

# 전기 수력학적 방법을 이용한 미세 입자의 하전 특성에 관한 연구

안진홍, 김광영, 윤진욱\*, 안강호\*\*†

(주)에이스랩, \*한양대학교 대학원 기계공학과, \*\*한양대학교 기계공학과

## Study on the Fine Particle Charging Characteristics with the Electrohydrodynamic Atomization

Jin-Hong Ahn, Kwang-Young Kim, Jin-Uk Yoon\*, Kang-Ho Ahn\*\*†

Ace Lab. Inc., Taejon 305-380, Korea

\*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

(Received August 11, 2000; revision received January 8, 2001)

**ABSTRACT:** A well defined electro-spraying and electro-static precipitator (ESP) experiment is carried out to investigate the charging characteristics of the submicron particles and the monodisperse particles. The basic idea is that the highly charged electro-sprayed droplets will be produced into the gas when the Coulombic repulsive force on the surface is higher than the surface tension of the spraying liquid. During this process many highly charged smaller droplets or ions, if the droplets are completely dried out, will be produced in the space. These charged species will be attached on the particles and then eventually charge the particles. These charged particles will be easily collected with ESP. The experimental results show that the atomizer generated particles with geometric mean diameter (GMD) of 62 nm are charged more than 90% even at the mean face velocity of 2.5 m/s at the charging zone.

**Key words:** Electrohydrodynamic spray(전기-수력학적 분사), Particle collection(입자 포집), Charging portion(하전율), Charging(대전), ESP(전기 집진기)

### 기호 설명

$N$  : 입자 개수 농도 [ $\#/cm^3$ ]

### 그리스 문자

$\eta$  : 전기 집진기 집진 효율

### 하첨자

inlet : 전기 집진기 입구 영역

outlet : 전기 집진기 출구 영역

### 1. 서론

최근 초미세 입자는 대기 환경 오염뿐만 아니라 신소재 개발 및 제조 연구에 있어서 그 특성의 이해는 매우 중요한 문제로 대두되었다. 이에 따라 초미세 입자에 대한 관심이 집중되고 있으며, 입자 발생에 대한 연구 또한 선진국을 중심

† Corresponding author

Tel.: +82-31-400-5284; fax: +82-31-406-5550

E-mail address: khahn@mail.hanyang.ac.kr

으로 활발히 진행되고 있다.

전기 수력학적 분사 현상(electrohydrodynamic atomization)은 이미 오래 전부터 연구되어 왔으며, 초미세 입자에 대한 관심이 집중되면서 본격적으로 전기-수력학적 방법에 의한 초미세 입자 발생에 관한 연구가 진행되고 있다. 현재 이와 같은 방법을 통한 입자 발생에 관한 연구는 어느 정도 기본적인 체계가 확립되어 있는 상태이다.

1882년 Rayleigh에 의해 전기장내의 물방울이나 물줄기가 전위차(electrical potential)의 영향을 받는다는 사실이 처음 발견된 이후로 많은 연구가들에 의해서 전기 수력학적 방법에 의한 입자 발생에 관한 연구가 수행되고 있다.<sup>(1-4)</sup> 1915년 Zeleny는 현재까지도 전기 수력학적 분사에 사용되고 있는 전극 배열 방법을 이용하여 새로운 형태의 입자 발생 장치를 고안하였다. 그는 모세관 끝에 매달린 물방울(droplet)의 분해(breakup) 현상과 전기장의 변화가 발생 입자에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 또한 모세관 끝에서 물방울의 모양(meniscus)은 전기장의 세기에 따라 다양한 작동 모드가 존재함을 관찰하였다. 최근의 연구로는 1995년 David, Pui 등에 의해 전기 수력학적 방법에 의한 초미세 단분산 입자 발생에 대한 연구 발표가 있었다.<sup>(5)</sup> 연구 결과에 따르면 cone-jet 모드에서 작동되는 electro-spray 시스템은 일정한 크기의 단분산 입자를 발생시키며, 발생하는 입자의 크기는 급수 용액의 전기 전도성과 급수량에 밀접한 관계를 가지고 있다. 또한 발생한 입자(droplet)는 Rayleigh breakup을 거치지 않고 증발 과정에 의해서 더욱 작아지게 된다. 이 방법을 이용한 입자 발생 방식은 발생하는 입자의 크기 분포가 비교적 좁아 단분산성이 뛰어나며 안정된 초미세 입자를 만들 수 있다. 현재에는 이러한 전기 수력학적 방법에 의한 입자 발생을 이용하여 여러 종류의 액체, 즉 탄화수소 물질, 물, 액체, 무기물류 등과 이들 액체의 표면 장력 및 전기 전도성 등 물리적 성질에 따른 분무 특성에 관한 연구뿐만 아니라 분사 노즐의 형태, 전극 구조, 작용 전기장의 세기 및 급수량 등 여러 변수에 따른 발생하는 입자의 크기 및 하전량과의 관계에 관한 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 전기 수력학적 방법에 의해 발생된 미세 액적(droplet)은 매우 높게 하전되어 있으며 발생한 입자의 개수 농도가  $10^7 \#/\text{cm}^3$  이상으로

상당히 많은 양이 발생하는 점을 이용하여 대기 중이나 기타 포집 대상의 입자를 전기 수력학적 방법에 의해 발생한 높은 하전의 초미세 입자나 이온이 하전 대상의 입자를 대전시킴으로써 미세 입자를 효과적으로 포집할 수 있는 새로운 형태의 정전 집진 장치, 즉 기존의 코로나 방전에 의한 입자 대전 방식과 차별화된 집진 장치에 대해 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험을 위한 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 입자를 발생시켜 주는 분무기(atomizer), 분무된 입자의 수분을 제거하기 위한 확산 건조기(diffusion dryer), 확산 건조기를 통한 입자를  $\text{Po}^{210}$ 로 전기적으로 중화시켜 Boltzmann 평형 상태를 이르게 하는 중화기(neutralizer), 발생한 입자 중에서 일정한 크기의 입자만을 선택적으로 선별하기 위한 DMA(differential mobility analyzer)와 하전된 미세한 액적(droplet)을 발생시키는 electro-spray 챔버, 기체 중의 입자를 포집하는 전기 집진기(electrostatic precipitator, ESP), 전기 집진기 및 electro-spray 챔버의 전극에 전압을 걸어 주기 위한 직류 고전압 발생 장치, 입자의 개수 농도를 측정하기 위한 응축핵 계수기(condensation nuclei counter, CNC), ESP에 유입되는 유량을 조절하기 위한 진공 펌프, 그리고 CNC에서 받은 data를 처리하기 위한 PC로 구성하였다.

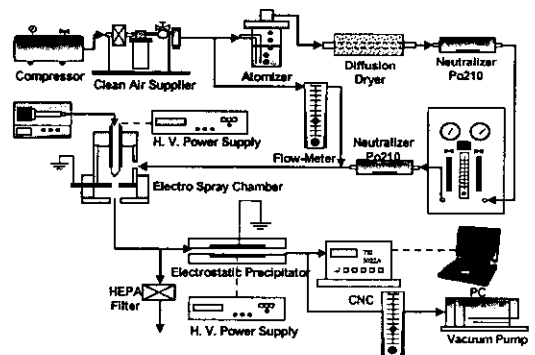


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

본 실험에 사용한 electro-spray 챔버는 하전된 초미세 입자가 발생하는 부분으로써 급수 장치를 통해 일정한 유량으로 분사 장치에 유입된 용액은 전기장의 영향에 의하여 분사(spray)가 일어난다. 분사 노즐로는 stainless steel을 사용하였으며 tip에서의 외경이 1.05 mm이다. 또한 전기 집진기는 평판 대 평판 전기 집진기를 사용하였다. 집진판의 재질은 알루미늄이고, 집진판의 외부는 절연체인 플라스틱 재질로 제작하였으며, 전극판의 세정을 쉽게하기 위해 분리형으로 구성하였다. 상, 하 집진판의 간극은 3 mm, 길이는 20 cm, 폭은 5 cm로 설정하였다.

2.2 실험방법

입자를 포함하지 않은 2.5 kg/cm<sup>2</sup>의 고압 공기를 NaCl 0.1%가 들어 있는 분무기에 연결하여 NaCl 입자를 분무시킨다. 이들 입자는 확산 건조기에서 건조된 후 중화기로 유입된다. 중화기에 유입된 입자는 중화된 후 DMA로 들어간다. DMA에 유입된 다분산(polydisperse) 입자는 DMA에 공급되는 전압에 따라 일정한 크기의 단분산(monodisperse) 입자를 만들어내는데, 이 단분산 입자는 clean air supply에서 공급되는 공기와 혼합된 후 electro-spray 챔버로 들어간다. Electro-spray 챔버 내에 유입된 단분산 입자는 전기 분사되어지는 높게 하전된 초미세 입자 또는 이온과 충돌하여 대전되어지고, 이 대전된 입자는 전기 집진기를 통하여 직접 응축핵 계수기로 유입되어 입자의 개수 농도를 측정하였다. 입자 대전 및 집진에 대한 계략도를 Fig. 2에 도시하였다.

Electro-spray 노즐에 급수되는 수용액은 수돗물을 사용하였으며, 급수량은 1.5~2.5 ml/hr로 변

화시키면서 수행하였다. 또한 electro-spray 노즐에 인가되는 전압은 조건에 따라 달리 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입자의 발생

Electro-spray는 cone-jet mode에서 작동하도록 전압 및 유량 등을 조절하였다. 이는 이 모드에서 electro-spray가 매우 안정적으로 작동하여 실험의 재현성 및 안정성이 좋기 때문이다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 노즐의 경우 인가되는 전압이 6 kV일 때 electro-spray가 cone-jet 모드로 작동되었으며, Fig. 2와 같은 노즐의 경우 10 kV 일 때 cone-jet 모드로 되는 최적의 전압이 되었다.

3.2 다분산 입자 발생 및 크기 분포도

Atomizer에 의해 발생하는 입자는 NaCl 0.1% 수용액을 사용하였으며 입자의 크기 분포 및 개수 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 발생한 입자의 기하 평균 지름은 약 62 nm이다. 또한 기하 표준편차는 약 1.6으로 상당히 좋은 분포를 보여준다. 그림에서 실선은 대수 정규 분포를 나타낸다.

3.3 하전을 실험

실험을 통해 electro-spray를 통과한 후 하전된 미세 입자의 하전율을 구하기 위해 전기 집진기

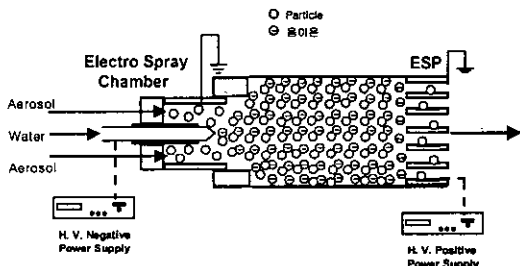


Fig. 2 Collection mechanism using electro-spray.

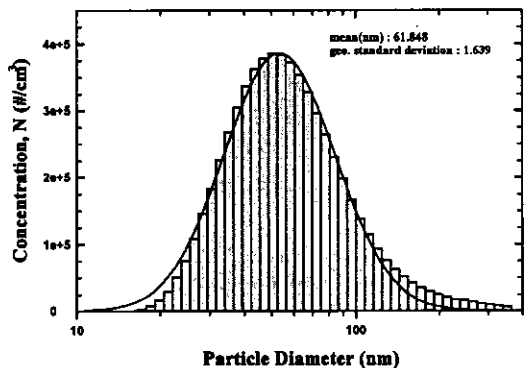


Fig. 3 Particle size distribution generated by an atomizer.

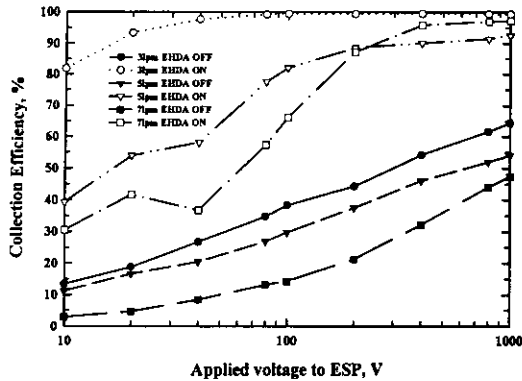


Fig. 4 Collection efficiency for atmospheric particles with different aerosol flow rate.

의 전압을 걸어 주지 않은 상태에서 전기 집진기 출구를 나온 후 CNC로 측정되어지는 입자의 개수를  $N_{inlet}$ 이라 하고, 전기 집진기에 전압을 걸어 준 후 출구에서 CNC로 측정되어지는 입자의 개수를  $N_{outlet}$ 이라 하면 집진 효율은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{N_{inlet} - N_{outlet}}{N_{inlet}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Electro-spray 챔버 내 노즐의 재질은 Pylex 로 제작되었으며, electro-spray 챔버로 들어가는 aerosol의 유량이 저유량인 경우, 즉 3, 5, 7 lpm 일 경우 대기진을 이용하여 입자의 하전 효율을 측정하였으며, 또한 atomizer에 NaCl 0.1 vol% 수용액을 이용하여 발생시킨 입자를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 electro-spray 챔버를 작동시켰을 경우와 작동시키지 않았을 경우 electro-spray 챔버로 유입되는 aerosol의 유량에 따른 대기진의 하전율을 나타낸다. Aerosol 유량은 각각 3 lpm, 5 lpm, 7 lpm이고 electro-spray의 급수 용액으로는 수돗물을 사용하였다. 또한 급수 용액의 유량은 1.6 ml/hr로 고정시켰으며, 노즐에 인가된 전압은 6.0 kV였다. Aerosol의 유량이 3 lpm인 경우, 입자가 100% 포집되므로 electro-spray로 유입된 모든 입자가 하전된 것을 알 수 있다. 한편 electro-spray로 유입되는 유량이 5 lpm, 7 lpm인 경

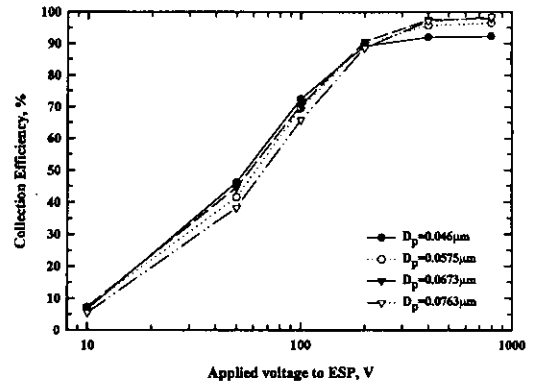
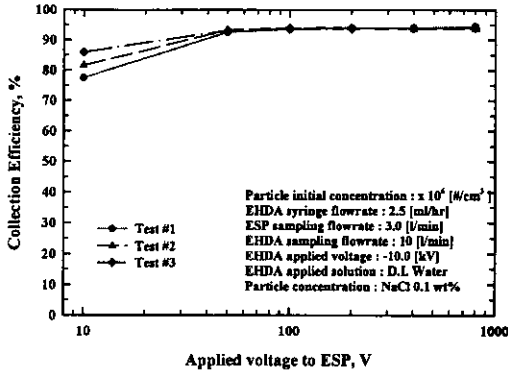


Fig. 5 Collection efficiency for monodisperse particles.

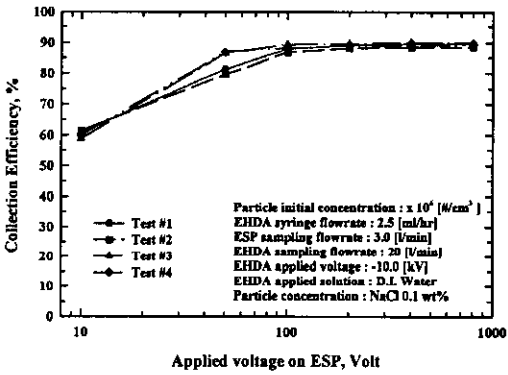
우 대부분의 입자는 하전이 되어 ESP의 인가 전압이 각각 200 V, 400 V일 때 90%가 넘게 포집되는 것을 보이고 있다. 또한 유량이 증가할수록 다소 하전율은 감소함을 볼 수 있었다. 그리고 electro-spray 노즐이 작동하지 않고 ESP에 전압만 인가한 경우, electro-spray가 작동하는 경우보다 효율이 약 40% 이하로 저하됨을 볼 수 있었다.

Fig. 5는 atomizer에서 발생된 입자를 DMA에 유입시켜 단분산 입자를 만든 후, 각각의 크기에 대한 집진 성능을 보인 것이다. Electro-spray 노즐에 인가된 전압은 6.0 kV, 급수 용액은 수돗물을 사용하였으며 급수 유량은 1.6 ml/hr였다. 그리고 aerosol의 유량은 5 lpm이었다. 또한 DMA에 유입된 sheath air의 유량은 5 lpm이며, 단분산 입자 및 단분산 입자는 0.5 lpm으로 선정하였다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 입자의 크기가 커질수록 하전율은 약간 증가함을 알 수 있으며, 대부분의 입자는 electro-spray된 초미세 입자나 이온에 의해 하전이 되어, ESP의 인가 전압이 약 400 V 이상에서는 90% 이상 모두 포집되는 것을 볼 수 있다. 이는 46 nm의 미세 단분산 입자도 90% 이상 하전된다는 것을 의미한다.

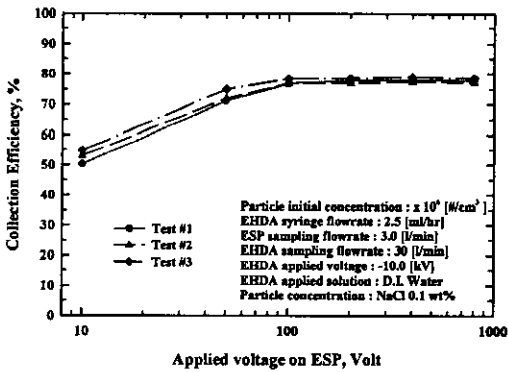
지금까지의 실험은 Fig. 1에 보여준 형태의 electro-spray를 이용하여 실험한 결과였다. 이 형태는 electro-spray에 의해 입자가 발생된 후 작은 직경의 hole을 통과해야 하므로 고유량 실험에는 적합하지 않다. 따라서 고유량 실험에 적합한 electro-spray 노즐을 Fig. 2에 있는 것과 같은 형태로 제작하였다.



(a) EHDA aerosol flow rate : 10 lpm



(b) EHDA aerosol flow rate : 20 lpm



(c) EHDA aerosol flow rate : 30 lpm

Fig. 6 Collection efficiency according to the ESP voltage.

Fig. 6은 electro-spray 챔버로 유입되는 aerosol의 유량이 10, 20, 30 lpm일 경우에 대해 집진 효율을 나타낸 것이다. ESP의 sampling 유량은 3 lpm으로 고정시켰으며, electro-spray 노즐에

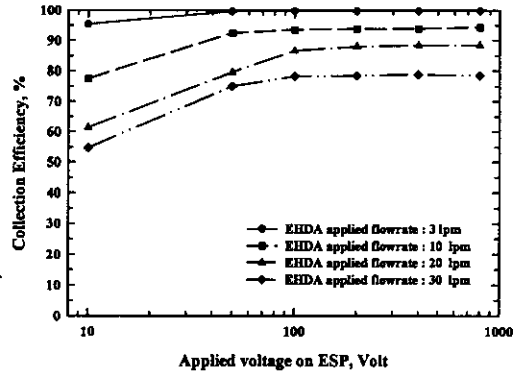


Fig. 7 Collection efficiency according to EHDA aerosol flow rate.

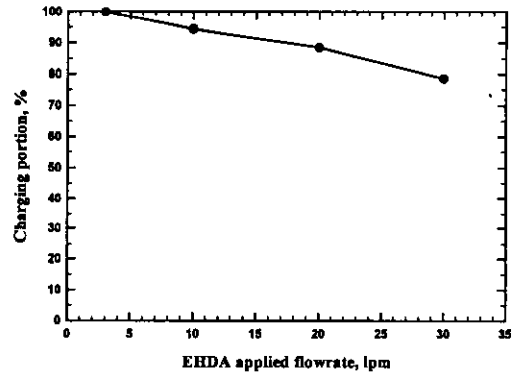


Fig. 8 Charging portion according to EHDA aerosol flow rate.

공급되는 수용액의 유량은 2.5 ml/hr, 인가 전압은 -10 kV이다. 시험입자는 Fig. 3과 같은 분포를 갖는 NaCl 입자를 사용하였다. 입자의 초기 농도는 모든 유량에 대해서 약  $2.2 \times 10^6 \# / \text{cm}^3$  정도로 하였다. Fig. 6(a)는 Electro-spray 챔버로 유입되는 aerosol의 유량이 10 lpm인 것으로 ESP에 인가된 전압이 약 10 V인 경우 약 77~85%가 포집되나, ESP의 인가 전압이 100 V 이후에는 약 95% 이상의 입자가 포집되었다. Fig. 6(b), (c)도 마찬가지로 ESP에 인가된 전압이 100 V에서 하전이 된 입자들은 모두 일정한 집진 효율을 보이고 있다. 그러나 유량이 증가할수록 집진 효율이 감소되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에 유량에 따른 집진 효율을 비교하여 나타내었으며, Fig. 8은 EHDA에 흐르는 유량에 따른 입자의 하전율을 나타낸 것이다. Fig. 7과 8을 보면 electro-spray 챔버로 유입되는 aerosol의 유량이 3 lpm으

로 적은 경우 하전율은 거의 100%를 보이고 있다. 그리고 유량이 10 lpm인 경우 95% 정도의 하전율을 보이며, 20 lpm인 경우 약 87%, 30 lpm인 경우 75% 정도의 하전율을 보이고 있다. 따라서 electro-spray 챔버에 공급되는 aerosol의 유량이 증가할수록 하전율은 거의 선형적으로 감소됨을 알 수 있다. 이는 electro-spray 노즐에서 분사되어 하전된 초미세 입자와 electro-spray 챔버 내로 유입된 외부의 입자가 서로 충돌하여 입자를 하전시키는데, 유량이 증가할수록 일정 거리 내에서 그 충돌 빈도수가 감소하여 입자가 충분히 대전되지 못하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

Electro-spray를 이용한 입자의 하전율을 평가하기 위하여 electro-spray 챔버를 설계 제작하여 실험적으로 접근하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Electro-spray 챔버 내로 유입되는 aerosol의 유량이 증가할수록 입자의 하전율은 감소하는 경향을 나타내었으며 aerosol의 유량이 20 lpm일 때 약 90%의 입자를 하전시켰다.

(2) 다분산 NaCl 입자의 평균 크기가 62 nm에서 하전율이 약 90%에 도달할 수 있는 aerosol의 유량은 20 lpm 이하의 조건이라는 것을 실험으로 확인하였다.

(3) 직경 46 nm의 단분산 입자도 90% 이상 하전시킬 수 있는 것을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Michelson, D., 1990, Electrostatic Atomization, Adam Hilger, Bristol and New York.
2. Michel Cloupeau and Bernard Prunet-Foch, 1994, Electrohydrodynamic Spraying Function Modes: A Critical Review, J. of Aerosol Sci., Vol. 25, No. 6, pp. 1021-1036.
3. Grace, M. and Marijnissen, J. C. M., 1994, A Review of Liquid Atomization by Electrical Means, J. of Aerosol Sci., Vol. 25, No. 6, pp. 1005-1019.
4. Lee, K.W. and Kang-Ho Ahn, 1998, Study on the Ultrafine Aerosol Generation by Electro - Hydrodynamic Spraying, Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol. 22, No. 11, pp. 1983- 1988.
5. Chen, D., Pui, D. Y. H. and Kaufman, S. L., 1995, Electro spraying of Conducting Liquids for Monodisperse Aerosol generation in the 4 nm to 1.8  $\mu$ m diameter Range, J. of Aerosol Sci., Vol. 26, No. 6, pp. 963-977.