

AC 전기장내 하전 액체 입자의 응집에 관한 실험적 연구

지준호* · 황정호[†] · 배귀남** · 김용진***
(2000년 9월 28일 접수, 2001년 1월 17일 심사완료)

Experimental Study on Electrical Agglomeration of Liquid Particles in an Alternating Electric Field

Jun-Ho Ji, Jung-Ho Hwang, Gwi-Nam Bae and Yong-Gin Kim

Key Words: AC Electric Field(AC 전기장), Bipolar Charged Particle(양극성 하전 입자), Agglomeration(응집), Liquid Particle(액체 입자), Particle Size Distribution(입경 분포)

Abstract

Experiments were carried out on agglomeration of bipolarly charged particles in an alternating current electric field. Laboratory-scale setup was built and experiments were conducted at atmospheric condition. DOS(Di-octyl Sebacate) particles with 100% purity were generated by an atomizer. The particles were branched into two, each of which passed through a wire-to-plate type charging section where a positive or a negative DC high voltage was applied and was charged positively or negatively. These bipolarly charged particles together passed through an agglomeration section where an $\pm 20\text{kV}$ AC power was applied between two plates. The resident time in the agglomeration section was adjusted as 1 sec. Particle sampling was made by a cascade impactor (MOUDI). The effect of agglomeration system on the reduction ratio of particles below $1\ \mu\text{m}$ was 42~45%. Effect of AC frequency on the particle size distribution was found insignificant.

1. 서 론

입자의 물리, 화학적 특성은 입자 크기와 관계가 있다. 특히 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자들은 환경 분야에서 관심의 대상이 되고 있는데, 대기 중 장시간 부유하여 시정을 감소시키거나 중금속이나 다른 유해한 기체상 성분들과 화학 반응을 통해 2차 오염원으로 작용하기도 한다. 또, 인체에 유입되는 경우 폐 깊숙이 침투해 폐포에 장기간

머물러 앉이나 돌연변이의 원인이 될 수 있다고 알려져 있다. 최근에는 이런 유해한 미세 입자들을 좀 더 엄격히 규제하려는 움직임들이 나타나고 있다. 미세 입자의 유해성에 대한 인식을 보여주는 예로, 직경 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 분진 총량을 규제하는 PM10이나 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하를 대상으로 하는 PM2.5의 대기 규제는 더 작은 입자 크기를 대상으로 이동하고 있다. 또 이런 추세는 미세 입자의 정량화에 용이한 방법인 수농도 기준 규제의 움직임으로 나타나고 있다.

미세 입자는 주로 연소 생성물에서 기인하고, 대기로 배출되기 전에 전기 집진기나 백필터 등의 입자포집장치를 통해 걸러진다. 정전 집진기는 주로 화력 발전소의 배출 가스를 집진하는데, 총 질량 집진 효율은 99% 이상인 반면 미세입자 ($0.1\sim 1\ \mu\text{m}$)의 경우는 85%로 상대적으로 효율이 낮다.⁽¹⁾ $1\ \mu\text{m}$ 이하 입자들의 집진 효율이 상대적

* 연세대학교 대학원 기계공학과

[†] 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

*** 회원, 한국기계연구원 열유체환경연구부

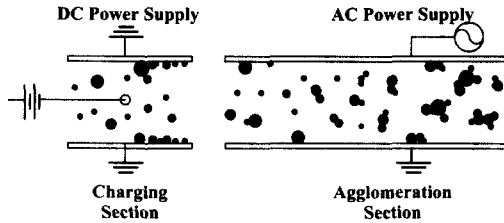


Fig. 1 Schematics of agglomerator

으로 낮은 이유는 집진 효율을 결정하는 지배적인 인자인 포화 하전량이 입자 표면적에 비례하기 때문이다. 이런 문제점을 해결하기 위한 방법으로 최근에는 배출 입자들을 포함하는 유동에 AC 전기장을 인가하여 미세 입자를 제거가 용이한 큰 입자로 성장시키려는 연구가 진행되고 있다.

Fig. 1은 응집기 시스템의 개요이다. 응집기는 하전부와 응집부로 구성되며, 하전부에서 코로나 방전을 통해 포화 하전된 입자는 AC 전기장으로 유입된 후, 교류 주파수와 입자 하전량에 따라 유동 방향에 수직으로 진동하며 전장을 빠져나간다. 포화하전량은 입자의 표면적에 비례하므로 하전량이 많은 큰 입자는 유동 진행 방향에 수직으로 빠르게 먼 거리를 왕복하고, 작은 입자는 상대적으로 느리게 짧은 거리를 움직인다. 이 과정에서 입자들 간에 상대적인 속도 차이가 발생하고 충돌과 응집이 일어난다. 결국 입자 크기분포는 큰 입자들의 비율이 증가하는 방향으로 이동하게 되고 반대로 미세 입자의 수농도는 감소한다. 하전부에서 고전압을 인가하는 방법에 따라 응집부로 유입하는 입자가 모두 같은 극성을 띠는 단극성이거나 다른 극성인 양극성일 수 있다. 입자의 극성을 결정하는 하전부의 특성은 입자간의 상대 운동뿐 아니라 쿨롱힘이 응집에 영향을 미치게 한다.

전기장 응집을 이용해 입자 크기를 조절하는 연구는 AC와 DC 전기장을 이용하는 여러 방식으로 진행되고 있는데, 아직까지는 실험실에서 수행하는 수준에 머물러 있다. 많은 연구자들은 응집부에 AC 전기장을 적용했다. Kobashi⁽²⁾는 비산재 입자를 양극성으로 하전시켜 평행 평판형 응집기를 통과시켰는데, 1.7 μm 이하의 입자들의 무게 농도가 대략 20% 감소한 결과를 얻었다. Mitchner와 Self⁽³⁾는 0.3~10 μm 입경 범위의 8

g/m^3 의 비산재를 발생시켜 실험을 수행했는데, 평행 평판 응집기내의 체류시간을 1초로 설정한 경우 0.3~2 μm 범위 입자의 무게 농도가 30% 감소한 결과를 얻었다. Hautanen 등⁽⁴⁾은 단극성 하전 오일 입자를 대상으로 응집기를 평판과 4개의 전극봉 형상의 두 가지에 대해 실험했는데, 1 μm 이하의 입자 감소는 4~8% 였다. Kildeso 등⁽⁵⁾은 질량 농도가 4.2 g/m^3 이고 질량 중앙입경이 약 2 μm 인 석회분말을 양극성으로 대전했는데, 체류시간이 2.1초인 경우 1 μm 이하의 입자 감소율 50%를 얻었고, 평행 평판형 응집기에 5.2 kV/cm 의 전기장을 인가한 후, 50Hz와 200Hz의 주파수에 대해 실험한 결과 차이가 없다고 보고했다. Laitinen 등⁽⁶⁾은 입자 수농도가 $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 이고 질량평균경이 0.5 μm 인 액체인 오일 입자를 대상으로 평행 평판형 응집기를 대상으로 실험했는데, 0.1~1.0 μm 입자의 수농도가 17~19% 감소했다. Lehtinen 등⁽⁷⁾은 AC 전기장 내에서 작은 입자와 큰 액적 입자가 다른 극성으로 하전된 경우의 입자 크기 분포 변화를 이론적으로 예측했다. DC 전기장을 이용한 연구로 와이어-와이어 형상의 하전부와 AC 전기장을 인가하는 응집부를 통합한 구조에 NaCl 입자를 대상으로 실험한 Gutsch 등⁽⁸⁾과 4개의 전극봉을 가진 응집기를 이용해 응집 실험을 수행한 Watanabe 등⁽⁹⁾이 있다. 국내에서는 박종인 등⁽¹⁰⁾이 화염에서 생성된 매연에 AC 전기장을 적용한 실험과 김연승 등⁽¹¹⁾이 상온에서 NaCl을 대상으로 수행한 실험, 그리고 최근에 지준호 등⁽¹²⁾이 수행한 AC 전기장에서의 단극성 입자 응집에 대한 해석적 연구가 있다.

본 논문의 목적은 입자 응집을 통해 1 μm 이하 미세 입자를 제거가 용이한 크기의 입자로 성장시키는 것이다. 본 논문은 Fig. 1의 시스템 중 하전부와 응집부 조건에 따른 양극성 입자의 응집에 관한 실험적 연구로 응집기 시스템 전체에 대한 효과뿐만 아니라, 하전부와 응집부를 구분하여 영향을 고찰하고 응집부에 인가된 AC 전기장의 여러 주파수에 대한 효과를 살펴보았다.

2. 실험

실험 장치는 Fig. 2와 같이 크게 입자 공급부, 하전부, 응집부, 샘플링 및 유량 제어부의 4 부분으로 구성되어 있다. 덕트는 $10 \times 10(\text{cm}^2)$ 단면을

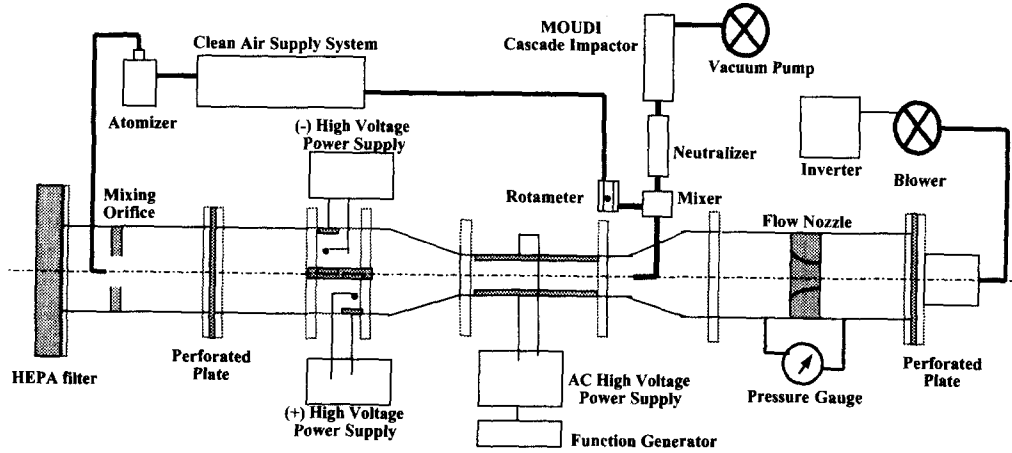


Fig. 2 Schematics of experimental setup

갖고, 응집부는 $10 \times 3.6(\text{cm}^2)$ 이다. 충돌 분무기를 통해 발생된 입자는 +10kV와 -10kV의 고전압을 인가하도록 설계된 두 개의 하전부로 유입되어 각각 다른 극성을 띄게 된다. 하전부를 거쳐 하전된 입자들은 AC 고전압 발생기에 의해 최대 전압이 $\pm 20\text{kV}$ 의 정현파로 변화하는 응집부를 지나고, 샘플링 영역에서 다단임팩터를 통해 측정된다.

2.1 실험 장치

2.1.1 입자 공급부

입자 공급은 분무형 입자 발생기를 통해 100% DOS(Di-octyl Sebacate, 밀도= 0.915 g/cm^3) 입자를 발생시켰다. 분무기에서 발생한 입자는 중화기를 거치지 않고 직접 덕트로 유입된다. Forsyth 등⁽¹³⁾의 입자 하전량 측정 실험에 의하면 분무기에서 발생된 100% DOS 입자의 절대 하전 정도는 볼츠만 분포 이하로 매우 낮다. 볼츠만 하전 분포 정도로 대전된 입자들의 브라운 응집은 중성 입자들간의 브라운 응집 결과와 비슷하기 때문에⁽¹⁴⁾ 본 실험에서는 입자의 발생 과정에서 하전에 의한 응집 효과는 무시했다.

분무 발생에 의해 공급된 DOS 입자의 질량 중앙입경은 약 $1 \mu\text{m}$ 이고, 발생 입자의 무게 농도는 0.25 g/m^3 , $1 \mu\text{m}$ 이하인 입자의 무게는 전체 무게의 약 38%, 입자 수농도는 약 10^7 개/cm^3 이었다. 발생 입자의 무게 농도는 다단 임팩터인 MOUDI

Table 1 Cut Sizes of MOUDI

Stage	Cut size $D_{p50\%}$ (μm)	Collection range of each stage (μm)
0	18	18 ~
1	10	10 ~ 18
2	5.6	5.6 ~ 10
3	3.2	3.2 ~ 5.6
4	1.8	1.8 ~ 3.2
5	1.0	1.0 ~ 1.8
6	0.56	0.56 ~ 1.0
7	0.32	0.32 ~ 0.56
8	0.18	0.18 ~ 0.32
after	-	~ 0.18

를 통해 확인했고, 입자 수농도는 Electrostatic Classifier(TSI 3080)과 CPC(TSI 3022A)로 구성된 SMPS 시스템(TSI 3936)을 통해 확인했다. $1 \mu\text{m}$ 이하 입자를 대상으로 SMPS 측정 데이터를 무게로 환산한 결과와 MOUDI의 공기역학경을 통해 나타난 크기분포는 비슷한 분포를 나타냈다. 샘플링 위치에서 입자 발생 재현성은 각 조건에서 다단임팩터로 포집한 모든 단의 입자의 총 무게를 비교하여 확인했다.

덕트 유입 공기에 포함된 오염입자를 제거하기 위해 HEPA 필터를 덕트 입구에 장착했다. 혼합 오리피스를 설치하여 발생 입자가 기류와 섞이게 했고, 방전부에 유입되는 기류는 단면에서 속도 변동을 막고 균일하게 형성되도록 다공판을 설치했다. 이때 혼합 오리피스에서 다공판과 다공판에서 하전부 입구의 간격은 각각 덕트 너비의 3배(30 cm)로 설정했다.

2.1.2 입자 하전부

하전 방법으로는 DC 고전압 코로나 방전으로 형성되는 전기장 하전(field charging) 방법을 채택했다. 하전부의 접지 전극판으로 황동판을 사용했고 평행 평판 사이에 방전선을 설치하는 와이어대 평판(wire-to-plate) 형식을 사용했는데, 전극판을 아크릴에 흡을 내어 유동을 방해하지 않도록 설치했다. 방전선은 유동 방향에 수직이 되도록 했고, 유입되는 입자들이 반대 극성을 갖도록 하전부 입구에서 유동이 두 부분으로 나뉘어 유입되도록 했다. 각각 하전부의 접지판과 방전선 사이의 거리는 20 mm 이고 유동 방향 접지판의 길이는 30 mm, 두 접지판 중앙에 설치된 방전선의 직경은 0.2 mm 이다. DC 전원 공급기는 정전압과 정전류 제어가 가능하고, 각각 -10 kV와 +10 kV까지 변화시킬 수 있는 두 개의 고전압 공급장치를 사용했다. 각각 고전압 공급장치의 전류 전압 상관관계를 전위계(Electrometer, Keithley 6517A)를 통해 측정했다. 또한 샘플링 위치에서 에어로솔 전위계(Aerosol Electrometer, TSI3068)을 통해 인가 전압과 이온 형성 유무를 확인하였다. 코로나 개시전압은 (+)와 (-) 전원 모두 대략 6 kV 정도였고, (+)8kV에서 코로나 전류는 8.6 μ A, (-)8kV는 -12.5 μ A였다. 이때 전압이 6 kV를 넘어서면서 샘플링 위치에서 상당량의 이온 발생을 확인할 수 있었다.

2.1.3 입자 응집부

응집부는 길이 50 cm, 두께 2 mm의 동판을 3.6 cm 간격으로 평행하게 설치했다. AC 고전압 발생기는 최대 출력 전압이 ± 20 kV인 정현파 파형을 발생시키고, 정전류 정전압이 가능하도록 제작했다. 전원 공급기의 외부 단자에 함수 발생기의 신호를 입력하여 AC 전기장의 파형과 주파

수를 변화시켰다. DC 고전압 발생기와 AC 고전압 발생기는 1000:1 고전압 프로브를 디지털 오실로스코프(Recroy 9414M)에 연결해 교정했고, AC 고전압 발생기의 파형이 ± 20 kV까지 정현파로 발생하는 것을 확인했다.

2.1.4 입자 샘플링

발생 입자의 크기 영역이 1 μ m을 중심으로 넓게 분포하므로 크기 분포를 확인하기 위해 다단 임팩터인 MOUDI(Micro Orifice Uniform Deposit Impactor, MSP Corp.)를 사용했다. 실험에 사용된 MOUDI는 8단으로 구성되고 각 단의 절단입경과 각 단에 포집되는 입경 범위는 Table 1과 같다.

발생된 액체 입자인 DOS는 상대적으로 점성이 적기 때문에 입자가 부착되는 기관의 선택이 문제가 된다. 표면이 매끄러운 알미늄 호일을 기관으로 사용하는 경우 액체 입자가 유동에 의해 기관 외부로 흘러나가기 때문에 입자가 기관 밖으로 밀려나가지 않도록 표면이 거친 테프론 필터(Gelman Scientific, Zeflour F2996-25 pore size 2 μ m)를 기관으로 사용했다. 임팩터의 기관으로 테프론 필터를 사용하는 경우 대개 절단입경이 작은 쪽으로 이동하고 상대적으로 작은 입자의 포집 효율이 어느정도 증가하는 것으로 알려져 있지만,⁽¹⁵⁾ 본 연구에서는 같은 입자에 대해 상대적인 양을 비교하므로 테프론 사용에 대한 크기분포의 왜곡은 고려하지 않았다.

임팩터로 유입되는 입자들은 포화하전에 가까운 전하를 띄고 테프론이 전기 절연 특성이 강하기 때문에, 테프론 내에 입자가 쌓이면 전하가 축적되어 전기장이 형성된다. 이를 방지하기 위해 임팩터로 유입되기 전에 샘플 입자들이 중화기를 거치도록 장치를 구성하였다. 샘플링 시간은 시스템이 고농도인 관계로 2분으로 설정했는데, 샘플링 동안 샘플링 입구와 중화기, 임팩터 사이의 시간 지연에 의한 오차를 최소화하기 위해 샘플링 프로브와 중화기 사이에 혼합기 부분을 설치해서 실험 시작 전에는 청정공기를 유입시켜 중화기 내에 체류하는 오염 입자들에 의한 영향을 제거했다.

MOUDI의 유량은 임팩터 단간 차압을 통해 제어된다. 임팩터의 흡인 유량은 기관의 재질과 종단 필터의 압력 강하 특성에 따라 달라지므로, 습식 가스미터(W-NK-10A, Sinagawa Corp.)로 교

정된 차압 데이터를 사용했다.⁽¹⁵⁾ 임팩터 기관으로 사용하는 테프론 필터의 무게 측정은 10 µg까지 측정 가능한 전자저울(BP210D, Satorius)을 사용했다.

2.1.5 유량 제어부

덕트를 통과하는 유량을 제어하기 위해 유량 노즐(Long Radius nozzle, ISO5167)을 사용했는데, 노즐 상류와 하류의 차압을 측정하여 유량을 조절했다. 덕트를 통과하는 유량은 3상 송풍기(0.5 HP, 1780 rpm)로 흡인했고 인버터를 사용해 주파수를 변환하여 유량을 제어했다. 샘플링 부분의 단면과 하전부 상류의 공기 유입 단면의 속도 분포를 열선 풍속계를 통해 측정하여 유량 노즐의 유량 차압 관계를 확인했다. 응집부에서 입자의 평균 체류시간은 1초로 설정했다.

2.2 실험 방법 및 조건

응집기 시스템의 입자 성장 효과를 측정하기 위해 샘플링 위치를 고정시킨 후, 각각 하전부와 응집부의 영향을 나누어 확인하였다. 하전부와 응집부가 작동하지 않은 경우를 상대적으로 중성(neutral) 입자들인 경우로 생각하면, 하전부와 응집부의 가동에 대한 영향을 평가할 수 있다. 응집부는 작동하지 않은 채, 하전부 전압의 작동 여부에 의한 결과를 비교하면 하전부의 특성을 알 수 있다. 또 하전부 전압을 인가한 상태에서 응집부의 전압 인가 유무를 비교하면 AC 전기장만의 효과를 확인할 수 있다. Table 2는 하전부와 응집부의 운전을 고려한 실험 조건을 나타낸다. 이때 전압을 가하지 않은 경우를 0kV로 나타냈다.

Table 2 Experimental conditions

Charging section	Agglomeration section	Conditions
0kV	0kV	No electrical force
± 8kV	0kV	Only DC on
± 8kV	20kV	DC, AC on and change of AC frequency

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 하전부 DC전기장의 영향

응집부 전원을 가동하지 않은 상태에서 하전부에 ± 8kV의 전압을 인가한 경우와 전압을 인가하지 않은 경우의 입자 크기분포 변화가 Fig. 3에 나타난다. 이때 M은 입자 무게 농도이다. 다만 임팩터의 측정결과는 각 단의 변화를 구분할 수 있는 히스토그램으로 표현했는데, 임팩터의 종단필터에 포집되는 입자의 최소입경을 20 nm로 가정하여 나타났다. 발생 입자가 하전부를 거쳐 샘플링 입구까지 이르는 동안 확산에 의한 벽면 손실을 무시한다면, Fig. 3의 입자 크기분포의 변화는 전기장을 따라 접지극으로 하전 입자가 이동하여 부착하기 때문이다. Fig. 4는 Fig. 3의 대수 분포의 경우 각 단의 기하 평균 입경을 통해 전기장 인가시 단별 무게 감소를 보여준다. 그래프는 3.2 µm 이하 입자들의 무게 농도 변화를 보여주기 위해 임팩터의 4단에서 종단까지 6개 단의 변화를 나타냈다. 전체적으로 입자가 클수록 감소 비율이 크게 나타나는데, 이는 위에서 언급한대로 입자크기가 클수록 하전부에서 전기장의 영향을 크게 받아 접지판에 쉽게 포집되기 때문이다.

Fig. 3, 4를 통해 하전부에서의 DC 전압 인가가 샘플링 위치에서의 입자 크기 분포에 미치는 영향에 대해 고찰하였는데 이와같은 결과를 야기시키는 입자거동에 대해 고찰해보자. 전압이 인가되지 않은 경우에는 중성 입자들간의 브라운 응집, 덕트 벽면 경계층으로의 확산부착 등이 크기 분포에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 전압이 인가된 경우에는 하전부에서 양으로 하전된 입자와 음으로 하전된 입자는 하전부를 거친 후 바로 혼합이 이루어지게 되고 입자들 상호간에는 응집이 발생하게 된다. 극성이 다른 하전 입자들간의 응집으로 인해 입자들이 벽면으로 부착되는 효과는 전압이 인가되지 않은 경우에 비해 상대적으로 줄어들 것이다.

3.2 응집부 AC전기장(100Hz)의 영향

AC 전기장은 최대 전압을 20 kV (rms 전압으로 14.1 kV)로 설정하여 응집기 내의 전기장을 5.6 kV/cm (rms 3.9 kV/cm)로 유지하였다. Fig. 5는 하전부에 전기장이 인가된 상태에서 응집부에 AC 전압이 인가된 경우와 인가되지 않은 경우의

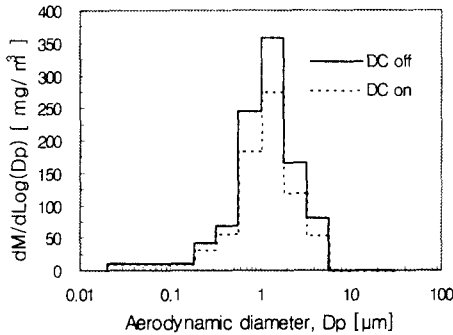


Fig. 3 Effect of \pm DC8kV on particle size distributions

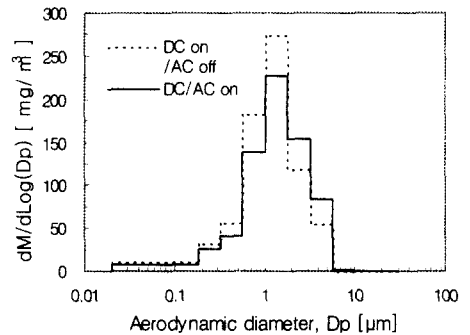


Fig. 5 Effect of AC field (20kV, 100Hz) on particle size distributions for \pm DC8kV

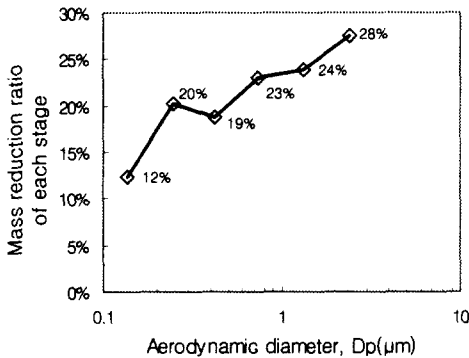


Fig. 4 Reduction of mass concentration between on and off of \pm DC8kV

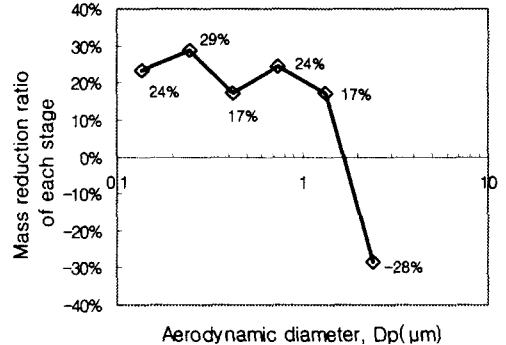


Fig. 6 Reduction of mass concentration between on and off of AC20kV for \pm DC8kV

크기 분포 변화를 나타냈다. 그 결과 1.8 μm 이하 입자들의 경우 감소 추세가 나타나는 등 입자 크기 분포가 이동하는 것을 알 수 있다. 이때 총 샘플링 무게는 하전부(\pm 8kV)전압만 인가한 경우 11.21 mg이었고, 응집부 전압까지 인가한 경우 (\pm 8kV, 20kV 100Hz)는 10.47 mg이었다. 따라서 약 6.6% 정도 손실이 발생했는데, 손실의 주요 원인은 AC 전기장을 통과하는 입자가 정현파로 움직이는 과정에서 전극판으로 부착되기 때문이라고 생각된다. 이때 높게 대전된 입자들의 손실 확률이 훨씬 크므로⁽⁵⁾ 상대적으로 하전량이 적은 1 μm 이하 입자의 손실은 매우 적다고 가정할 수 있다. 각 단의 기하평균입경을 사용하여 나타낸 단별 무게 감소비가 Fig. 6에 나타나 있다.

Fig. 7과 8은 DC와 AC 전기장이 모두 작동된 경우와 작동되지 않은 경우의 입자 크기 분포를

비교한 결과이다. Fig. 8은 입자 직경이 1.0 μm 이하의 단별 무게 감소가 33~42% 정도임을 보여준다.

3.3 응집부 AC 전기장 주파수의 영향

응집부에서 AC 전압의 주파수를 변화시키는 경우 입자 크기 분포 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 주파수를 각각 60, 100, 500 Hz로 설정했는데, 전체적으로 1 μm 이하의 입자의 크기 분포 변화는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 극성이 다른 입자들이 충돌하여 응집이 이루어지는 순간 하전량 감쇄를 겪기 때문에 입자들의 움직임이 응집 이후 둔화되기 때문인 것으로 생각된다. 주파수가 증가하면 입자들의 상대운동이 활발하지

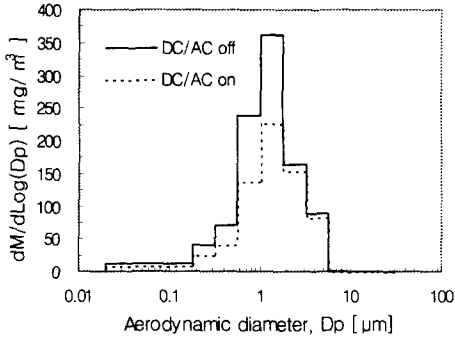


Fig. 7 Effect of DC (± 8kV) and AC fields (20kV, 100Hz) on particle size distributions

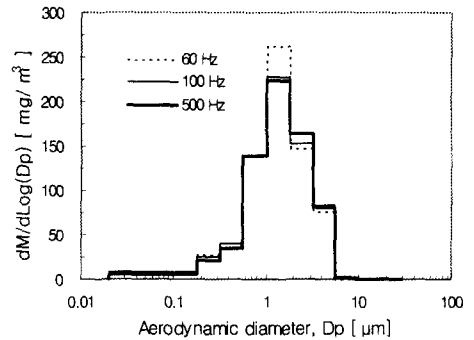


Fig. 9 Effect of AC frequency on particle size distributions (for ± DC8kV)

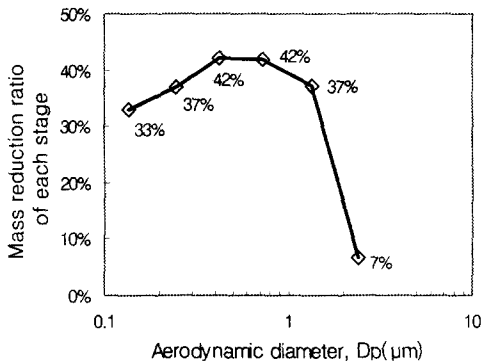


Fig. 8 Reduction of mass concentration between on and off of AC20kV and ± DC8kV

만 입자 응집에 따라 하전량 감쇄를 겪게 되면 입자의 운동 폭이 급격히 줄어들기 때문에, 주파수가 일정 값 이상이 되면 입자 응집에 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. 이는 기존 실험들^(2,5)의 주파수 변화 영향이 크지 않다는 주장과도 일치한다.

Fig. 10과 11은 응집부의 AC 전기장 주파수가 1 μm 이하의 입자 무게 감소에 미치는 영향을 보여준다. 응집기 시스템에 전기장의 영향이 전혀 없는 경우와 하전부와 응집부의 전압을 인가한 경우(응집기 시스템을 모두 가동한 경우)의 결과가 Fig. 10에 나타나는데, AC 전기장의 주파수가 증가할수록 1 μm 이하 입자의 총무게 차가 다소 증가하는 경향이 보이기는 하지만 미미하다. AC 전기장을 인가하지 않고 하전부의 전압만

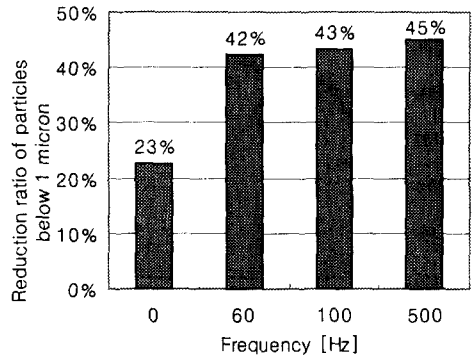


Fig. 10 Effect of AC frequency and ± DC8kV on reduction of submicron particles in comparison with case of DC/AC off

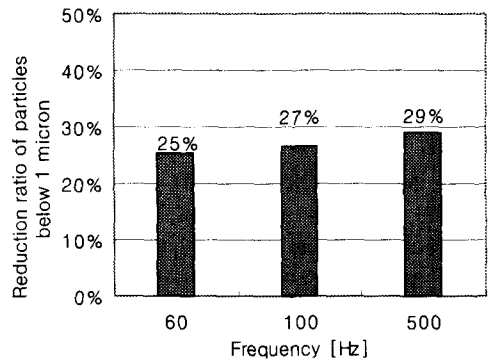


Fig. 11 Effect of AC frequency on reduction of submicron particles when ± DC8kV is on

을 인가한 경우를 주파수가 0인 경우로 설정했는데, 23%의 무게 감소는 하전부에서 코로나 방전에 의한 집진과 서로 다른 극성으로 하전된 입자들의 응집에 의한 손실이라고 할 수 있다. Fig. 11은 하전부만을 작동한 경우와 하전부와 응집부를 모두 작동한 경우의 1 μm 이하 입자들의 무게 차를 나타낸다.

1 μm 이하 입자의 감소 효과는 입자 발생원의 크기 분포에 따라 달라질 수 있다. 평균 입자의 크기가 클수록 입자당 하전량이 증가하고 같은 시간동안 더 많은 거리를 이동하게 된다. 결국 입자들간의 충돌확률은 증가하고 미세 입자들이 큰 입자와 충돌해 제거된다. 또 입자 농도가 큰 경우는 입자는 같은 거리를 이동할 때, 더 많은 충돌 기회를 갖는다. 특히 AC 전기장 내에서 입자 크기에 따른 입자 진동 폭이 정해지므로 입자 수농도는 입자가 충돌할 수 있는 중요한 조건이 될 수 있다. 예를 들면, 농도가 낮은 조건에서는 입자가 한 주기 동안 움직이는 진폭이 입자간 평균 거리에도 미치지 못할 수 있기 때문이다. 결국 실제 시스템에 적용한다면 발생 입자가 어떤 특성을 가지는지 고려할 필요가 있다.

4. 결 론

응집기 시스템의 운전조건들을 변화시켜 이들이 1 μm 이하 미세 입자들의 제거 효율에 미치는 영향을 실험적으로 연구했다. 전체 무게에 대한 1 μm 이하 입자의 총 무게 비율이 38%, 무게 농도가 0.25 g/m^3 인 양극성으로 하전된 액체 DOS 입자를 대상으로 AC 전기장 응집 실험을 수행했다. 양극성 하전부에는 $\pm \text{DC}8\text{kV}$ 의 전압이 인가되었고, 응집부에는 최대전압이 $\pm 20\text{kV}$ 인 AC 전기장을 적용했다. 실험 결과는 하전부의 영향과 응집부의 영향을 나누어 고려했고, 응집부 AC 전기장의 주파수 변화에 따른 차이를 알아보았다.

(1) 응집기 시스템을 거친 입자는 전체 크기 영역에서 입자 감소가 나타났고, 1 μm 이하 입자의 무게 감소는 42~45% 였다.

(2) 하전부에서 입자 손실을 거친 하전 입자들이 AC 전기장을 통과하는 동안 크기 분포 변화를 살펴보았다. 이때 1 μm 이하 입자의 총 무게 감소는 25~29% 였다.

(3) AC 전기장의 주파수를 변화시켜 실험을 수

행했는데, 주파수가 증가함에 따라 1 μm 이하 입자의 감소 효과는 증가하는 경향을 보이지만 1~3% 정도로 미미했다.

후 기

이 논문은 한국학술진흥재단의 98과학기술기초중점연구(기계공학)에 의하여 지원되었으며(과제번호: 98-018-E00020), 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Mohr, M., Ylatalo, S., Klippel, N., Kauppinen, E. I., Riccius, O. and Burtscher, H., 1996, "Submicron Fly Ash Penetration Through Electrostatic Precipitators at Two Coal Power Plants," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 24, pp. 191~204.
- (2) Kobashi, M., 1978, *Particle Agglomeration Induced by Alternating Electric Fields*, Ph.D. Thesis, Stanford University.
- (3) Mitchner, M and Self, S., 1983, *Basic Studies to Reduce Electrostatic Precipitator Size and Cost*, EPRI Report CS-3226.
- (4) Hautanen, J., Kilpelainen, M., Kauppinen, E. I., Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1995, "Electrical Agglomeration of Aerosol Particles in an Alternating Electric Field," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol. 22, pp 181~189.
- (5) Kildeso, J., Bhatia, V. K., Lind, L., Johnson, E. and Johansen, A., 1995, "An Experimental Investigation for Agglomeration of Aerosols in Alternating Electric Fields," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 2, pp. 422~430.
- (6) Laitinen, A., Hautanen, J. Keskinen, J., Kauppinen, E. Jokiniemi, J. and Lehtinen, K., 1996, "Bipolar Charged Aerosol Agglomeration with Alternating Electric Field in Laminar Gas Flow," *J. Electrostatics*, Vol. 38, pp. 303~315.
- (7) Lehtinen, K., Jokiniemi, J., Kauppinen, E. I. and Hautanen, J., 1995, "Kinematic Coagulation of Charged Droplets in an Alternating Electric Field," *Aerosol. Sci. Technol.*, Vol 23, pp 422~430.
- (8) Gutsch, A. and Loffler, F., 1994, "Electrically

- Enhanced Agglomeration of Nanosized Aerosols," *J. Electrostatics*, Vol. 25, pp. 307~308.
- (9) Watanabe, T., Tochikubo, F., Koizumi, Y., Tsuchida, T., Hautanen, J. and Kauppinen, E., 1995, "Submicron Particle Agglomeration by an Electrostatic Agglomerator," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. s367~383.
- (10) 박종인, 지준호, 황정호, 1997, "LPG 확산화염내 매연입자의 전기적 특성 및 전기장에 의한 입자 크기 변화," 대한기계학회논문집 B권, 제21권, 제10호, pp. 1326~1338.
- (11) 김연승, 황정호, 1999, "AC 주파수의 변화가 입자의 전기 응집에 미치는 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제12호, pp. 1527~1534.
- (12) 지준호, 황정호, 2001, "모멘트법을 이용한 AC 전기장내의 단극성 입자의 전기응집 해석," 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제1호, pp. 9~17.
- (13) Forsyth, B., Liu, B. Y. H. and Romay, F. J., 1995, "Particle Charge Distribution Measurement for Commonly Generated Laboratory Aerosols," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 489~501.
- (14) 지준호, 황정호, 이규원, 1999, "모멘트법을 이용한 하전 입자들간의 응집 해석," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제4호, pp. 431~442.
- (15) 배귀남, 지준호, 문길주, 1999, "다단 임팩터(MOUDI)의 조대 입자 채취 특성," 한국대기환경학회지, 제15권, 제6호, pp. 799~804.