

2A1) 나노 에어로졸의 실시간 측정에 영향을 미치는 인자 Effect of Parameters for Real-time Measurement of Nano Aerosols

지준호·노형수·오상경
삼성전자 DA 연구소 요소기술그룹

1. 서론

나노와 서브마이크론 크기의 입자는 최근 물질 제조, 유해 입자상 물질 제거 및 오염 제어 등의 분야에서 관심이 높아지고 있다. 보통 100 nm 이하의 나노 입자는 분말 촉매, 세라믹, 전기 소자 등의 다양한 용도로 사용되고, 자동차, 공장, 발전소, 소각로 등의 연소 과정에서 발생되어 상당량이 대기 중 배출된다. 초미세 나노 에어로졸 입자는 대기 에어로졸 수 농도의 대부분을 차지하고, 크기와 성분에 따라 인체 유해성이 논란이 되고 있다. 나노 크기인 초미세 입자의 거동이나 물리적 특성을 이해하려면 정확한 입자의 크기분포 측정이 필요하다. 최근 많은 연구에서 나노 에어로졸 입자를 측정하기 위해 SMPS(scanning mobility particle sizer)를 사용하고 있다. SMPS 시스템은 1 μm 이하 입자의 크기분포를 측정하는 장비로 에어로졸 중화기(aerosol charge neutralizer), 전기적 이동도 분석기(DMA, differential mobility analyzer), 응축핵 계수기(CPC, condensation particle counter), 측정된 입자의 실제 크기분포를 계산하는 소프트웨어로 구성된다. DMA는 전기적 이동도에 따라 입자를 분리하는데, 나노 에어로졸의 경우 주로 응집체로 존재하므로 형상에 따른 측정 메커니즘의 이해가 필요하다.

본 연구에서는 나노 에어로졸 입자가 SMPS의 요소인 에어로졸 중화기, DMA, CPC로 측정된 후, 소프트웨어로 처리되는 과정에서 나타날 수 있는 오차의 원인을 고찰하였다. 측정 대상인 나노 입자의 하전량, 형상, 응축핵 계수기의 계수 효율(counting efficiency)에서 야기되는 문제점을 기존의 연구 결과를 이용하여 살펴보았다.

2. 나노 입자의 하전량의 영향

SMPS 시스템의 예비하전장치인 에어로졸 중화기는 DMA 입구에서 입자를 양극성(bipolar)으로 하전시키는 장치이다. 용기 내에 설치된 ^{85}Kr , ^{210}Po 등 방사능 물질에서 배출되는 알파 혹은 베타선에 의해 공기 분자를 양이온과 음이온으로 만들어 입자를 하전시킨다. 양극성 하전기인 에어로졸 중화기의 성능은 SMPS 시스템의 입경분포 측정결과에 영향을 미친다. 코로나 방전에 의해 양 혹은 음으로 높게 하전된 입자의 경우 농도와 하전량에 따라 중화기에서 충분히 중화되지 않을 수 있다.(지준호 등, 2003b)

정전기력을 이용한 전기집진기나 정전식 공기 청정기를 평가할 때 ^{85}Kr 에어로졸 중화기를 장착한 SMPS를 사용하여 입자의 크기분포를 측정할 경우 측정 에어로졸의 농도나 유량에 따라 입경분포 및 수농도가 실제와 다르게 왜곡될 수 있으므로, 적절한 회석시스템을 사용해야 하고 에어로졸 중화기 내 체류시간을 증가시키기 위해 통과유량을 줄이거나 여러 개의 중화기를 병렬로 연결하여 사용해야 한다. 또는 상대적으로 중화 성능이 좋은 ^{210}Po 에어로졸 중화기를 사용할 수도 있다. (Ji 등, 2004)

3. 나노 입자의 형상의 영향

나노 입자는 주로 응집체를 형성하기 때문에 동일한 외력이 작용하는 공간에서 같은 부피의 구형인 입자보다 더 많은 항력을 받는다. 이 때문에 응집된 입자와 같은 부피의 구형 입자를 DMA로 분리할 때, 전기적 이동도 직경이 달라진다. 기하평균입경이 43 nm와 29.5 nm였던 응집 단분산 입자는 같은 부피의 구형인 입자의 경우 각각 36 nm와 27 nm로 전기적 이동도 직경이 감소하였다.(지준호 등, 2003a) SMPS는 수농도를 부피나 무게농도로 환산하는 과정에서 입자의 크기를 구형이라고 가정하므로, SMPS는 응집된 입자의 부피 농도를 실제보다 크게 측정한다. 응집 입자의 경우 소프트웨어로 환산된 무게농

도는 조건에 따라 30% 이상 높게 나타났다.

응집 나노 입자의 확산하전 효율은 SMPS의 측정 농도에 직접적인 영향을 미친다. 특히, 에어로졸 중화기의 성능은 구형 입자를 기준으로 평가되었으므로, 실험하여 구형 입자와 비교하였다. 응집 에어로졸의 확산하전 분포는 전기적 이동도 직경을 기준으로 구형 입자와 차이가 크지 않지만, 40-50 nm을 기준으로 다른 경향을 나타낸다. 전기적이동도 직경이 같은 경우, 50 nm 이상 입자는 응집 입자의 중성 입자의 비율이 구형인 입자에 비해 상대적으로 낮지만 50 nm 이하 입자는 약간 높게 나타난다. 즉, SMPS의 측정 결과에서 50 nm 이하의 응집 입자의 농도는 실제보다 높게 측정되고, 50 nm 이상 입자는 낮게 측정된다 (Ji and Hwang, 2004).

4. CPC의 계수 효율과 SMPS 소프트웨어 계산의 영향

CPC는 광학적으로 측정할 수 없는 100 nm 이하의 나노 입자까지도 측정할 수 있는 장비로, 입자의 응축 성장 특성을 이용한다. CPC의 성능은 측정 가능한 최소 입자로 나타내는데, 광학적으로 감지할 수 있는 확률인 계수 효율을 사용한다. 상용 장비 중 TSI 사의 UCPC(ultrafine condensation particle counter, model 3025)의 경우 3nm의 입자를 50% 계수할 수 있는 반면, CPC의 사양에 따라 7nm(TSI model 3022) 혹은 14nm(TSI model 3010) 입자를 50% 계수한다. 세 모델은 수치적으로는 불과 11 nm의 차이를 나타내지만 실제로 나노입자를 계수하는 경우 10 nm 이하의 비율이 높을 수 있기 때문에 CPC의 차이는 측정 결과에 심각한 오차를 야기할 수 있다. 나노 에어로졸을 측정하는 과정에서 CPC가 적절히 선택되지 않을 경우, SMPS로 측정된 입자의 수 농도는 실제보다 낮게 측정되고, 왜곡된 크기분포가 나타날 수 있다.

측정 입자의 최소 크기가 수 나노미터 수준인 경우 DMA의 운전조건과 CPC의 선택이 적절하지 못하면 결과에 오차를 야기할 수 있다. 또한, SMPS 소프트웨어는 측정 데이터를 통계 처리하여 결과를 제시하기 때문에, 통계 데이터의 신뢰성을 확보하려면 측정 입자 크기분포의 대부분이 측정 범위에 포함되어야 한다. 즉, 나노 에어로졸의 경우 최소 입경까지 측정할 수 있도록 DMA의 운전조건과 응축핵 계수기의 사양을 선정해야 한다.

5. 요약

에어로졸의 측정은 다양한 변수에 영향을 받는다. 입자가 공기 중에 떠 있으므로 입자 주위의 유체 온도와 압력에 영향을 받을 뿐 아니라 측정 대상인 입자의 크기, 농도, 하전 상태에 따라서 제약을 받는다. 특히, 에어로졸의 발생이나 측정은 복잡한 메커니즘으로 이루어지기 때문에 장비의 성능을 평가하거나 교정하는 과정은 쉽지 않고, 적당한 지침이나 문헌 또한 부족한 실정이다.

고농도, 고하전인 극한 조건에서 나노 에어로졸 입자를 측정하는 경우에는 측정 장비가 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있도록, 측정 대상인 나노 입자의 하전량, 형상, 크기 분포를 미리 예측하여 SMPS의 운전조건을 적절하게 결정할 수 있도록 미리 확인해야 한다.

참고 문헌

- 지준호, 배귀남, 황정호 (2003a) 에어로졸 중화기의 성능이 SMPS의 측정 결과에 미치는 영향, 대한기계학회논문집 B권, 27(10), 1498-1507.
- 지준호, 배양일, 황정호, 배귀남 (2003b) 전기가열 튜브로를 이용한 나노/서브마이크론 입자의 발생, 대한기계학회논문집 B권, 27(12), 1734-1743.
- Ji, J. H., Bae, G. N., and Hwang, J. (2004) Characteristics of Aerosol Charge Neutralizers for Highly Charged Particles, *J. Aerosol Sci.*, in press.
- Ji, J. H. and Hwang, J. (2004) Characteristics of Bipolar Diffusion Charging of Nano-Agglomerate Aerosols, Abstracts of the European Aerosol Conference 2004, Budapest, 253-254.