 것이다. 또한 이 값에서도 교차류형 증진탑의 효율을 빼면, 하전부를 설치하고서 향상되는 집진효율을 알 수 있는데 총괄집진효율로 나타내면, 원형방전극의 1, 2, 3 kV/cm에서 각각, 3.5, 5.7, 11.8%이고, 가시철심방전극의 1, 2, 3 kV/cm 조건에서는 각각 6.7, 12.9, 18.9%이다. 그다지 집진효율이 향상되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 작은 입자의 경우 즉, submicron 입자들의 집진효율은 비교적 좋은 향상 폭을 보이고 있다.

이상의 고찰에서 세정집진장치의 앞부분에 하전부를 설치한 전기하전식 세정집진기는 submicron 입자의 효율을 향상시키는데 좋은 역할을 하는 것으로 사료된다. 그러나 본 실험에서는 하전부의 덕

트에 포집된 분진의 제거, 전기장 강도의 증가, 하전 시간(처리가스의 유속), 분진의 전기비저항(처리가스의 온도) 등 집진효율에 영향을 줄 수 있는 다른 요소들에 대해서는 충분히 연구되지 못했다. 추후 이에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

세정집진장치의 집진효율을 향상시키기 위하여 전기하전부를 교차류형 충전탑 앞부분의 덕트에 설치하고, 하전부의 방전극과 전기장 강도를 변화시켜 가며 실험한 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

분진을 발생시키기 위해 경유연소 보일러를 사용했는데, 경유 연소시에 submicron 입자가 중량농도로 비교하여 80% 정도로 배출되었다.

전기하전식 세정집진기는 2단형 전기집진기와 유사한 집진특성을 갖는 것으로 파악되었고, 기존의 세정집진기보다 좋은 집진효율을 나타냈다. 특히 submicron 입자에서 더욱 더 좋은 효율을 나타냈다.

방전극과 전기장강도를 변화시켜 수행한 실험에서 원형보다 가시철심 방전극이 높은 집진효율을 나타냈으며, 전기장강도가 커짐에 따라 집진효율도 향상되었다.

#### 기호설명

- $n_f$  : 전기장하전에 의한 하전량(esu)
- $n_d$  : 확산하전에 의한 하전량(esu)
- $E_p$  : 전기장 강도(V/cm)
- $d_p$  : 입자의 크기( $\mu\text{m}$ )
- $\epsilon$  : 입자의 유전상수( $\epsilon=3$ )
- T : 절대 온도(K),
- C : 이온의 열적평균 속도( $2.45 \times 10^4 \text{ cm/s}$ )
- $N_o$  : 이온 농도(개/cm<sup>3</sup>)
- t : 하전시간(sec)
- e : 기본 전하( $4.8 \times 10^{-10} \text{ esu}$ )
- k : 볼츠만 상수( $1.38 \times 10^{-16} \text{ dyn} \cdot \text{cm/K}$ )
- $\omega$  : 입자의 이동속도(m/s)
- q : 하전량( $q = e(n_f + n_d)$ )
- A : 집진면적(m<sup>2</sup>)

- $C_c$  : 커닝햄 미끄럼 보정계수
- Q : 유량(m<sup>3</sup>/s)

#### 감사의 글

본 연구는 1997년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며, 이에 감사를 표합니다.

#### 참 고 문 헌

김신도, 김종호, 봉춘근(1995) B-C유 연소에 의한 입자상 오염물질의 배출특성 및 전기집진 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 17, 1271-1277.

오명도, 유경훈, 이준식(1994) 2단 평행판 정전식 집진기에서의 입자하전 및 포집, 대한기계학회논문집, 18, 432-445.

박영욱, 손재익(1994) 폐기물 소각 배가스 제어기술(1)-분진제거-, 한국폐기물학회지, 11, 302-317.

檜山和成(1994) スクラバ式電氣集塵装置(イオンスクラバ), 靜電氣學會誌, 18, 424-428.

Joma Joutsensaari *et al.* (1992) Aerosol Formation in real Scale Pulverized Coal Combustion, Journal of Aerosol Science, 23, S241-S244.

Pilat, M.J., Jaasund, S.A., and Sparks, L.E. (1974) Collection of aerosol particles by electrostatic droplet spray scrubbers. Environ. Sci. Technol., 6, 360-362.

Seymour, C. and Harold M.E. (1984) Handbook of Air Pollution Technology, A Wiley-Interscience publication.

Tsai, R. and Mills, A.F. (1995) A Model of Particle Re-entrainment in Electrostatic Precipitators, Journal of Aerosol Science, 26, 227-239.

William, C. Hinds (1982) Aerosol Technology - Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, A Wiley-Interscience publication.

Zhao Zhibin and Zhang Guoquan (1992) New Model of Electrostatic Precipitation Efficiency Accounting for Turbulent Mixing, Journal of Aerosol Science, 23, 115-121.

Zhao Zhibin and Zhang Guoquan (1994) Investigations of the Collection Efficiency of an Electrostatic Precipitator with Turbulent Effects, Aerosol Science and Technology, 20, 169-176.