

부유 미립자 포집 및 측정기기

1. 서론

최근에 에어로졸(유체 중 부유 미립자)에 대한 연구가 활발해지면서 부유 미립자를 포집하기 위한 장치의 개발에 큰 진전이 있어왔다. 1970년도에는 대기오염 연구에 관련되어 많은 노력이 기울어져 왔으며 이와 함께 산업 분야에서도 새로운 기기의 개발이 이룩되었다. 특별히 반도체 클린룸이라든지 초순도 가스상에서의 오염입자 측정등이 첨단 산업분야에서 중요하게 되어 마이크로 컴퓨터와 실시간 데이터 처리 소프트웨어 등의 사용으로 더욱 정확한 측정이 가능해졌다. 또한 측정장비 교정을 위한 단분산 표준 입자의 개발로 측정장비 개발에 큰 도움을 주게 되었고 이러한 노력으로 새로운 센서 개발과 실험 데이터의 보다 정확한 해석이 가능해졌다.

부유미립자 측정 시스템은 크게 부유미립자의 농도, 크기분포와 화학조성 등에 의해 특징되어진다. 이외의 물리변수로 광산란 계수등이 중요할 때는 그 값을 측정하기도 한다.

최근 몇년간 Journal of Aerosol Science나 Aerosol Science and Technology 등의 학술지에 발표된 논문들을 살펴보면 부유미립자의 농도 및 크기 범위 중에서도 크기는 0.01~10 μ m, 농도는 1~10⁶ 입자수/cm³ 범위의 입자들이 연구의 관심 대상이 되고 있

생 산 기 술 연 구 원
(기계기술실용화센터)
부교수 오 명 도

다. 이와함께 산업분야 응용으로 source emission 등과 같은 고농도 환경과 반도체 클린룸과 같은 저농도 환경 분야에서도 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본고에서는 이와관련된 연구성과를 소개하고자하며 여기서는 입자의 화학성분 측정에 관련된 사항은 다루지 않고 입자의 물리적 측정만을 다루기로 한다.

2. 대기부유 미립자 크기 분포 및 측정 범위

부유 미립자 연구를 위해서는 배경 농도 및 크기 분포에 해당하는 대기 부유미립자에 대한 정보가 크기에 따른 입자의 생성원

및 특성을 파악하는데 중요하다.

대기 부유 미립자의 크기분포는 직경범위로 0.002~100 μm 의 분포를 가지며 이 중에서 0.01~10 μm 크기의 입자들이 주요 관심 대상이 된다. 그림 1은 대기중에 부유하는 입자들의 크기 분포를 나타내는데 대체로 trimodal 분포를 가지고 있다.¹⁾

입자 크기가 2 μm 보다 큰 입자 분포는 굵은 입자 모드(coarse particle mode)로 그 입자들이 주로 바람에 의한 먼지, 도로상 먼지등과 같이 기계적인 물리력에 의해 발생하게 된다. 이러한 모드의 입자들은 실리콘, 철, 알루미늄, 칼슘, 해염, 공장먼지 등과 같은 다양한 입자들의 조성을 갖고 있

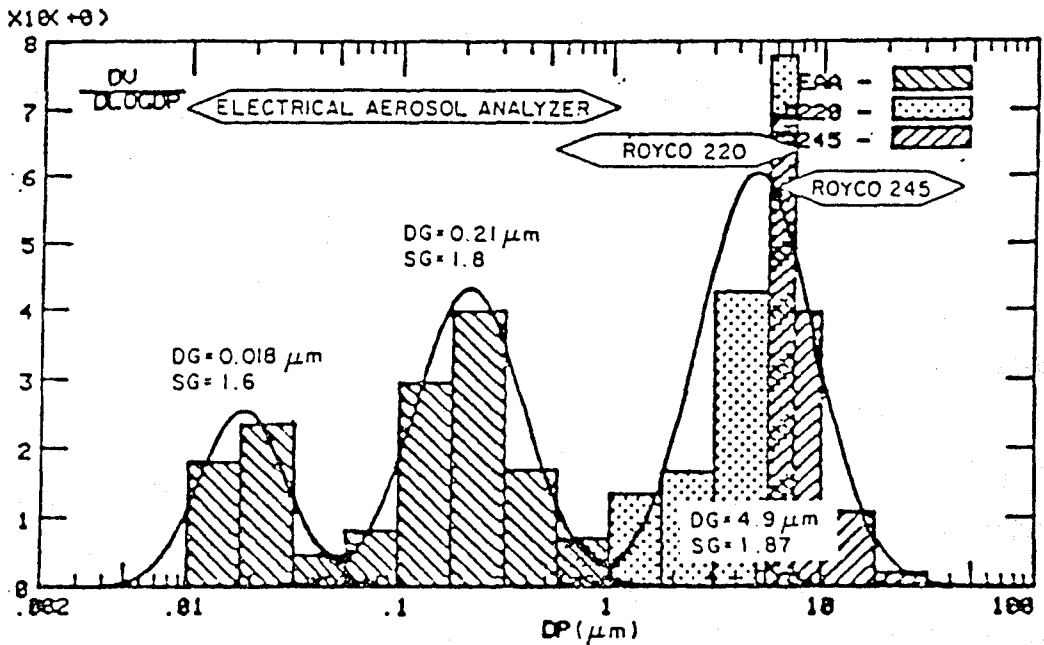


그림 1. 대기 에어로졸의 trimodal 크기 분포

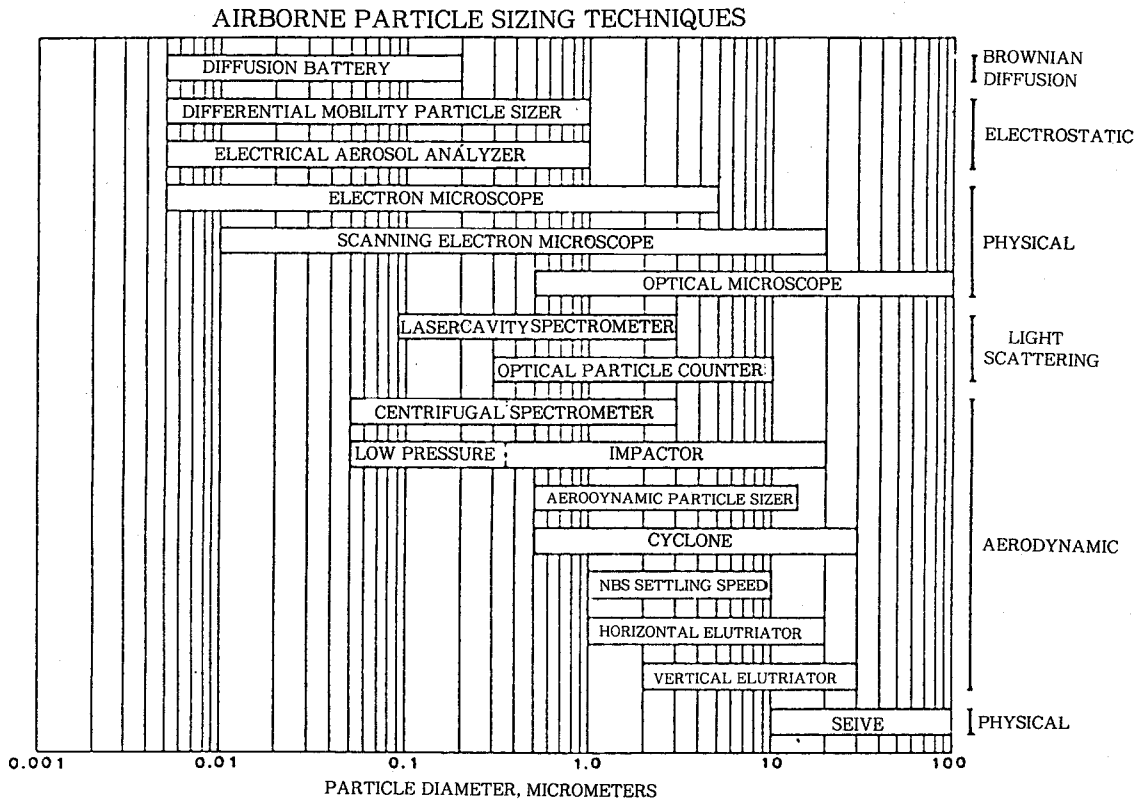


그림 2. 에어로졸 측정기기들의 측정 범위

다. 이에 반해서 이 모드보다 작은 크기의 입자들은 핵입자모드(nuclei particle mode)와 축적입자 모드(accumulation particle mode)로 분리되는데 이러한 입자들은 주로 연소라든지 가스가 입자로 전환되는 과정을 통해서 생성된다.

이러한 모드의 입자들은 황산염, 질산염, 유기탄소, 암모늄, 납 성분등으로 이루어져 있다. 조성 물질의 상대적인 양은 지역과 기상조건에 따라 달라지고 또한 특정 산업과 자동차 교통량 등의 오염에 의존하게 된

다. 그림 1에 나타낸것과 같이 대기부유미립자는 0.002 μ m~100 μ m로 대부분의 측정 장비로는 2단계 범위(예를들면 0.1 μ m~20 μ m)의 입자만을 측정할 수 있기 때문에 이와같은 5단계 범위의 입자 크기를 측정하기 위해서는 범위가 다른 여러 종류의 측정 장비가 필요하다. 그림 2는 서로 다른 입자 크기 측정 범위를 갖는 여러종류의 측정기기를 보여주고 있다. 본 원고에서는 이러한 부유미립자를 포집할 수 있는 수동포집기기 및 자동 포집기기를 소개하고자 한다.

3. 수동 입자 포집기기

수동 입자 포집장치는 부유입자의 중량분석 및 화학분석을 위해서 대기 입자를 포집하기 위해서 쓰여진다.

입자포집은 보통 필터샘플러를 이용하여 시간 평균적으로 농축된 샘플 측정을 하게 된다. 분당 수리터의 상대적으로 소유량 샘플이 고정도 기술인 프로톤 유인 X-선 형광을 이용한 포집입자 분석등에 적합하며 시간당 수입방 미터나 수십입방미터의 대유량 샘플은 정도가 크게 민감하지 않은 중량계나 습·화학 분석 기법에 사용된다. 수동 포집에서는 포집된 입자들과 입자포집 지지면과 가스상 반응성 화학물질과의 반응(예를들면 글래스파이버 필터와 대기중의 SO₂)으로 생기는 물질과의 화학 작용의 가능성에 유의하여야 한다.²⁾

-필터샘플러와 크기선별 주입구-

가장 많이 쓰이고 있는 필터샘플러는 U. S. Environmental Protection Agency(EPA)에서 명명한 대용적 샘플러(high-volume sampler ; hi-vol)로 총부유입자(Total Suspended Particulates ; TSP)를 포집하기 위해 사용되고 있다.

이 샘플러는 분당 1.1~1.7m³의 대기를 20cm×25cm 글래스 파이버필터를 통해 끌어 들여서 작동한다. 필터는 보호내장되어

있어서 주변 기후로부터 보호되어 있다.

hi-vol은 초기에는 100μm 크기까지의 모든 입자를 포집할 수 있다고 생각되어졌으나 Stevens와 Dzubay³⁾ 등의 연구에 의해 기기 보호집의 주입구가 풍속과 풍향에 따라 25~50μm의 cut-off 범위를 갖는 것으로 나타났다. 측정기기의 정밀도를 높이고 사람의 호흡기 시스템에 침착하는 입자를 고려하기 위하여 Miller⁴⁾ 등은 15μm의 최대 크기 cut-off 특성을 갖는 흡인가능 입자(Inhalable Particle ; IP)의 표준을 제안하였

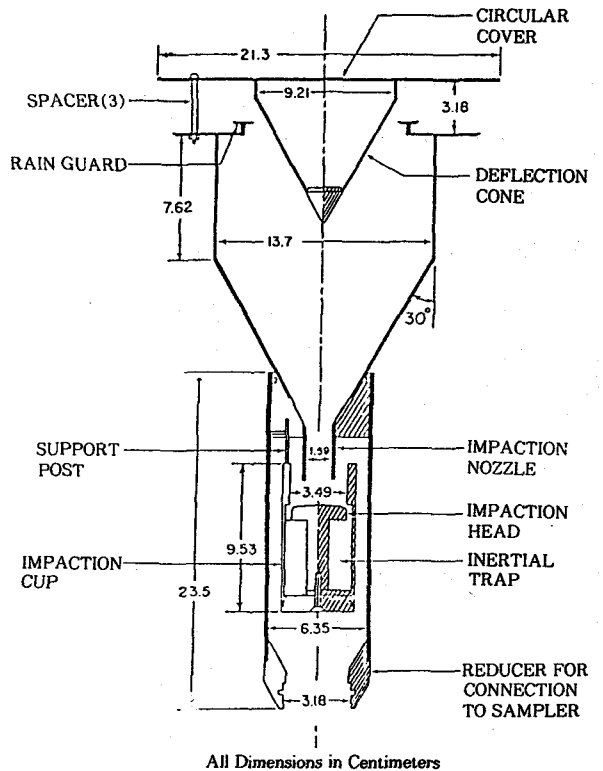


그림 3. 호흡성 입자 샘플링을 위한 PM-10 Inlet (Liu-Pui Design)

고 최근에는 U.S.E.P.A. 에 의해서 PM-10 (Particulate Matter, 10 μ m cut)의 표준을 허파의 흉부영역까지 도달 가능한 입자들의 측정치로서 제안하였다. 이와 같은 PM-10 주입구에 의한 흉부입자(thoracic particles ; TP) 샘플링에 기초하여 개정된 부유입자 정도에 관한 표준이 공표될 예정이다.

그림 3은 Liu와 Pui⁵⁾에 의해 개발된 PM-10 주입구의 개략도인데 입구는 시간당 1m의 유량을 갖는 2분접 샘플러로서 고효율 입구와 10 μ m 이상의 큰 입자를 제거하기 위한 관성 충돌기(inertial impactor)로 구성되어 있다. 다른 입자크기 선별 입구 설계로는 McFarland⁶⁾ 등이 10 μ m 이상의 입자를 제거하기 위한 여러개의 노즐을 이용한 충돌기가 있고 Weddng과 Weigand⁷⁾ 등이 설계한 사이클론 분리기 등이 있다. 작업장 환경과 산업위생 연구에 있어서의 에어로졸 측정을 위한 호흡성 입자들의 연구는 비교적 잘 정립되어 있으며 Journal of Aerosol Medicine라는 전문 학술지도 나오고 있다.

여기서 호흡성 입자란 사람 허파의 허파파리 부분까지 침투할 수 있는 대기부유 입자를 말한다. 이러한 호흡성 입자 샘플링을 위한 2가지 표준이 있는데 하나는 British Medical Research Council(BMRC)이며, 다른 하나는 American Conference of Governmental Industrial Hygienist(ACGIH)에서

제정한 호흡성 침투곡선 들이다. BMRC와 ACGIH 표준에서 50% cut-off 크기는 각각 5.0 μ m와 3.5 μ m이다.

BMRC 표준을 성취하기 위해서는 수평식 세정기(horizontal elutriator)가 사용되었고 ACGIH 표준을 만들기 위해서는 사이클론 분리기(cyclone separator)가 사용되었다. 최근에 Marple⁸⁾ 등은 ACGIH 호흡성 곡선을 모사할 수 있는 다노즐 일단 충돌기의 사용을 제안하였다. 사이클론 분리기에 비해서 충돌기는 충돌기 침투곡선을 이론적으로 예측 가능하고 또한 제작이 간편하고 간결하며 샘플링 유량의 변화에 대해 사이클론보다 쉽게 맞출 수 있는 장점이 있다.

-이분법 샘플러(Dichotomous Sampler)-

대기입자 연구를 위해서는 부유입자를 크기에 따라 두 그룹으로 분리하는 것이 바람직한데 그림 1과 같이 크기가 2.5 μ m 이상의 큰 입자들과 2.5 μ m 이하의 미세입자로 구별할 수 있다. 이러한 입자 범위에서는 그 입자들의 물리적, 화학적 물성치가 다를 뿐 아니라 그 입자들의 생성 방식과 제거 방식도 서로 아주 상이하다. 미세입자는 알카리성인 큰 입자들과 달리 주로 산성을 갖게 되므로 필터에서의 분리로 입자와 입자간 작용이 최소화 된다.

이분법 샘플러는 부유입자를 앞서 언급한 것과 같이 큰 입자군과 작은 입자군의 두

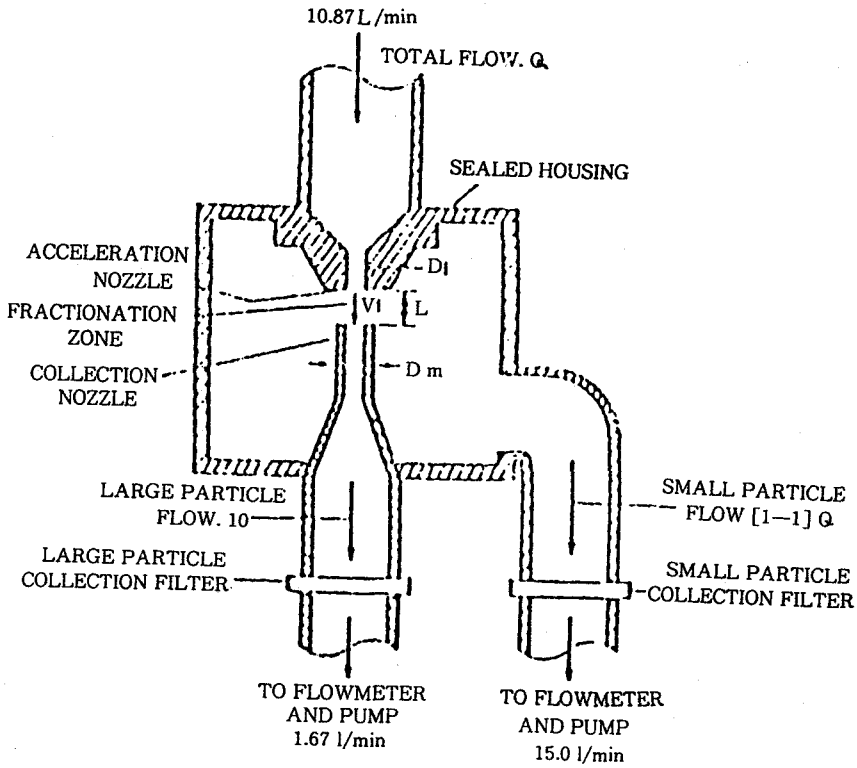


그림 4. 이분법 샘플러의 구조 개략도(Dichotomus Sampler)

영역으로 분리하는데 주로 사용한다.

PM-10 주입구를 장착하면 이 샘플러는 0~2.5 μm 의 미세입자군과 2.5~10 μm 의 큰 입자군으로 분리해서 포집이 가능하다. 그림 4는 Loo⁹⁾ 등이 설계한 이분법 샘플러의 개략도를 나타낸다. 입자분리는 노즐을 통해서 입자가 실려진 공기 흐름이 가속되고 가속된 흐름이 빈 공간을 통과하여 큰 입자는 관성에 의해서 리시빙튜브에서 포집되고 작은 입자는 주유동을 따라 분리되지 않은 상태로 빠져나가는 가상충돌기에서 이루어진다. 이때 전체 유량의 약 10% 정도

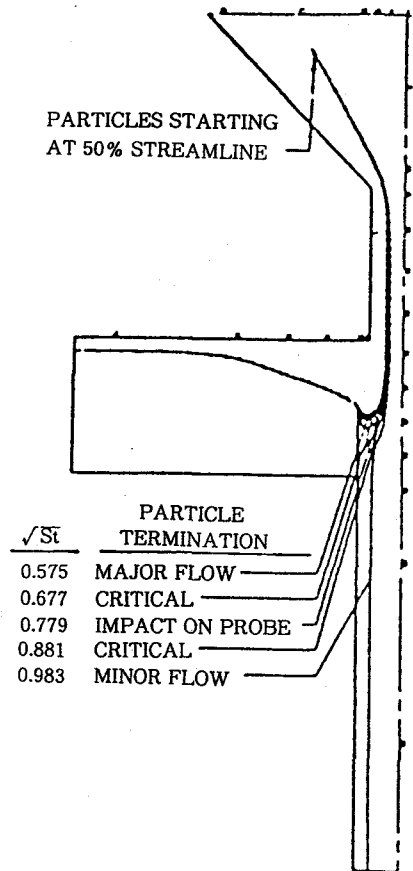
(minor flow)가 리시빙 튜브를 통과하게 되어 큰 입자가 실려나가는 유동이 되고 나머지 90%의 유량(major flow)은 가상충돌기에서 분리되지 않은 작은 입자들을 포함하게 된다. 이 두 유동은 각각 여과되어 큰 입자군과 미세입자군으로 분리된다. 이러한 가상 충돌기에서는 큰 입자가 분리되는 소 유량(minor-flow)에 미세입자가 섞이게 되는 오염이 불가피하게 되며 따라서 정확한 입자 분리는 기대할 수 없다. Marple과 Chien¹⁰⁾ 등은 가상충돌기의 이론적 해석을 위하여 가상충돌기에서의 입자 궤적과 포집

특성을 결정하기 위한 Navier-Stokes 유동장 방정식과 입자 운동 방정식을 풀었으며 그림 5에 가속 노즐이 일정점에서 시작하여 5가지 다른 크기의 입자들의 궤적계산 결과를 나타내었다. 그들은 가상충돌기의 설계를 위해서 주유동과 소유동의 유량비, 노즐 레이놀즈수, 노즐과 포집 튜브간의 거리 등의 여러가지 변수에 대한 체계적인 연구를 하여 가상 충돌기의 성능을 분석하였다.

가상충돌기에 대한 실험적 연구는 Chen¹¹⁾ 등에 의해 포괄적으로 수행되었으며 최근에는 소유량으로 분리되어 흘러가는 큰 입자군이 미세입자로 오염되는 것을 방지하기 위하여 본래의 가상충돌기에 보호공기를 분사하는 방식이 개발되었다.¹²⁾

큰 입자군과 미세입자군은 주로 높은 입자포집 효율을 갖는 테프론 막필터(Teflon membrane filters)에 의해 걸러진다. 막필터는 입자들을 필터 내부 공간에서 포집하는 섬유필터(fibrous filter)와는 반대로 필터 표면에서 입자포집이 이루어진다. 이러한 테프론 막필터는 포집된 입자 샘플들의 분석을 위해 쓰이는 X-선 형광법과 같은 정밀한 화학분석을 가능하게 한다.

—계단식 충돌기(Cascade Impactors)—
고체표면에 고속 제트를 향하게 하는 노즐로 구성된 일단 충돌기는 어느 특정한 분



(a) FIVE PARTICLES OF DIFFERENT SIZES STARTING AT THE SAME POINT

그림 5. 가상충돌기(Virtual Impactor)의 Computer Simulation에 의한 계산입자 궤적(4가지크기의 입자들)

리크기(cut-size) 이상의 입자를 표면에 충돌하게 하여 부유하는 대기 유동속에서 제거하는 역할을 한다.

이러한 충돌기 단을 여러개 연결하면 각 단에서 차례로 작은 노즐과 고속의 제트속도를 갖게하여 다분산 에어로졸을 일정한 크기 범위를 갖는 여러 단계의 입자군으로 분리할 수 있다. 이와같이 분리 포집된 입

자 질량은 중량 측정법에 의해 에어로졸의 질량 크기분포가 결정된다.

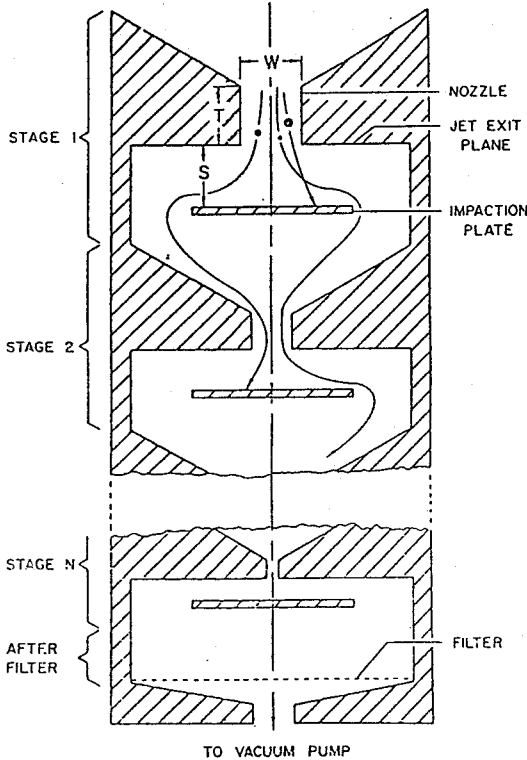


그림 6. 다단 계단식 충돌기(Multi-stage Cascade Impactor)의 구조도

그림 6은 계단식 충돌기의 작동원리를 나타내는 개략도로 전형적인 계단식 충돌기는 6단에서 8단의 충돌기 단을 가지고 마지막 단은 필터단으로 구성된다. 충돌 표면은 보통 충돌된 입자가 튀어나가는 것을 방지하기 위하여 접착력이 있는 층으로 코팅한다. 표준 hi-vol 샘플러에 부착할 수 있는 것을 포함한 다양한 상업적 제품이 나와있다. 이러한 충돌기에서는 입자가 충돌 후

튀어나가 재유입되는 것, 각 단간의 벽에 부착 손실, 그리고 최종단에서의 필터 포집 특성 변화등이 문제점으로 제기되고 있다. 재래식 충돌기에서의 분리크기는 노즐 직경과 충돌기 통과후의 허용 압력차에 의해 제한을 받게 되는데 최소 분리크기 한계는 $0.3\mu\text{m}$ 정도의 크기이다. 이 분리크기는 낮은 압력에서 충돌기를 작동하게 되면 낮아질 수 있다. Hering¹³⁾ 등은 $0.05\mu\text{m}$ 정도의 입자까지 포집할 수 있는 저압 충돌기를 개발하였다. 초음속 가스제트 속에서의 무거운 입자를 관성 충돌을 이용하여 포집하기도 하며 이러한 고속 충돌기에서는 입자가 충돌 표면에서 튀겨나가는 문제가 심각하게 된다. 또한 쉽게 휘발할 수 있는 입자들은 저압 충돌기의 저압조건에서 증발될 수도 있다.

작은 입자를 포집하기 위하여 Marple¹⁴⁾ 등은 노즐대신에 $50\mu\text{m}$ 정도의 직경을 갖는 마이크로 오리피스를 평판에 균일하게 분포시켜 충돌기 분리크기를 저압 조건이나 과도한 고속 제트 속도를 하지 않고도 $0.05\mu\text{m}$ 까지 확장하였다.

그림 7은 다단식 마이크로 오리피스 충돌기의 각 단에서의 분리 크기 성능을 나타내는 도표이다. 포집 표면에 균일한 입자 침착을 위해서 마이크로 오리피스를 나선형 구조로 분포시키고 오리피스 판을 포집판에 대해서 일정 속도로 회전시킨다. 특별히 X

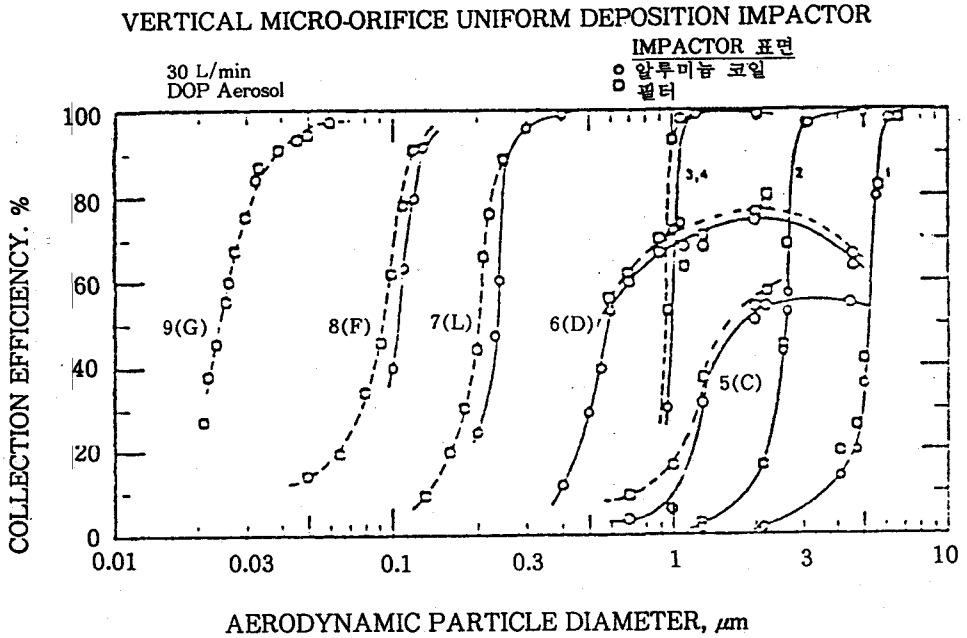


그림 7. 다단식 마이크로 오리피스 충돌기(Micro-Orifice Impactor)의 입자분리 성능곡선

—선 형광법 등으로 화학분석을 할때는 균 일한 입자 침착이 중요하게 된다.

—사이클론 분리기(Cyclone Separator) —
입자 분출원 측정을 할때는 고질량 포집 조건이 되며 이때에는 그림 8과 같은 계단 식 사이클론 분리기가 주로 사용된다. 사이 클론은 공기를 원통 몸체의 접선방향으로 끌어들이 공기에 포함된 입자들이 원심력에 의해서 원통내 면으로 분리되어지게 작동한 다. 이러한 사이클론 포집방식은 충돌방식 에서 문제가 되었던 충돌에 의한 입자의 튕 김을 방지할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이러한 포집방식은 고질량 입자 농도를 갖

는 에어로졸 유동에서의 입자 샘플링에 적 합하다.

그러나 이론에 의해서 포집성능이 예측될 수 있는 충돌식 포집기와는 달리 사이클론 설계를 위해서는 시행착오를 기초로 한 시 험이 수반되어야 한다.

충돌기와 사이클론 입자분리 방식이외에 여러 다른 관성 입자 분리가 개발되고 있 으며 정전기(electrostatic)를 이용하거나 열 적 침적(thermal precipitation) 현상을 이용 한 입자 포집 방식이 제안되고 있다. Fuchs¹⁵⁾의 논문에서 이러한 방식에 의한 포집 방식 이 소개되고 있다. 표 1은 대기 에어로졸 샘플링에 사용되는 기본적인 수동식 샘플링

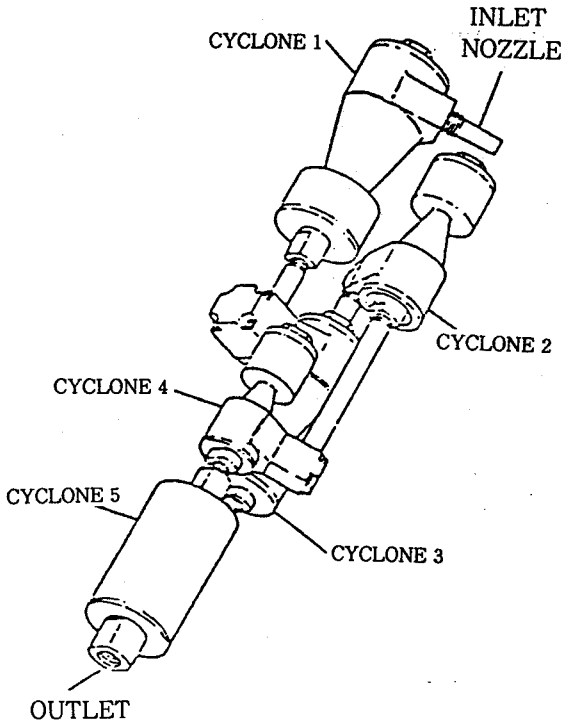


그림 8. 5단 계단식 사이클론 분리기 (Cascade Cyclone Separator)의 구조도

장치를 열거하고 있다.

4. 자동 입자 포집기기

실시간 측정이 가능한 자동측정장치의 개발은 레이저 광원, 고감도 광전 감지기나 전위차 감지기, 작동앰프, 동력공급 장치의 소형화 및 마이크로 프로세서 등의 전자부품의 발전으로 가능하게 되었다. 실시간 에어로졸 측정용 자동 계측기는 0.002~50 μ m 정도 범위의 입자크기를 가지며 이러한 장치는 신속한 시간 반응으로 급속히 변화하

는 입자크기 및 농도를 추적할 수 있다. 따라서 짧은 시간 동안 반복적인 측정이 가능하기 때문에 좋은 계수 통계치를 가질 수 있다. 그러나 자동측정장치는 간접적인 감지 기술을 주로 사용하게 되므로 더욱 입자크기나 농도에 비례하는 간접 물리량에 대한 주기적인 교정(calibration)이 필요하게 된다.

-총합 농도 측정(Integral Concentration Measurement)-

총합 농도 감지기는 모든 크기 분포에 걸친 에어로졸의 총합 변수, 즉 총갯수농도나 총질량 농도 또는 총광산란이나 총광흡수계수 등과 같은 것들을 측정하는데 사용되는 것을 말한다. 가장 많이 사용되는 것중에 몇 가지를 소개하면 개수 농도 결정을 위한 응축핵계수기, 질량 농도 측정을 위한 베타게이지(beta-gage)나 수정결정(quartz-crystal)을 이용한 미세질량기(microbalance) 등이 있고 이외에도 광산란이나 접촉 또는 확산대전을 이용한 기기등이 있다.

1) 응축핵 계수기(Condensation Nucleus Counter)

응축핵 계수기(이후 CNC라 칭함)는 입자크기가 0.002~1.0 μ m 범위의 개수 농도를 측정하는데 폭넓게 이용되는 기기이다. 이 기기는 입자가 포함된 공기를 습증기 포

표 1. 대기 에어로졸 샘플링을 위한 주요 수동 포집기기

포 집 기 기	유량 m ³ /hr	크기범위 μm	크기분류 단계
Hi-Vol Sampler	66-102	0-50	none
Hi-Vol with PM-10	66-102	0-10	1
Dichotomous Sampler with PM-10	1.0	0-10	2
Respirable Dust Sampler	0.1-26	0-5	1
Cascade Impactor	0.1-68	0.3-20	2-9
Microorifice Impactor	1.8	0.03-5	2-9
Cascade Cyclone	0.3-2	0.3-15	2-6
Centrifugal Sampler	0.2- \ll 0.6	0.1-5	2-9
Rotary Impactor	-	1-100	4
Electrostatic Sampler	0.2-70.6	0.01-10	none
Thermal Sampler	0.05	0.01-5	none
Inertial Spectrometer	0.03-0.1	0.5-8	continuous

화상태로 유지하고 그것을 단열 팽창시키거나 직접 접촉 냉각을 시켜 과포화 상태로 만들어서 입자표면에 증기응축을 야기하여 그 입자가 광산란 방식으로 광학적 측정이 가능한 크기로 성장시킨다. 최근에는 연속 유동 직접 접촉식 CNC⁽⁶⁾와 고온 증기 유동과 찬 에어로졸 유동을 혼합하여 과포화 상태를 만드는 방식⁽⁷⁾ 등의 개발이 이루어졌다.

연속 유동 방식으로 상업화된 CNC⁽⁸⁾의 개략도는 그림 9와 같다. 이 기기에서는 부틸 알코올(butyl alcohol)이 작동 유체로 쓰

이고 공기는 이 알코올 증기로 35°C에서 포화된다. 이어서 이 알코올 증기로 포화된 공기가 10°C로 유지되는 열전소자 방식으로 냉각된 응축관내에서 입자표면에 증기 응축을 위한 요구 과포화 상태를 만든다. 응축관을 통과하는 입자들은 응축에 의해서 12 μm 정도의 크기로 성장하여 나오게 되고 이 입자들은 광산란에 의한 광학적인 방법으로 개수가 계수된다. 낮은 입자농도에서는 각각의 입자들이 계수되고 입자 농도가 1000개/cm³가 넘게되면 입자군의 총 광산란량이 광도계 모드(photometric mode)로

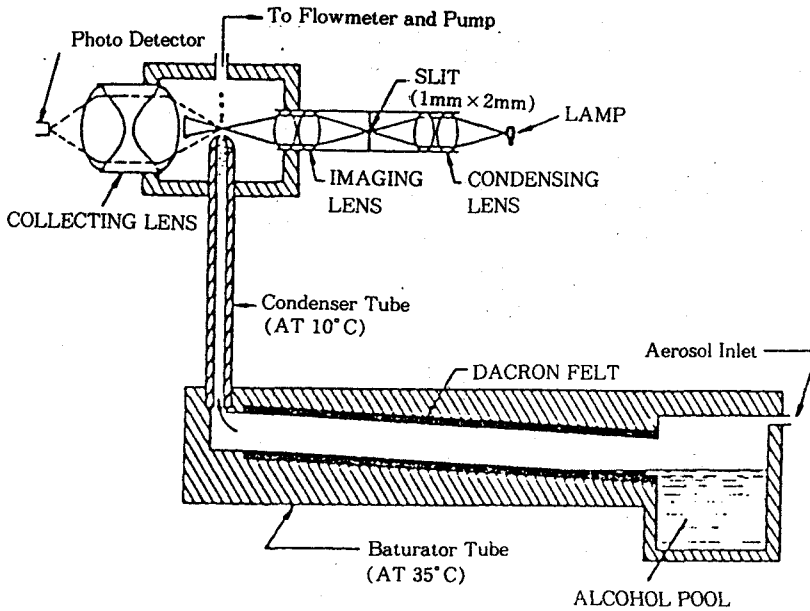


그림 9. 연속유동 응축핵 계수기(Condensation Nucleus Counter)의 구조도

총입자 농도가 측정된다. 이 CNC의 농도범위는 입방센티미터당 0.01 입자수에 10^6 입자수의 범위를 갖는다.

$0.05\mu\text{m}$ 크기보다 작은 입자에 대한 미세한 CNC 교정을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이러한 분리 크기 근처에서는 기기의 반응이 입자크기에 따라 크게 저하된다.¹⁹⁾ 이러한 계수효율의 감소는 기기내부의 유동 통로에서 입자 확산에 의해 일어나는 입자손실이나 응축관에서 균일하지 않은 증기 농도 분포에 따른 100% 활성화가 떨어지는 것 등에 기인하는 것으로 여겨진다.¹²⁾ CNC에서의 에어로졸 유동 주위에 청정 보호 공기를 흘려보내서 $0.003\mu\text{m}$ 에서 계수 효율을 70% 정도로 증가시키는 연구

가 Stolzenberg와 McMurry²¹⁾ 등에 의해서 제안되었다.

2) 수정결정 미세질량기(Quartz-Crystal Balance)와 진동 질량 센서(Vibrating Mass Sensors)

거의 실시간 질량 농도를 측정할 수 있는 여러가지의 센서가 최근에 개발되었다. 입자들이 수정결정 위에 침착되면 수정의 고유 진동수가 변화하는 원리를 이용한 침착 입자 질량 측정 방법이 있다. 입자 침착은 정전식 집진²²⁾이나 관성충돌²³⁾에 의해서 이루어진다. 수정결정 미세질량기의 감도는 약 5×10^{-9} 으로 이것은 10MHz AT-cut 수정결정의 진동수가 1Hz 이동되는 것에 해당된다. 그림 10은 호흡성 에어로졸 검출

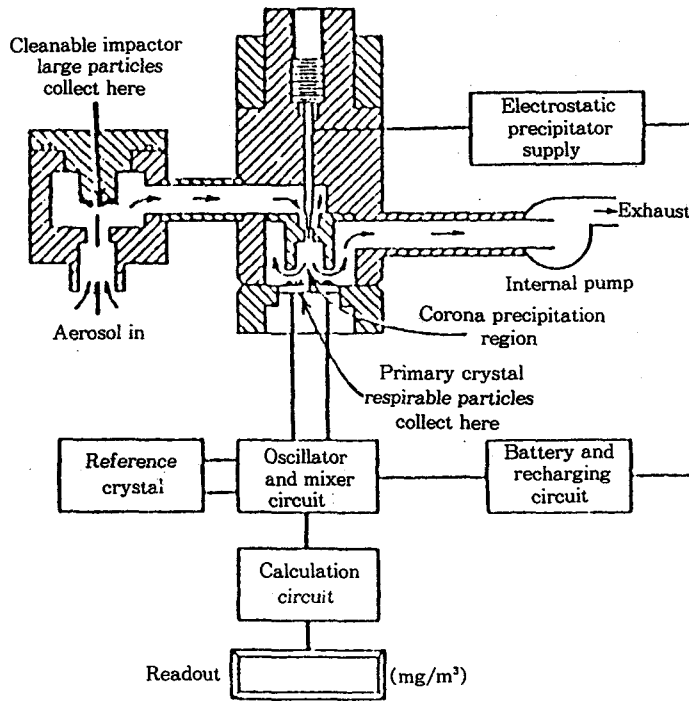


그림 10. 호흡성 입자 포집용 압전식 미세질량기(Piezoelectric Microbalance)의 구조도

을 위한 배터리로 구동되는 압전 미세진동기(piezoelectric microbalance)의 개략도를 보여주고 있다. 이 기기는 비호흡성 입자를 유동 입구에서 제거하여 호흡성 입자만이 정전식 집진 방식으로 측정용 수정결정 위에 침착하게 하는 호흡성 입자 충돌기를 도입하고 있다.²⁴⁾ 따라서 거의 실시간에 가깝게 입자 포집과 질량 측정이 동시에 이루어질 수 있다. 이 기기의 측정 가능한 입자 질량농도는 약 $0.05 \sim 5.5 \text{ mg/m}^3$ 의 범위를 갖는다. 최근에 개발된 진동질량 센서 기술로는 필터포집기와 연계된 경사진 요소의 저진동수질량을 이용한 것이 있다.²⁵⁾

이러한 설계는 질량농도의 측정 범위를 g/m^3 까지 확장할 수 있는 기술이다. 또한 가압 유동화층 연소기(pressurized fluidized bed combustor)에서의 고온 및 고압 가스 유동중의 입자 측정을 위한 기술이 Wang²⁶⁾에 의해 제안되었다.

3) 베타 감쇄 질량센서(Beta-Attenuation Mass Sensor)

이 기기는 표면에 포집된 입자 질량을 통과하는 베타선의 감쇄 현상을 기초로 하여 광산이나 대기 연구에 있어서 호흡성 입자 측정을 위해 개발되었다.²⁷⁾ 입자는 충돌이나 여과방식으로 포집된다. 그림 11은 이러

한 베타선 감쇄 원리를 이용한 2단 연속 대기 입자 질량 센서를 보여주고 있다.²⁸⁾

이 기기는 ¹⁴C를 베타소스로 사용하고 감쇄된 베타선을 측정하기 위해서는 고체상태의 실리콘 검출기를 사용한다. 입자들은 충돌과 회전 테이프를 이용한 여과에 의해서 두가지 크기 영역으로 분리된다.

연되기 때문에 중요하다. 총 광산란 계수의 측정은 광도계(photometer)나 비탁계(nephelometer)를 주로 사용한다. 같은 크기 분포를 가지고 단지 농도만 다른 에어로졸에 대해서는 총합 광산란 측정은 질량 농도로 전환될 수가 있다. 총 광산란과 대기 질량 농도의 관련식의 예가 Waggoner와 Charlson²⁹⁾에 의해 발표되었다.

또한 에어로졸 농도는 입자들에 전하를 분급하고 잔류전하를 전위계로 측정하여 결정할 수 있다. Liu와 Pui³⁰⁾는 에어로졸 농도측정을 위한 입자 하전량을 재기 위하여 단극 확산 대전(unipolar diffusion charging)과 전위계 검출 방식을 사용하였다. John³¹⁾은 같은 목적으로 접촉대전 또는 충돌대전을 이용하였다. 일반적으로 이러한 기술은 입자의 하전 특성이 일정하고 측정하고자 하는 에어로졸의 크기 분포의 모양이 비슷한 경우에만 정확한 질량농도 측정이 가능하다.

표 2에는 주요 총합 질량 측정기들과 그 특성이 요약되어 있다.

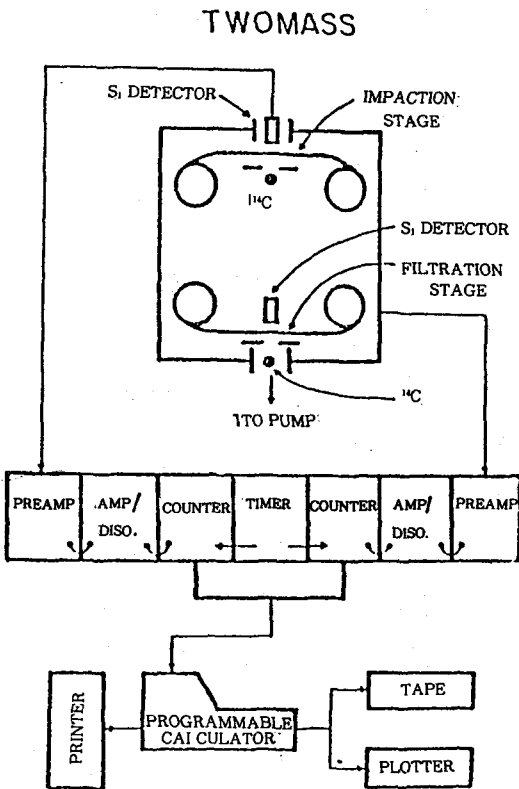


그림 11. 베타 감쇄(Beta Attenuation) 원리를 이용한 2단 연속 대기 질량 측정기의 구조도

4) 그밖의 질량 센서 기술

대기 연구를 위해서 대기부유입자들의 총 광산란계수는 대기 가시도와 시계범위가 관

5. 결론

최근 몇년간 에어로졸 연구에 있어 새로운 측정기기의 개발에 상당한 발전이 있어왔다. 이러한 기기의 개발을 위해서는 새로운 에어로졸의 발생, 측정, 샘플링 및 분석

표 2. 대기 에어로졸 샘플링을 위한 주요 자동 총합농도 측정기기

측정기기	유량 1/min	크기 범위 μm	최저 농도 한계
1. 개수 농도 측정			
Condensation Nucleus Counter, single Particle	0.3-1.4	0.005-0.5	0.01cm
Condensation Nuclei Counter, Photometric	3-10	0.005-0.5	10cm
Optical Particle Counter White Light and Laser	0.1-28	0.1-20	0.001cm
Cloud Condensation Nuclei Counter	1-5	0.08-1	1cm
Ice Nuclei Counter	10	-	0.01cm
2. 질량 농도 측정			
Quartz-Crystal Microbalance	1-5	0.01-20 electrostatic 0.01-20 filtration	10 μgm
Vibrating Sensor	1-5	0.01-20 filtration	10 μgm
Beta-Attenuation Sensor	1-12	0.01-20 filtration 0.3-20 impactor	10 μgm
Photometer, Nephelometer, etc.	1-100	0.1-2	10 μgm
Electrical Aerosol Detector	0.5-20	0.01-2	5cm at 1 μm 500cm at 0.01 μm

기기 등이 상호 보완적으로 개발되고 확립되어야 한다. 외국에서는 이러한 분야의 발전으로 10여년 전만해도 거의 측정이 불가능하였던 문제들도 지금도 상당한 실험의 정확도를 갖고 일상적으로 측정할 수 있는 단계에 와 있다. 우리나라에서는 이렇게 개

발된 입자 관련 측정 기기의 보급 상태도 상당히 제한적이고 더욱이 확보된 기기 조차도 정확한 사용기술 및 결과 분석 기술은 초보적인 단계에 있다고 하겠다.

현대 산업이 더욱 고도화되고 다양화됨에 따라 입자 관련 기술의 응용분야는 환경,

제조, 의학, 식품 등으로 확산되고 이러한 부유미립자 즉 에어로졸 측정 기술의 발전은 조속한 시일내에 필연적으로 확립되어야 할 것이다.

— 참고 문헌 —

1. Liu, B.Y.H., Pui, D.Y.H. and Fissan, H., eds., *Aerosols : Science, Technology, and Industrial Applications of Airborne Particles*. Elsevier Sci. Publ. Co., New York, 1984.
2. Appel, B.R., Wall, S.M., Tokiwa, Y. and Haik, M., *Atmos. Environ.* 13, 319 (1979).
3. Dzubay, T.G. and Stevens, R.K., *Environ. Sci. Technol.* 9, 663(1975).
4. Miller, F.J., Gardner, D.E., Grahm, J.A., Lee, R.E. Jr., Wilson, W.E., Bachmann, J.d., *J. Air Pollut. Control Assoc.* 29, 610(1979).
5. Liu, B.Y.H. and Pui, D.Y.H., *Aerosols : 2nd U.S.-Dutch International Symposium*(Lee, S.D., Schneider, T., Grant, L.D. and Verkerk, P.J., eds.), p.637, Lewis Publ., Michigan, 1986.
6. McFarland, A.R., Ortiz, C.A. and Bertch, R.W. Jr., *J. Air Pollut. Control Assoc.* 34 544(1984).
7. Wedding, J.B. and Weigand, M.A., *Atmos. Environ.* 19, 535(1985).
8. Marple, V.A., *J. Aerosol Sci.* 9, 125 (1978).
9. Loo, B.W., Adachi, R.S., Cork, C.P., Goulding, F.S., Jaklevic, J.M., Landis, D. A. and Searles, W.L., Report LBL-8725, Lawrence Berkeley Laboratory, California, 1979.
10. Marple, V.A. and Chien, C.M., *Environ. Sci. Technol.* 14, 976(1980).
11. Chen, B.T., Yeh, H.C. and Cheng, Y.S., *J. Aerosol Sci.* 16, 343(1985).
12. Chen, B.T., Yeh, H.C. and Cheng, Y.S., *Aerosol Sci. Technol.* 1 5, in press (1986).
13. Hering, S.V., Flagan, R.C., Friedlander, S.K., *Environ. Sci. Technol.* 12, 667 (1978).
14. Marple, A.A., Liu, B.Y.H. and Kuhlmeiy, G.A., *J. Aerosol Sci.* 12, 333(1981).
15. Fuchs, N.A., *Aerosol Sci. Technol.* 5, 123(1986).
16. Sinclair, D. and Yue, P.C., *Aerosol Sci. Technol.* 1, 217(1982).
17. Kousaka, Y., Niida, T., Okyuama, K., and Tanaka, H., *J. Aerosol Sci.* 13, 231

- (1982).
18. Agarwal, J.K. and Sem, G.J., *J. Aerosol Sci.* 11, 343(1980).
19. Sinclair, D., *Atmos. Environ.* 16, 955 (1982).
20. Engilmez, N. and Davies, C.N., *J. Aerosol Sci.* 15, 177(1984).
21. Stolzenburg, M.R. and McMurry, P.H., *Aerosols*(Liu, B.Y.H., Pui, D.Y.H. and Fissan, H., Eds.), p.59, Elsevier Sci. Publ., New York, 1984.
22. Lundgren, D.A., Carter, L.D. and Daley, P.S., *Fine Particles*(ed. B.Y.H. Liu), p. 485, Academic Press, New York, 1976.
23. Chuan, R.L., *Fine Particles*(ed. B.Y.H. Liu), p.764, Academic Press, New York, 1976.
24. Sem, G.J., Tsurubayashi, K. and Homma, K., *J. Am. Ind. Hyg. Assoc.* 38, 580(1977).
25. Patashnick, H. and Rupprecht, G., *Proceedings : Advances in Particle Sampling and Measurement*(ed. W.B. Smith), p.264, EPA-600/9-80-004, U.S. Environmental Protection Agency, 1980.
26. Wang, J.C.F., *Aerosol Sci. Technol.* 4, 301(1985).
27. Jaklevic, J.M., Gatti, R.C., Goulding, F. S. and Loo, B.W., *Environ. Sci. Technol.* 15, 680(1981).
28. Macias, E.S. and Husar, R.B., *Environ. Sci. Technol.* 60, 904(1976).
29. Waggoner, A.P. and Charlson, R.J., *Fine Particles*(ed. B.Y.H. Liu), p.511, Academic Press, New York, 1976.
30. Liu, B.Y.H. and Pui, D.Y.H., *J. Aerosol Sci.* 6, 249(1975).
31. John, W., *Fine Particles*(ed. B.Y.H. Liu), p.649, Academic Press, New York, 1976.