

Particle Agglomeration of a Bipolar Charging System with a Control Grid

文在德[†] · 安昶鎭^{*}
(Jae-Duk Moon · Chang-Jin Ahn)

Abstract - In this paper, an experimental study for method of increasing the efficiency of electrostatic precipitator for the collection of submicron-sized particles has been studied. An AC electric field was used to induce agglomeration of bipolarly charged particles. A bipolar AC-agglomeration system, consisted with a multineedle-mesh discharge system with a control grid, was proposed and investigated. Systematic experiments were carried out to investigate the agglomeration ratio of the AC-agglomeration system as a function of the different grid spacings and grid resistances for the submicron particles generated from liquid propane gas burning. The agglomeration ratios, which indicate the particle numbers before and after agglomeration of the test particles in number concentration base, were found to be 0.87, 1.80, 5.86, 9.50 and, 11.00 times for the particle sizes of 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, and 2.0 μm at applied voltage of 3.5kV, respectively, which showed that the fine particle numbers were decreased while the larger particle numbers were increase greatly.

Key Words : Particle Agglomeration, Submicron Particle, Bipolar Corona Charging, Multineedle-mesh Discharge System, Control Grid, Agglomeration Ratio.

1. 서 론

최근 산업의 발달과 자동차의 많은 증가로 말미암아 이들로부터 배출되는 미세입자들에 의한 대기환경의 오염은 매우 심각한 정도에 이르고 있다[1-3]. 디-젤 자동차 등에서 배출되는 미세입자들(sub-micron particles, 0.1~0.5 μm)은 입자경이 매우 작아서 공기중의 점성력(viscosity)이 매우 크기 때문에 코로나 하전에 의한 전기집진장치가 가장 어려운 입자경으로 알려져 있다[4-6]. 이들 미세입자는 확산운동에 의해 인간의 기관지나 폐속에 흡입 부착되기 쉽고, 또, 암을 유발시키는 매우 유해한 것[2-3]이기 때문에, 이 미세입자 제거를 위한 많은 연구가 수행되고 있는 실정이다[3-4].

입자를 제거하는 집진장치중 전기집진장치는 기계적 집진방식[7]이나 여과포[7]에 비해 낮은 압력손실, 저렴한 유지 및 운전비를 가지고, 설치한 후의 장치수명이 길며, 또한, 높은 집진 효율을 나타내기 때문에 입자 집진장치로서 매우 효과적이거나, 미세입자(submicron particles)에 대한 집진효율이 낮은 문제점을 가지고 있다[5-7].

이 미세입자들의 크기를 증대시킴으로써 집진을 용이하게 할 수 있게 하는 방법이 제안되어 있다[8, 9]. 즉, 이들 미세입자들을 한편에서는 정극성으로 하전시키고, 다른 한편에서

는 부극성으로 하전시켜서, 이들 정과 부의 미세입자를 동일 공간으로 유입시켜서 전기적(Coulomb force)으로 서로 부착(응집, agglomeration)시켜 증대시키는 방법이다. 이와 같은 미세 입자들의 응집에 관한 연구들은 아직 이론적인 해석과 검토면으로 치중되어 있고[10-12], 실험에 의한 연구 결과는 아직 많이 발표되지 못하고 있다[1, 13].

본 논문에서는 제어전극을 갖는 다침대 평판전극계를 대칭되게 설치한 미세입자 응집장치를 제안하고, 정 및 부극성의 코로나 방전을 발생시켜서 인입 입자를 하전시켜 상호간의 정전력으로 응집시키는 장치를 제작하였다. 그리고, 본 제안한 장치의 인가전압과 제어전극 간격이 미세입자 응집 특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구 검토 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 본 연구 실험장치의 개략도로서, 입자 응집장치(PA), 교류 인가전압(AC), 입자 발생장치(PG), 입자 측정장치(PC), 그리고, 공기 인입장치(AB와 FM)로 구성되어 있다.

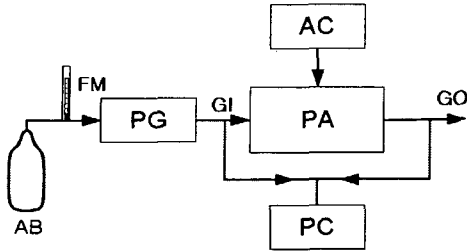
그림 2에서는 제어전극을 갖는 쌍 극성 입자 응집장치의 입자 응집 개념도와 회로도(그림 2(a)) 및 사진(그림 2(b))을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 미세 입자 인입부, 다침(Cp1, 2)대 그물형(Sm1,2)로 구성된 코로나 방전부, 제어전극(Cg1,2)부, 그리고, 전원(ac HV)부로 구성되어 있다.

다침대 평판형 방전부는 정 및 부극성 코로나 방전을 효율적으로 발생시키기 위하여 쌍 방향의 다침대 그물 전극형(multineedle-mesh discharge system)으로 구성하였다. 그리고 코로나 방전을 제어하기 위하여 제3의 제어전극(control grid)을 설치하였으며, 이 제어전극(control grid)에

[†] 교신저자, 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 教授 · 工博
E-mail : jdmooon@knu.ac.kr

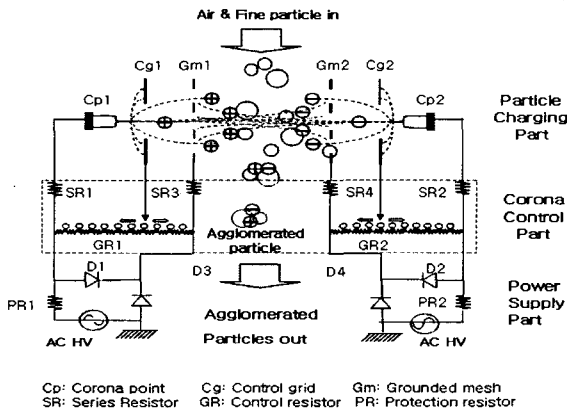
^{*} 學生會員 : 慶北大 大學院 電氣工學科 工學碩士
接受日字 : 2005年 7月 25日
最終完了 : 2005年 8月 31日

는 원형의 구멍(ion passing airhole, fixed diameter $h=12.5\text{mm}$)을 갖게 하여 방전침 선단의 이온들이 통과할 수 있게 구성하였다. 이 제어전극과 침전극선단과의 전계를 전극 간격(gap spacing, S_g)과 제어전압으로 조절함으로써 코로나 방전 전류를 제어할 수 있게 구성하였다.



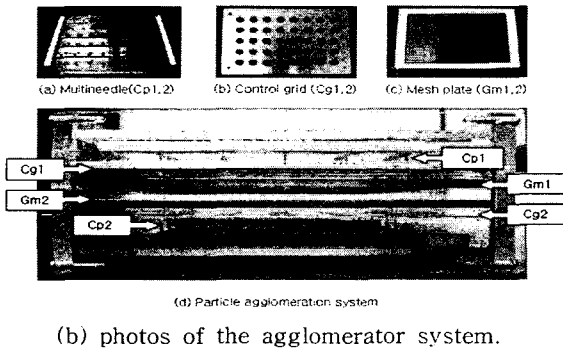
AB	dry air bombe	AC	AC power supply
FM	flowmeter	GI	gas inlet
GO	gas outlet	PA	particle agglomerator
PC	particle counter	PG	particle generator

그림 1 실험장치 개략도.
Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.



Cp: Corona point Gc: Control grid Gm: Grounded mesh
SR: Series Resistor GR: Control resistor PR: Protection resistor

(a) block of experimental system and test circuit.



(b) photos of the agglomerator system.

그림 2 제안한 미세입자 응집장치의 회로도 및 사진.
Fig. 2 Electrical diagram of particle agglomeration system and photos.

이때 제어전극(Cg_1, Cg_2)과 침전극간의 간격(S_g) 및 제어저항(grid resistance, R_g)을 각각 $-1.0, 0.0, 1.0, 2.0\text{mm}$ 과 $0\sim$

$10\text{M}\Omega$ 로 가변하여, 제어간격 및 제어전압이 코로나 방전에 미치는 영향을 조사할 수 있게 하였다. 코로나 방전전극은 8개의 침을 갖는 5개의 톱날선편(saw tooth strip-line, SUS, 0.2mm thick, total 40 needle points)들의 배열로 이루어져 있고, 이들은 상호 20mm 의 간격을 이루고 있으며, 각침의 길이는 10mm 이다. 제어 전극판(control grid electrode, Al plate, $250\times 180\text{mm}$ size, fixed thickness $W=1.0\text{mm}$)상에는 8개의 구멍(airhole, fixed diameter $h=12.5\text{mm}$)을 한 줄로 하는 5줄(total 40 air holes)을 형성하여, 각각 다침 방전극에 대응하게 구성하였다. 또한 평판전극으로는 접지된 그물전극(grounded mesh, SUS, $3\times 3\text{mm}$ mesh, $250\text{mm}\times 180\text{mm}$ wide)를 사용하였다. 인가 고전압은 측정부에서 고전압 프로브(high voltage probe, 1,00:1, Tektronix 1600A)를 이용하여 전압계(digital voltmeter, DVM, Fluke 75)로 측정하였다. 그리고 코로나 전류는 저항(series resistor, SR1, SR2)의 양단에서, 그물전극에 도달하는 이온전류는 직렬저항(series resistor, SR3, SR4)의 양단에서 DVM(Fluke 75)으로 측정하였다. 미세입자 발생기는 급속통(Al booth, $400\text{mm}\times 500\text{mm}\times 500\text{mm}$)속에서 휴대용 프로판 가스 불꽃 방사기(flame torch)의 불꽃을 냉각수가 들어 있는 구리관으로 급냉(quenching)시켜서 미세입자가 발생하게 하였다[14]. 이때 공업용 압축 건조공기를 1.0LPM 의 고정 유량으로 입자 발생기내에 공급하고, 이 입자발생기에서 배출되는 미세 입자가 함입된 공기를 본 제한한 응집장치 입구에 인입하였다. 입자경은 레이저광의 파장을 이용한 미세입자 측정기(airborne particle counter, HHPC-6)를 사용하여 본 실험의 입자 응집장치의 입출구에서 측정하였다. 전원부는 동일한 교류 고전압 변압기(high voltage transformer, $7.5\text{kV}/60\text{Hz}$) 2대를 서로 역극성이 되게 연결하였고, 전압 가변기(slidacs, $0\sim 220\text{V}$, variable)로 출력 고전압을 가변하여 실험하였다.

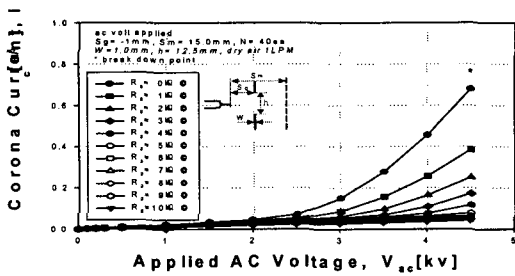
3. 실험결과 및 고찰

3-1 다침대 그물방전장치의 입자 응집 원리

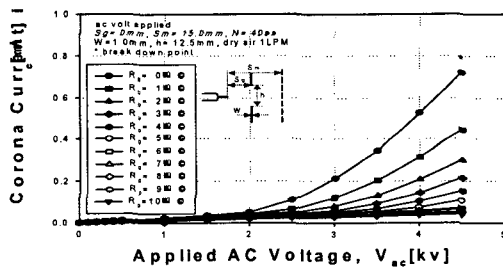
그림 2(a)와 같은 쌍극성 입자 응집장치에 교류전압을 인가하면, 교류 전압의 첫 번째의 정의 반주기 동안에는 Cp_1 과 Cg_1 에는 정의 고전압이, 그리고 Gm_2 는 부의 고전압이 인가되게 되어, Cp_1 에서는 정 코로나가 발생되게 되고, Cg_1 은 제어전극의 역할을 하게 된다. 이와 동시에, Cp_2 와 Cg_2 에 부의 고전압이 인가되게 되고, Gm_1 은 정의 고전압이 되고, Cp_2 에서 부 코로나가 발생되어, 양쪽에서 정 및 부 극성의 코로나 방전이 발생하게 된다. 이때, Cg_1 과 Cg_2 는 제어전극의 역할을 하게 된다. 또한 Cg_1 과 Cg_2 에 인가하는 제어전압은 Cp_1 과 Gm_1 , Cp_2 와 Gm_2 간의 제어저항(grid resistance, R_g)을 조절함으로써 제어할 수 있게 되며, 이와 같은 원리는 3극 진공관의 원리와 같게 된다. 다음, 인가 교류전압의 극성이 반전되면, 역전된 부 및 정극성의 이온들이 Gm_1 과 Gm_2 사이로 인입된다. 이때 반송공기중의 미세입자들이 Gm_1 과 Gm_2 간의 공간에 인입되면, 좌우의 정 및 부 이온들에 의해 서로 역극성으로 하전되고, 유입공기의 흐름을 따라 이동되면서 상호 정전력과 영상력에 의해 흡인 부착하여 큰 입자로 응집되게 된다[15, 16].

3-2 다침대 그물방전장치의 코로나 방전 제어특성

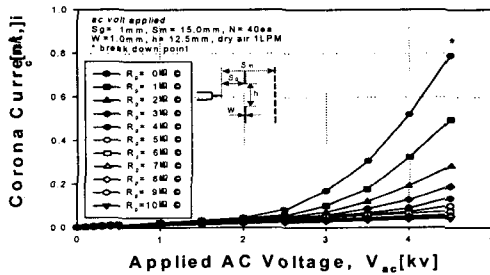
그림 3은 Cp1, Gm1, Cg1 전극계의 코로나 방전특성으로, 침과 제어전극간의 간격(Sg)의 변화와 제어저항(Rg) 가변에 따른 I-V특성을 나타낸 것이다. Cp1과 Gm1 전극계에는 전형적인 코로나 I-V특성을 나타내나[5, 7, 15], Sg와 Rg 가변에 따라 I-V특성이 크게 변화함을 보여준다. 즉, Rg=0~10 MΩ의 범위로 가변할 경우, ic=0~0.8mA까지 변화하는 것을 보여주며, Sg=-1.0~2.0mm로 가변될 경우 ic=0.6~0.8mA까지 변화하는 것을 보여준다. 즉, Sg가 각각 -1.0, 0.0, 1.0 그리고 2.0mm로 증가하는 경우, V=4.5kV일 때의 ic는 각각 0.71, 0.75, 0.82 그리고 0.66mA로 나타나며, Sg=0.0~1.0mm 정도일 때 최대 코로나 방전전류를 얻을 수 있는 적정 조건임을 보여준다.



(a) Sg = -1.0[mm]



(b) Sg = 0.0[mm]



(c) Sg = 1.0[mm]

그림 3 제어저항 변화에 따른 코로나 전류-전압특성. Fig. 3 I-V characteristics for different grid resistance.

그림 4는 Cp1, Gm1, Cg1 전극계의 코로나 전류특성을 Rg 가변에 따라 나타낸 것이다. 본 다침대 그물전극계 구조의 코로나 방전특성은 Sg와 Rg의 가변으로 조절할 수 있음을 보여준다. 동일한 Sg에서는 Rg가 작을수록, 즉, Cp1과 Cg1의 전압차가 클수록, 큰 코로나 방전전류를 얻을 수 있고, Rg가 크면 침전극의 전압과 제어전극의 전압이 동일하

게 되어 제어전극 Cg의 코로나 제어 능력은 약해지는 것을 보여준다.

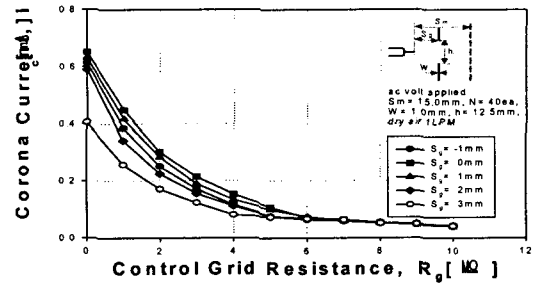
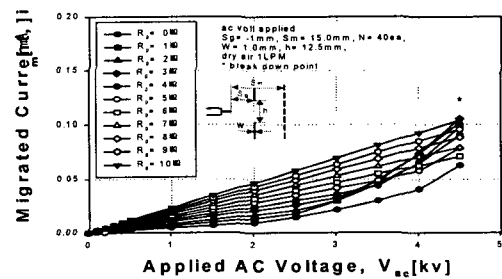


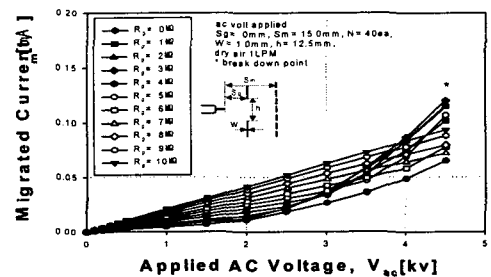
그림 4 제어저항과 제어전극 간격 변화에 따른 코로나 전류.

Fig. 4 Corona current vs grid resistance for different grid spacings.

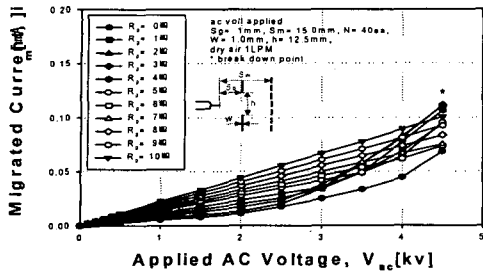
그림 5는 본 Cp1, Cg1, Gm1 방전장치의 Sg와 Rg의 변화에 따른 그물전극 Gm2에 도달하는 이온전류(migrated ion current)의 인가전압 변화에 따른 특성을 나타낸 것이다. 본 제안한 제어전극을 갖는 다침대 그물형 장치에 상용 교류 전압이 인가되는 경우, 본 장치의 I-V 특성은 용량성 변위전류(capacitive displacement current)와 코로나 방전전류(corona discharge current)의 합으로 나타나게 된다. 즉, 인가전압이 인가되면 본 장치의 전류는 직선적으로 증가하는 변위전류(그림 5의 직선 부분)가 먼저 흐르게 된다. 그러나 인가전압이 증가하여 본 장치의 코로나 개시 전압(그림 5의 변곡 부분)이 상으로 증가하면, 다침상에 코로나 방전이 발생되어 본 장치에는 코로나 방전전류(그림 5의 곡선 부분)도 흐르게 되고, 그림 5와 같이 변위전류와 코로나전류의 중첩 전류를 나타내게 된다.



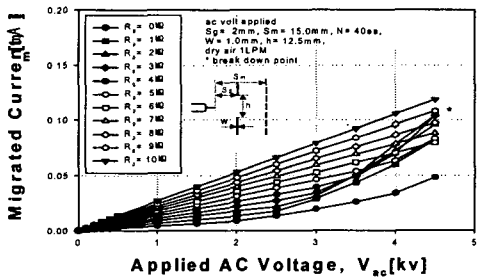
(a) Sg = -1.0mm



(b) Sg = 0.0mm



(c) $S_g = 1.0\text{mm}$



(d) $S_g = 2.0[\text{mm}]$

그림 5 제어저항 변화에 따른 이온전류-전압특성.
Fig. 5 Migrated ion current vs apply AC voltage or different control resistances.

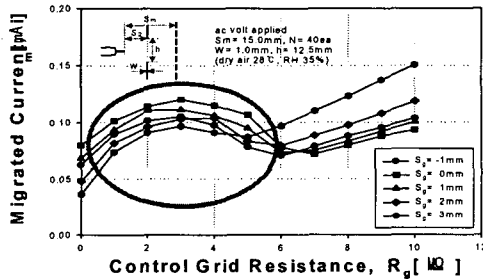


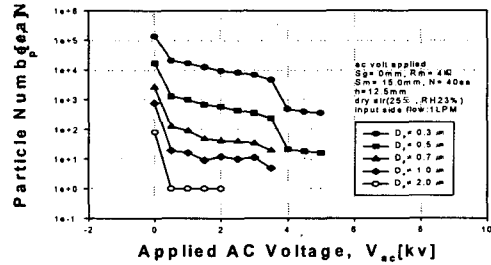
그림 6 제어전극 간격 변화에 따른 이온 전류-제어저항 특성.
Fig. 6 Migrated ion current vs grid resistance for different grid spacings.

그림 6은 Cp1, Cg1, Gm1 전극계의 Gm2에 도달하는 이온 전류(migrated ion current), i_m 을 나타낸 것이다. i_m 은 R_g 의 변화에 따라 매우 큰 영향을 받으며, 특히, R_g 의 범위가 1~4MΩ일 때. 즉, [(2~4MΩ)/10MΩ]Vac의 제어전압일 때, 상대적으로 가장 큰 i_m 값을 가짐을 보여준다. 따라서 $S_g=0.0\sim 1.0\text{mm}$ 일 경우, $R_g=2\sim 4\text{M}\Omega$ 가 본 장치의 적정 제어전압 조건임을 보여준다.

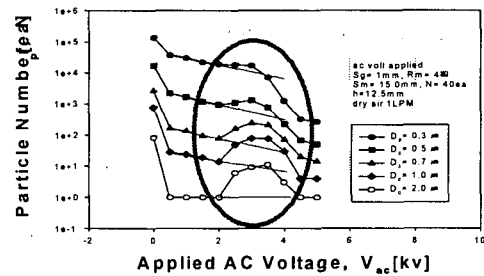
3-3 제어전압 변화에 따른 입경별 입자 응집 특성

그림 2와 같은 2조의 다침대 그물전극간에 양편에서 쌍극성 코로나 방전이 생성되어 쌍극성 이온들이 각각 그물전극을 향하여 이동되어 오게 된다. 즉, ac 전원의

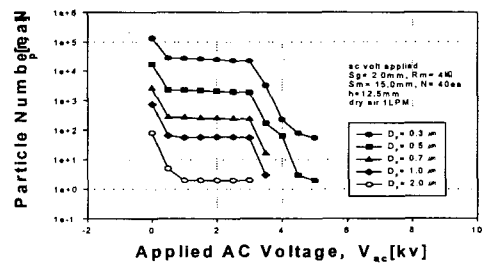
첫 반주기에는 Cp1의 정극로나가 생성되어 정이온들이 Gm2을 향해 이동되어 오게 되고, 이때 Cp2에서는 부극로나가 발생되어 부이온들이 Gm1을 향해 이동되어 오게 되어, Gm1과 Gm2 공간에서 만나게 된다. 이때 공기 유입구로부터 미세입자들이 Gm1과 Gm2 공간으로 유입되면, 이들 미세입자에는 한쪽(Cp1)은 정극성으로 다른 쪽(Cp2)은 부극성으로 각각 하전하게 된다. 따라서 이들 정과 부의 미세입자를 전기적(Coulomb force)으로 서로 부착(응집)되어 입자 크기는 증대되게 된다[8,9].



(a) $S_g = 0.0\text{mm}$



(b) $S_g = 1.0\text{mm}$



(c) $S_g = 2.0\text{mm}$

그림 7 제안한 응집장치의 인가전압과 제어간격 변화에 따른 입자수 분포 특성.

Fig. 7 Particle number distribution as a function of applied AC voltage for different grid spacings.

본 장치의 경우, 본 장치내로 인입되는 공기의 유량은 1.0LPM이고, 따라서 유속은 1.33cm/s이고, 체류시간은 13.5s를 가진다.

이와 같은 입자 응집 작용의 결과는 본 입자 응집장치의 인가하는 전압 유무시의 응집장치의 공기 배출구의 입자 직경별 입자 수를 측정하여 비교함으로써 미세입자의 응집 특성을 확인할 수 있게 된다.

그림 7은 본 쌍극성 다침대 그물전극형 입자 응집장치

의 교류전압(Vac)과 제어간격(Sg) 변화에 따른 본 장치의 공기 인입구와 배출구에서의 입자수 분포특성을 나타낸 것이다. 그림 7에서 보는 바와 같이 Vac=0kV, 즉, 전압이 인가되지 않은 경우의 본장치 입구에는 입자경 $D_p=0.3\sim 2.0\mu m$ 의 범위의 많은 입자수가 나타남을 보여준다. 그러나, Vac $\geq 1kV$ 의 경우, 즉, 본 장치의 코로나 방전 개시전압 이전에는 코로나 방전이 발생하지 않기 때문에 전기집진이 발생하지 않게 되나, 입자수는 감소하는 것을 보여준다. 이는 인입 미세입자가 본 입자 응집장치를 통과하는 동안에 이들 미세입자의 확산운동에 의해 본장치의 내벽에 많이 부착(기계적 집진[17])되어 출구의 입자수가 크게 감소하는 것에 의한 것이다[15]. 전압이 인가되어 더욱 증가하면, 즉 코로나 방전 개시전압 이상의 Vac $>2kV$ 경우, 입자수는 전반적으로 감소하는 경향을 보여 주는데, 이는 쌍극성 이온들에 의해 하전된 입자들이 정전력[5, 15, 16]과 영상력[5, 14, 15]에 의해 그물전극에 전기집진되기 때문인 것이다.

그러나, Sg=0.0mm 경우, Vac $<2kV$ 에서는 전 입경의 입자수가 감소하는 경향을 보여주나, Vac $>2.5kV$ 의 경우 전 입경별 입자수의 감소 추세가 완만해지며, 입자경 D_p 가 $0.7\mu m$ 과 $1.0\mu m$ 에서는 오히려 입자수가 증가하는 것을 보여준다. 다음, 그림 7(b)의 Sg=1.0mm의 Vac=2~4.5kV의 경우, 입자수는 급격히 증가하는 경향을 보여준다. 즉, Vac=2~4.5kV에서는 전 입경의 입자 수가 증가하며, Vac=2.5~3.5kV부근에서 최대 값이 됨을 보여준다. 이는 그림 6에서 본 바와 같이 Vac= 2.5~3.5kV에서 이온전류가 최대가 되어 인입 미세입자들을 가장 효과적으로 하전하게 되고, 이때 상호 반대극성으로 하전된 입자들이 가장 많이 응집할 수 있는 조건이 만족되기 때문에, 가장 효과적으로 입자들이 응집했기 때문으로 사료된다.

표 1 본 응집장치의 입자 응집특성 결과.

Table 1 Results of the particle agglomeration.

Dp [μm]	Vac=2.5kV			Vac=3.0kV		
	N _B	N _A	N _A /N _B	N _B	N _A	N _A /N _B
0.3	14,200	17,807	1.24	11,000	16,772	1.52
0.5	730	1,089	1.51	550	1,285	2.34
0.7	60	162	2.61	46	238	5.17
1.0	12	49	4.10	10	78	7.80
2.0	1	6	6.00	1	9	9.00

Dp [μm]	Vac=3.5kV			Vac=4.0kV		
	N _B	N _A	N _A /N _B	N _B	N _A	N _A /N _B
0.3	8,200	7,112	0.87	6,450	1,219	0.18
0.5	420	756	1.80	320	226	0.71
0.7	35	205	5.86	28	76	2.50
1.0	8	76	9.50	6	30	5.00
2.0	1	11	11.00	1	3	3.00

N_A: Particle size distribution after agglomeration,

N_B: Particle size distribution before agglomeration.

표 1은 본 입자 응집장치의 입자 응집특성을 인가 교류전압과 입자 직경별로 나타낸 것이다. 표 1에서의 N_B와 N_A는 각각 본 응집장치의 응집특성 곡선인 그림 7(b)의 결과, 즉, N_B는 곡선 부분에서 그리고 N_A는 직선부분에서 구한 응집 전후의 입자수 특성에서 구한 것이다. 표 1의 입자

수 응집율(agglomeration ratio) N_A/N_B 값은 입자경이 증가할수록 크게 증가함을 보여주며, 인가전압의 증가에 따라서도 증가하는 것을 보여 주었다. 인가전압이 Vac=0kV 때, 즉, 응집작용이 없는 경우(N_A)와 Vac=3.5kV의 응집작용이 있는 경우(N_B)를 비교해 보면, D_p 가 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 그리고, $2.0\mu m$ 일 때, 입자수 응집율은 0.87, 1.80, 5.86, 9.50 그리고, 11.00배로 각각 매우 크게 증가하는 것을 보여준다.

이는 입자경이 증가하면 표면적은 자승으로 증가하게 되고[5], 따라서, 하전량도 매우 커지며[5], 또한, 큰 입자경을 가지면 확산운동도 작아지기 때문[5]에 서로 다른 극성의 입자가 만날 수 있는 시간(residual time)이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 사료된다.

이상의 결과는 본 제안한 입자 응집방법 및 장치는 자동차 배진 같은 미세입자 응집장치로서 매우 효과적일 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 제어전극을 갖는 다침대 그물전극계형의 미세입자를 응집시키는 방법과 이를 적용한 미세입자 응집장치를 제안하였다. 제안한 제어전극을 갖는 다침대 그물전극장치의 제어전극 간격과 제어저항(전압) 변화가 미세입자 응집특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제어전극을 갖는 다침대 그물전극계의 제어전극 간격과 제어저항의 변화가 I-V특성에 매우 큰 영향을 미치며, 이를 이용하면 그물전극에 도달하는 이온전류도 제어할 수 있음을 보여주었다. 실험 결과, 가장 큰 이온전류를 얻을 수 있는 적정 제어전극과 침전극간의 간격은 Sg=0.0~1.0mm이고, 제어 저항의 범위가 Rg=2~4M Ω 임을 보여 주었다.

(2) 탄소 미세입자의 응집 특성을 조사한 결과, 미세 탄소 입자의 입자수 응집율은 입자경과 인가전압이 증가할수록 크게 증가하는 경향을 보여 주나, 인가 전압에는 적정 값이 있음을 보여 주었다. 인가전압이 Vac=0kV 때, 즉, 응집작용이 없는 경우와 Vac=3.5kV의 응집작용이 있는 경우를 비교해 보면, D_p 가 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 그리고, $2.0\mu m$ 일 때, 입자수 응집율은 0.87, 1.80, 5.86, 9.50 그리고, 11.00배로 각각 크게 증가함을 보여 주어, 본 제어전극을 갖는 다침대 그물전극장치와 입자 응집 방법은 매우 유효한 것을 보여 주었다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

- [1] W. Wang, Z. Zhao, F. Lie and S. Wang, Study of NO/NO_x removal from flue gas contained fly ash and water vapor by pulsed corona discharge, Journal of Electrostatics, 63 (2005) 155-164.
- [2] H. J. Kim, et al. Ultrafine carbon particles inhabit

human fibroblast-mediated collagen gel contraction, American Journal of Respiratory Cell Molecular Biology, 28, 1 (2003) 111-121

[3] J. T. Zelikoff, et al, Effects of inhaled ambient particulate matter on pulmonary antimicrobial immune defense, Inhal. Toxicol 15, 2 (2003) 131-150.

[4] Y. Kuroda, et al, Effect of electrode shape on the discharge current and performance with barrier type electrostatic precipitator, Journal of Electrostatics, 57 3-4 (2003) 407-415.

[5] 新版靜電氣ハンドブック, 日本靜電氣學會, 27-3 (1998)

[6] A Mizuno "Electrostatic Precipitation" IEEE Trans. on DEI, 7 5, October 2000

[7] Harry J. White, Industrial electrostatic precipitation, Addison-Wesley Co, INC. 1963

[8] Y. Koizumi, et al, "Bipolar-charged submicron particle agglomeration", Journal of Electrostatics, 35, 1 (1995) 55-60

[9] M Alonso, et al, Bipolar Charging and Neutralization of Nanometer-sized Aerosol Particles, Journal of Aerosol Science, 28, 8 (1997)1479-1490.

[10] A. Laitinen, et al, Bipolar charged aerosol agglomeration with alternating electric field in laminar gas flow, Journal of Electrostatics, 38, 4 (1996) 303-315.

[11] J. Kulton, et al, A Bipolar Charge Measurement System for Aerosol characterization, IEEE Trans. on IA, 37, 2 (2001) 472-479.

[12] Jun-Ho Ji, et al, Particle charging and agglomeration in DC and AC electricfields, Journal of Electrostatics, 61, (2004) 57-68.

[13] M. Lackowski, A. Jaworek, A. Krupa, Current-voltage characteristics of alternating electric field charger, Journal of Electrostatics, 58, 1-2 (2003) 77-89.

[14] S. Masuda and Jae-Duk Moon, Electrostatic Precipitation of Carbon Soot from Diesel Engine Exhaust, IEEE Trans. on IA 19, 6 (1983) 1104-1111.

[15] 日本靜電氣學會, 靜電氣ハンドブック (1981) 259-267

[16] J. S. Chang, et al, Handbook of Electrostatic Processes, Marcell Dekker, Inc., (1995)

[17] O. Storch, Industrial Separators for Gas Cleaning, Elsevier Science Pub. Co. (1979) 199-213.

저 자 소 개



문재덕 (文在德)

1946년 7월 25일생. 1970년 경북대 사대 과학교육과(물리전공) 졸업. 1975년 동대학원 전자공학과 졸업(공학). 1982년 일본 동경대학 대학원 전기공학과(공학박). 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수.

Tel : 053-950-5601
 Fax : 053-950-5508
 E-mail: jdmoon@knu.ac.kr



안창진 (安昶鎭)

1977년 12월 1일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 현재 경북대학교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업.

Tel : 053-940-8601
 Fax : 053-950-5508
 E-mail: paranshine@naver.com