

< 기술논문 >

응축 증발법을 통한 서브마이크론 입자의 단극하전 특성

최 영 주* · 김 상 수†

(2005년 7월 6일 접수, 2005년 12월 26일 심사완료)

Characteristics of Unipolar Charging of the Submicron Particles by the Condensation-Evaporation Method

Youngjoo Choi and Sangsoo Kim

Key Words : Condensation-Evaporation Method(응축 증발법), Indirect Corona Charger(간접 코로나 하전기), Unipolar Charging(단극 하전)

Abstract

We applied a new charging system using the condensation and evaporation method to charge the submicron particles with a uniform charging performance. The monodispersed NaCl submicron particles were condensed by n-butanol vapor and grew up to micron droplets with a same size, regardless of their initial size. Those condensed droplets were charged in an indirect corona charger. The indirect corona charger consisted of the ion generation zone and the particle charging zone. In the ion generation zone, Ions were generated by corona discharge and some of them moved into the particle charging zone by a carrier gas and mixed with the condensed droplet. And finally, the charged and condensed droplets dried through an evaporator to shrink to their original size. The average charge and penetration rate of the particles before and after evaporation were measured by CPC and aerosol electrometer and compared with those of a conventional corona charger. The results showed that the average charge was 5~7 charges and the penetration rate was over 90%, regardless of the initial particle size.

기호설명

- d : 입자의 직경(m)
- E : 전기장의 세기(V/m)
- q : 입자의 하전량
- C_c : 미끄럼 보정 계수
- V_m : 전기장내에서 입자의 종단속도(terminal velocity, m/s)
- μ : 유체의 절대 점성(absolute viscosity, N·s/m²)

1. 서론

전기적으로 하전된 입자는 전기력을 이용한 제

어가 가능하기 때문에 입자의 생성 및 측정, 반도체 공정에서의 불순물이나 대기 오염물질 제거 등 많은 입자 관련 분야에 응용되고 있다.

전기장 내에서 하전된 입자의 이동 경로는 입자의 크기와 하전량에 의해 결정된다, 하지만 입자의 크기가 작아질수록 입자의 하전 성능(평균 하전량, 하전 효율)이 낮아지고, 하전되지 않은 입자의 양이 증가하기 때문에 입자 크기 분포 측정이 나 제어가 어려워진다.

최근까지 입자의 하전에 관한 연구는 주로 50 nm 이하 나노 입자의 하전 효율(하전된 입자의 비율)을 향상시키거나 하전기 내의 입자의 손실을 줄이는 방향으로 진행되었다. Buscher 등⁽¹⁾과 Wiedensohler 등⁽²⁾은 하전기 내 입자의 손실을 줄이기 위해 사각파 교류 전기장을 이용한 하전기를 개발하여 하전 성능을 측정하였고, Chen 등,⁽³⁾ Medved

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sskim@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3021 FAX : (042)869-8207

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

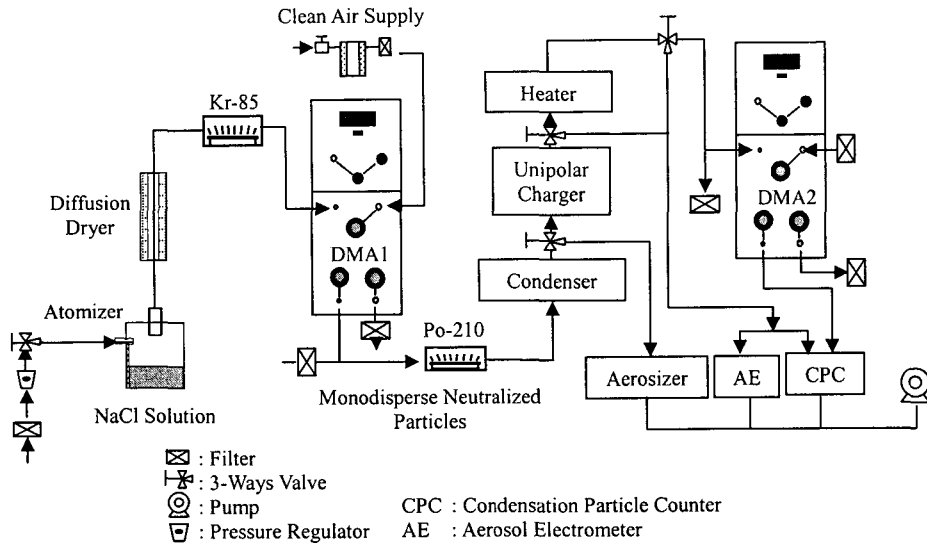


Fig. 1 Experimental setup

등,⁽⁴⁾ Sierra 등⁽⁵⁾과 Kruis 등⁽⁶⁾은 방사능 소스 또는 코로나 방전을 이용한 단극 하전기의 구조와 입자 체류시간 등을 조절함으로써 나노 입자, 특히 10nm 이하 입자에 대해서 높은 하전 효율 결과를 보여주었다. 하지만 나노입자가 가지는 표면적의 한계 때문에 나노입자의 하전량을 증가시키기 위한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 현재 응축을 이용하여 나노입자의 하전량을 증가시키는 몇몇 연구가 진행 중이다.

서브마이크로 입자나 나노입자의 응축 현상은 입자의 생성, 측정과 관련한 분야에서 많이 응용되고 있지만 제어 분야에서의 응용은 미진한 상태이다. 서브마이크론 입자가 응축을 통해 균일한 크기의 마이크로 액적으로 성장하는 현상⁽⁷⁾ CPC (Condensation Particle Counter)의 측정 원리로도 이용되고 있다. Park 등^(8,9)은 수치 해석을 통해 다분산 분포를 가지는 서브마이크론 입자가 단분산 분포를 가지는 마이크로 입자로 응축 성장함을 보였으며, Choi 등⁽¹⁰⁾과 Suh 등⁽¹¹⁾은 응축 입자의 하전 및 증발을 통해 서브 마이크로 및 나노입자의 하전량을 높일 수 있음을 실험을 통해 보여주었다. 하지만 초기 입자 크기에 상관없이 균일한 크기로 성장한 입자를 하전시킬 경우, 단순히 입자의 하전량을 증가시키는 효과뿐만 아니라 균일한 하전 성능을 기대할 수 있다. SMPS(scanning mobility particle sizer)나 EEPS(engine exhaust particle spectrometer)와 같은 입경 측정 장비들은 하전된 입자를 전기장을 이용하여 전기적 등가 입경 분포

를 측정하고, 측정된 전기적 등가 입경을 환원법 (reduction method)을 통해 입자의 크기로 변환하여 원래의 입자 크기 분포를 계산한다. 이러한 장비들은 동일한 전기장내에서 하전된 입자의 이동 속도(migration velocity, $V_m = qEC_c / 3\pi\mu d$)가 같을 경우, 동일한 입자로 측정하기 때문에, 입경과 하전량이 큰 입자와 입경과 하전량이 작은 입자가 동일한 전기적 등가 입경으로 측정될 수 있다. 전기적 등가 입경 분포로부터 원래 크기 분포를 얻기 위해서는 각 입자의 크기별 하전 성능(하전량, 하전 분포, 하전 효율)에 대한 정보가 필수적으로 요구되지만 현실적으로 모든 개별 입자에 대한 하전 성능 측정은 불가능하다. 그러나 서브 마이크로 입자를 응축, 증발 과정을 통해 입자의 크기에 상관없이 균일하게 하전시킬 경우, 하전된 입자가 가지는 전기적 등가 입경으로부터 실제 입자 크기를 보다 정확하게 계산하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 응축을 이용한 입자의 하전 특성과 관련하여, 서브마이크론 입자의 응축 및 증발 특성과 코로나 하전기를 통한 응축 입자의 하전 특성(평균 하전량, 투과율)을 측정하고 기존의 코로나 하전기를 사용할 경우의 하전 특성과 비교하였다.

2. 실험 방법

전반적인 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 실험 입자는 NaCl 입자를 사용하였다. 먼저 입자발생기

(atomizer)를 통해 발생된 NaCl 액적은 확산 건조기(diffusion dryer)를 거치면서 다분산 분포를 가지는 NaCl 입자가 된다. 이러한 입자들은 DMA(differential mobility analyzer, model 3071, TSI inc., USA)를 통해 동일한 전기이동도 직경을 가지는 입자로 분류된다. 분류된 입자는 다시 중화기(neutralizer, Po-210)를 통해 전기적으로 중화시킨 후 응축기를 통해 성장시켰다.

2.1 응축

응축 장치는 포화기(saturator)와 응축기(condense-r)로 이루어져 있다(Fig. 2) 포화기는 응축 유체로 n-부탄올이 부분적으로 채워져 있으며, 열조절기(heat controller)를 이용하여 포화기 내 부탄올의 온도를 일정하게 유지시켰다. 포화기 내부 직경과 길이는 모두 100 mm이며, 포화기를 통해 포화된 입자들은 사각 알루미늄 블록을 관통하는 3/8" 스테인리스 관을 지나면서 냉각된다. 알루미늄 블록과 스테인리스 관은 열전소자(thermoelectric module)에 의해 냉각되며, 열전소자의 입력 전압과 응축기 내부를 통과하는 유량은 7 V와 4 l/min으로 고정시켰다. 포화기 내 n-부탄올의 온도는 35~ 45℃로 5℃씩 증가시키면서 Aerosizer(model 3220, TSI Inc., USA)를 이용하여 응축 성장된 입자의 크기 분포를 측정하였다.

본 실험에서는 Aerosizer 에서의 샘플링 유량과 응축장치를 통과하는 유량을 같게 하여, 측정과정에서의 외부 공기와의 혼합에 의한 응축 입자의 증발을 최소화 하였다.

2.2 증발

증발기는 내경 50 mm, 길이 200 mm의 스테인리스 관으로 제작되었으며, 가열판(heating plate)과 열 조절기를 이용하여 외벽 온도를 일정하게 유지시켰다. 증발된 NaCl 입자의 크기 분포는 DMA를 이용하여 측정하였으며, 응축 전의 입자 전기이동도 직경 분포와 비교하였다.

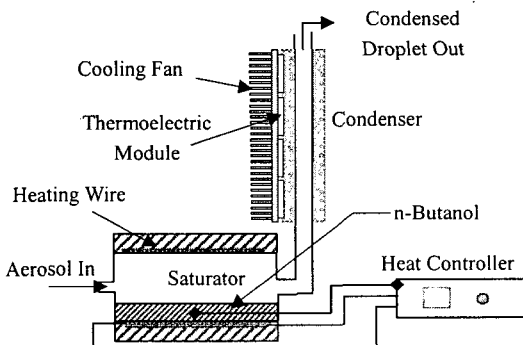


Fig. 2 Schematic diagram of the condensing device

2.3 하전

2.3.1 직접코로나 하전

기존의 하전 방법과 비교하기 위하여 코로나 하전기를 통한 NaCl 입자의 하전 성능을 측정하였다. 실험에 사용된 하전기는 일반적인 Pin to Ring 형태의 코로나 하전기(Fig. 3)로 전기이동도 직경을 변화시키면서 입자의 수농도와 전하량을 응축 입자 계수기(CPC, model 3010, TSI Inc., USA)와 입자 전류 측정기(aerosol electrometer, model 3068, TSI Inc. USA)를 이용하여 측정하였다. 전극링의 내경은 3/8"이며 전극침과 전극링 사이의 거리는 10mm로 고정시켰다. 코로나 전류는 전극침에 고전압 저장(3 MΩ)을 연결하여 저장 양단에 걸리는 전압을 측정하여 계산하였다. 평균 하전량과 투과율은 입력 전압에 따라 측정되는 입자의 총 전하량과 입자의 수농도의 비와, 입력 전압에 따라 측정된 입자의 수농도와 입력 전압이 0 V일 때 수농도의 비를 이용하여 계산하였다. 입력전압은 0~5.5kV로 변화시켜가며 실험하였다.

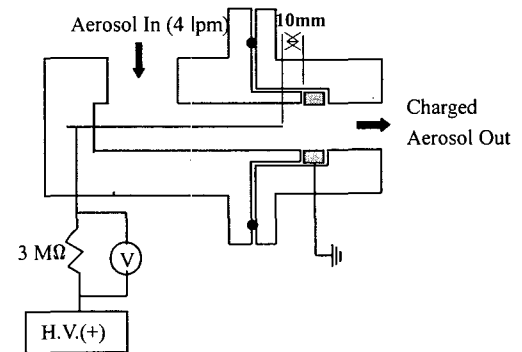


Fig. 3 Schematic diagram of the (direct) corona charger for uncondensed particles

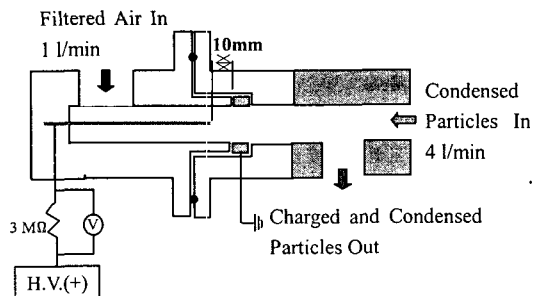


Fig. 4 Schematic diagram of the indirect corona charger for condensed droplet

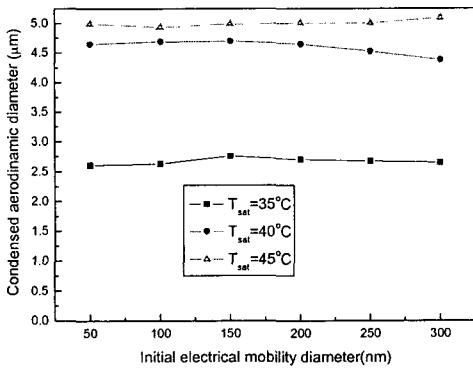


Fig. 5 Mean diameter of the condensed droplets as the temperature of the saturator

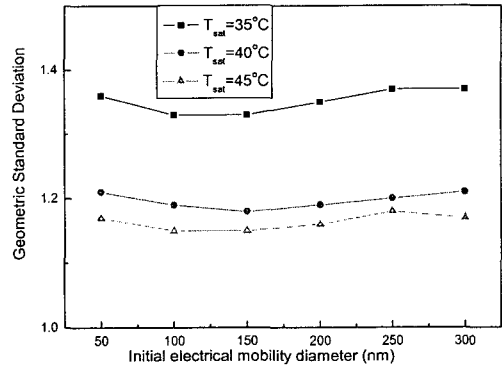


Fig. 6 Geometric standard deviation of the condensed droplets as the temperature of the saturator

2.3.2 간접코로나 하전

응축 성장한 입자를 코로나 방전이 일어나는 전기장에 직접 통과시킬 경우, 응축된 입자가 전극 링에 부착되면서 부탄을 막을 형성하여 코로나 특성에 영향 주기 때문에 응축 입자의 하전기로는 적합하지 않다. 따라서 본 실험에서는 이송 기체를 이용한 간접 코로나 하전기를 통해 응축 입자를 하전시켰다. 간접 코로나 하전기는 이온 생성부와 입자 하전부로 구성되어 있다.(Fig. 4) 코로나 방전에 의해 발생된 이온의 일부는 이송 기체(carrier gas)에 의해 입자 하전부에서 응축 입자와 섞이게 된다. 이온 생성부로 주입되는 이송 기체의 유량은 1 l/min으로 고정시켰으며, 입력 전압은 0~5.5kV로 변화시키면서 실험하였다.

3. 실험 결과

3.1 응축

Figs. 5~6은 포화기 온도와 초기 NaCl 입자의 전기이동도 직경에 따라 응축 성장된 입자의 평균 입경과 GSD (geometric standard deviation)를 Aerosizer로 측정한 결과이다. 포화기의 온도가 증가할수록 포화 증기량이 증가하기 때문에 응축 입자의 평균 입경은 커지며, GSD는 작아진다. 응축을 통해 서브마이크론 입자가 단분산 분포를 가지는 것은 기존의 Park et al.^(8,9)의 수치 결과와 일치한다.

Fig. 7에서 포화기 온도가 40°C 일 때, 응축 입자의 표준 크기 분포가 초기 입자의 전기이동도 직경에 상관없이 동일한 것을 알 수 있다. 이후 하전, 증발 실험은 포화기의 온도를 40°C로 일정하게 유지시키고 진행하였다.

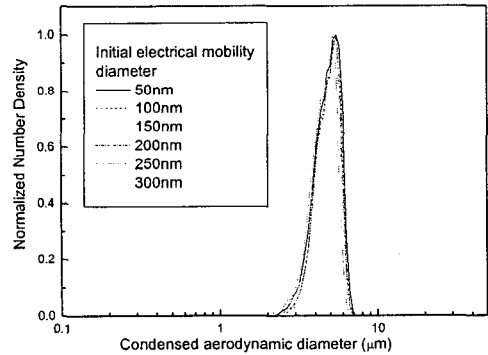


Fig. 7 Normalized size distribution of the condensed droplets at $T_{sat} = 40^\circ\text{C}$

3.2 증발

Fig. 8은 NaCl 입자를 응축 성장시킨 후 증발기를 통해 응축 입자를 증발시키고 SMPS로 크기분포를 측정한 결과이다. 증발기 외벽의 온도는 포화기의 온도와 같은 40°C로 유지하였으며, 응축된 입자가 증발을 통해 원래 전기이동도 직경 분포와 동일한 분포를 가짐을 알 수 있다.

3.3 하전

3.3.1 직접 코로나 하전

Fig. 9는 코로나 인가전압에 따른 코로나 전류를 측정한 값이다. 본 연구에 사용된 입자 크기 영역에서는 장하전과 확산하전이 동시에 일어난다.⁽¹²⁾ 인가전압이 3.5kV일 때 코로나 방전이 시작되며, 이후 인가전압이 커질수록 전류값은 급격히

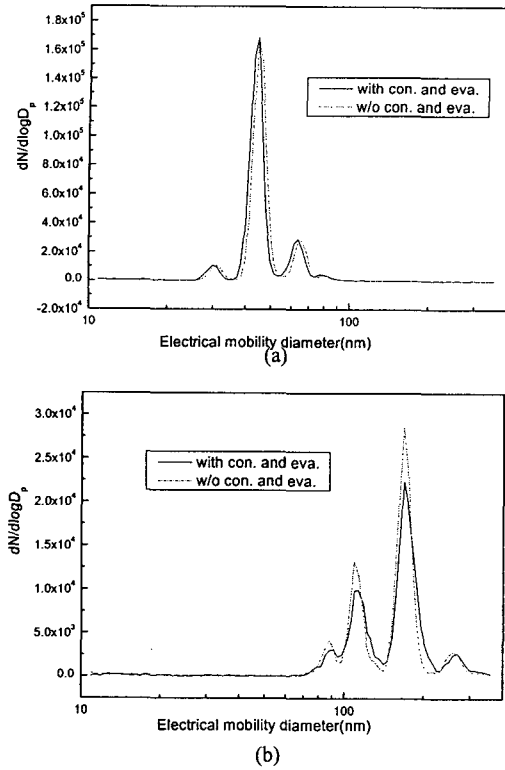


Fig. 8 Comparison the size distribution of the NaCl particles after evaporation with the original size distribution

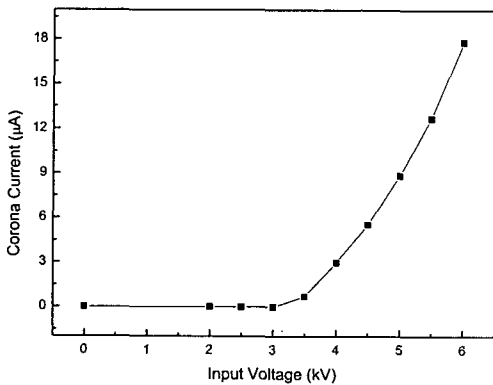


Fig. 9 Corona current vs. input voltage

증가한다. 평균 하전량의 경우, 입자의 전기이동도 직경과 인가전압이 커질수록 증가한다. (Fig. 10a) 이것은 입자의 전기이동도 직경이 커질수록 입자의 표면적이 커져 이온의 부착 확률이 증가하며, 인가전압이 커질수록 장하전(field charging)이

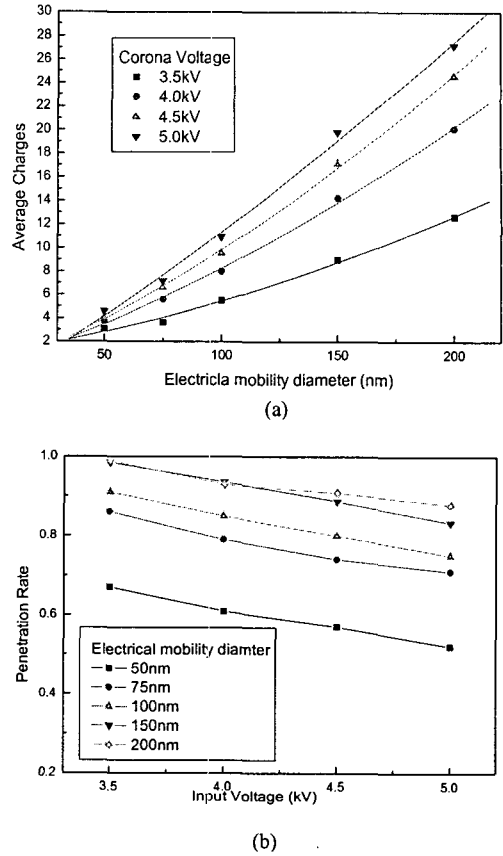


Fig. 10 (a) Average charge and (b) penetration rate of NaCl particle as input voltage

활발하게 이루어지기 때문이다. 투과율의 경우 인가전압이 클수록 하전된 입자가 강한 전기장에 의해 부착되기 때문에 투과율은 감소하지만 본 연구에 사용된 입자 크기 영역에서는 입자의 전기이동도 직경이 커짐에 따라 투과율은 오히려 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 10b). 하전된 입자가 전기장에서 가지는 이동 속도 ($V_m = qEC_c / 3\pi\mu d$)는 하전량과 미끄럼 보정계수에 비례하고 입자의 크기에 반비례한다. 따라서 입자의 크기가 커짐에 따라 평균 하전량(q)이 증가하더라도 입자가 가지는 이동 속도는 감소하기 때문에 투과율은 증가한다.

3.3.2 간접 코로나 하전

이송 기체를 이용한 간접 코로나 하전의 경우, 하전기에 주입되는 입자는 초기 입자의 전기이동도 직경에 상관없이 동일한 크기를 가지고 하전되며, +5~7 기본 전하(elementary unit)의 평균 하전량과 90% 이상의 높은 투과율을 보인다(Fig. 11). 기존의 하전 방법과 달리 초기 입자의 크기에 따라 입자의 평균 하전량과 투과율이 큰 차이를 보이

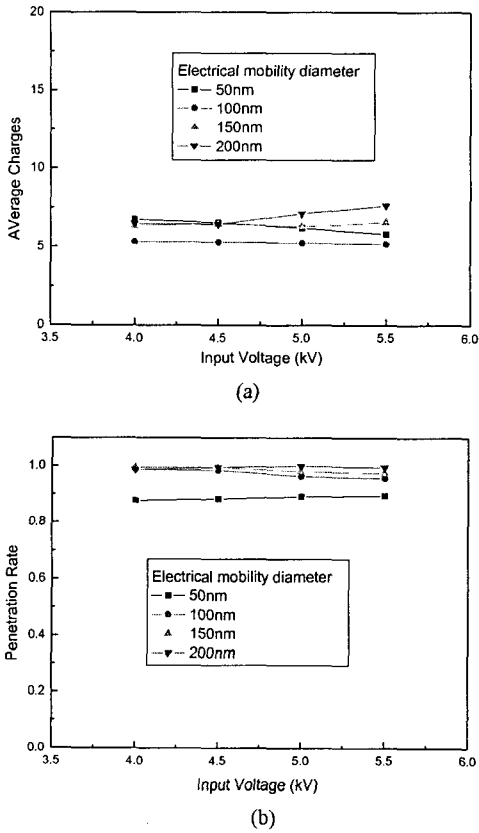


Fig. 11 (a) Average charges and (b) penetration of the condensed NaCl particles after evaporation as input voltage

지 않는다. 하지만 마이크로 크기로 성장한 입자가 가질 수 있는 하전량에 비해 상당히 작은 하전량을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 간접 코로나 방식의 하전기에서 이송 기체에 의해 응축 입자와 섞이는 이온의 농도가 직접 코로나 하전기의 경우보다 높지 않고 응축 입자들과 이송 기체가 섞이는 과정에서 증발이 일어나기 때문으로 해석될 수 있다. 이송 기체와 섞이고 난 후의 응축 입자를 Aerosizer로 측정해 본 결과, 응축 입자가 Aerosizer의 측정 영역 이하로 증발했음을 확인하였다. 투과율의 경우, 직접 코로나 하전 방식과는 달리 하전된 응축입자에 작용하는 전기장이 존재하지 않기 때문에 전기장에 의한 하전된 응축 입자의 손실이 거의 일어나지 않는다.

4. 결론

본 실험을 통하여 서브 마이크로 입자가 응축을

통해 단분산 분포의 마이크로 입자로 성장되며, 증발 이후 응축 입자의 전기이동도 직경 분포가 원래의 크기 분포와 일치하는 것을 확인하였다. 또한 기존의 코로나 하전기를 통한 입자의 하전 성능과 응축 증발을 이용한 하전 성능을 서브마이크론 NaCl 입자를 이용하여 비교하였다. 응축 증발을 이용하여 입자를 하전시킬 경우, 코로나 인가 전압에 따라 하전 성능이 큰 차이를 보이지 않으며, 전기이동도 직경이 100nm 보다 큰 입자의 평균 하전량이 직접 코로나 하전법의 의한 평균 하전량보다 작지만, 하전 성능(+5~7 charges, 투과율 90% 이상)이 크기에 따라 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 전기장에서 하전된 입자들의 이동 경로는 각 입자들이 가지는 하전 성능과 입경에 의해 결정된다. 기존의 하전 장치를 이용하여 입자를 하전시킬 경우, 입자의 하전 특성은 입자의 크기에 따라 다르기 때문에 전기력을 이용한 하전된 서브마이크론 입자의 정확한 입경 분포 측정이나 특정 크기의 입자 분류가 어렵다.

하지만 응축 증발법을 통해 서브마이크론 입자를 균일하게 하전시킬 경우, 전기장내에서 입자의 거동을 입자의 크기 정보만으로도 알아낼 수 있기 때문에, 전기력을 이용하는 제어 및 측정 기술을 개선시킬 수 있다.

후기

본 연구는 부분적으로 환경부의 차세대 환경기술 개발 사업과 교육부의 BK21 사업의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Buscher, P., Ott, A. S. and Wiedensohler, A., 1994, "Performance of a Unipoar Square Wave Diffusion Charger with Variable Nt-product," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, pp. 651~663.
- (2) Wiedensohler, A., Buscher, P., Hansson, H. C., Martinsson, B. G., Ferron, F. G. and Busch, B., 1994, "A Novel Unipolar Charger for Ultrafine Aerosol Particles with Minimal Particle Losses," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 34, pp. 639~649.
- (3) Chen, D. R. and Pui, D. Y. H., 1999, "A High Efficiency, High Throughput Unipolar Aerosol for Nanoparticles," *J. Nanopart. Res.*, Vol. 1, pp. 115~126.
- (4) Medved, A., Dorman, F., Kaufman, S. L. and Pocher, A., 2000, "A New Corona-based Charger for Aerosol Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 31, Suppl. 1, pp.

- 616~617.
- (5) Sierra, A. H., Alguacil, F. J. and Alonso, M., 2003, "Unipolar Charging of Nanometer Aerosol Particles in a Corona Ionizer," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 34, pp. 733~745.
- (6) Kruis, F. E. and Fissan, H., 2001, "Nanoparticle Charging in a Twin Hewitt Charger," *J. Nanopart. Res.*, Vol. 3, pp. 39~50.
- (7) Jeong, H. J. and Kim, S. S., 2001, "Condensational Growth of Particles Through Expansion in a Capillary Tube," Ph Thesis, KAIST.
- (8) Park, S. H. and Lee, K. W., 2000, "Condensational Growth of Polydisperse Aerosol for the Entire Particle Size Range," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 33, pp. 222~227.
- (9) Park, S. H., Lee, K. W., Shimada, M. and Okuyama, K., 2002, "Change in Particle Size Distribution of Aerosol Undergoing Condensational Growth: Alternative Analytical Solution for the Low Knudsen Number Regime," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 33, pp. 1297~1307.
- (10) Choi, Y. J. and Kim, S. S., 2004, "Unipolar Charging of Submicron Particles Using the Condensation and Evaporation Method," *The 5th Korean conference on aerosol and particle technology*, pp. 209~210.
- (11) Suh, J. S., Han, B. W., Kim, D. S. and Choi, M. S., 2005, "A Method for Enhanced Charging of Nano Particles via Condensation Magnification," *J. Aerosol Sci.*, Article in press.
- (12) Friedlander, S. K., 2000, *Smoke, Dust, and Haze-Fundamentals of Aerosol Dynamics*, Oxford Press.