

실내 및 대기 에어로졸의 측정 기술

배 귀 남
한국과학기술연구원지구환경연구센터
선 임 연 구 원

1. 머리말

에어로졸은 공기 중에 부유하는 0.002~100 μm 크기의 고체 또는 액체 입자를 말하며, 우리 주위에 분진, 미스트, 흙, 스모그 등 다양한 형태로 존재한다. 에어로졸은 에너지, 재료, 환경, 보건 등 다양한 분야에 관련되어 산업 및 인체의 건강에 지대한 영향을 미치고 있으며, 그 중요성이 점차 부각되고 있다. 에어로졸은 핵형성, 응축, 응집, 파열, 연소 등 다양한 메커니즘에 의해 생성되고, 브라운 운동, 대류확산, 외력(중력, 온도구배, 전기장 등)에 의해 이동하여 표면에 침착하게 된다. 이러한 현상들은 에어로졸의 크기, 농도, 화학적 조성과 같은 특성에 좌우되므로, 에어로졸의 특성을 규명할 수 있는 측정 및 분석 기술이 매우 중요하다.

에어로졸은 형상이 다양하므로 여러 가지 방법으로 크기를 정의하며, 다루어지고 있는 에어로졸의 크기가 광범위하고 에어로졸의 광산란 현상, 전기적 이동도, 공기역학적 이동도 등이 입경에 따라 다르다. 그러므로, 입경에 따라

측정원리가 다른 다양한 방법으로 에어로졸의 크기를 측정하고 있다.

1970년대 이후로 다양한 에어로졸 측정기가 개발됨에 따라 대기 에어로졸에 대한 보다 상세한 정보를 얻을 수 있게 되었다. 그림 1은 3가지 측정기로 측정하여 얻은 대기 에어로졸의 입경분포를 나타낸 것이다. 이것으로부터 대기 에어로졸이 크게 3가지 모드(nuclei mode : 0.1 μm 이하, accumulation mode : 0.1~1 μm , coarse mode : 1 μm 이상)의 에어로졸로 구성되어 있음을 알 수 있게 되었다.

대도시 스모그, 인체의 기관지내 입자 침착, 대기오염물질의 장거리 이동, 황사, 지구환경 변화 등의 문제를 정확히 규명하기 위해서는 대기 및 실내 에어로졸의 입경분포나 수농도와 같은 에어로졸에 대한 보다 상세한 정보가 필요하다. 따라서, 질량농도에서 수농도로, 총농도에서 입경별 농도로, 조대 입자(coarse particles)에서 미세 입자(fine particles)로, 농도에서 화학적 조성, 형상으로 에어로졸의 측정 추세가 바뀌고 있다.

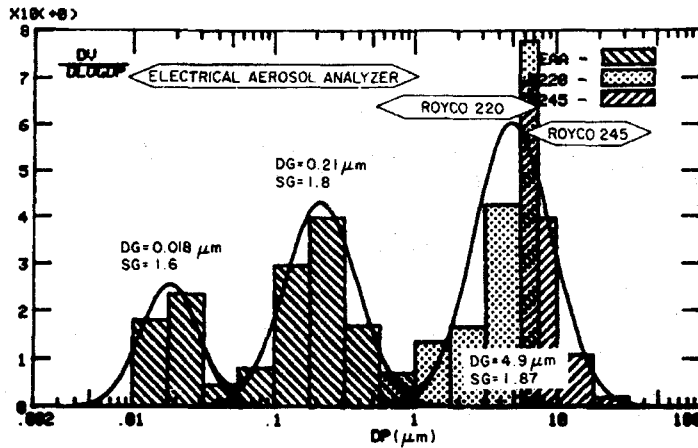


그림 1 대기 에어로졸의 입경분포

대부분의 에어로졸 측정기는 대기환경 연구를 통하여 개발되었으므로, 외국에서는 대기 에어로졸에 대한 다양한 정보를 신속히 확보하고 있다. 국내의 경우 반도체 제조공정의 오염 제어 등 매우 한정된 분야에는 최신 에어로졸 측정기술이 활용되고 있지만, 대기환경 및 실내환경 분야에는 지금까지 거의 활용되지 못하고 있는 실정이다. 즉, 주로 총부유입자(total suspended particulates, TSP)와 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)이 $10 \mu\text{m}$ 또는 $2.5 \mu\text{m}$ 이하인 부유입자(particulate matter, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$)를 측정하여 대기오염도를 평가하여 왔다. 최근 들어 국내에서도 다단 임팩터(cascade impactor)나 광학 입자계수기(optical particle counter, OPC)를 사용하여 대기 및 실내 에어로졸의 입경분포를 측정하는 연구가 수행되고 있으므로, 향후 국내 에어로졸 연구자들이 더욱 다양한 에어로졸 측정기술을 대기 및 실내 에어로졸의 연구에 활용할 것으로 예상된다.

따라서, 본 고에서는 다양한 실내 및 대기 에어로졸의 측정방법과 대표적인 에어로졸 측정기의 원리 및 특성을 소개하고자 한다.

2. 에어로졸 오염의 규제 기준

일정 지역의 대기오염 상태를 파악하기 위해서는 대기오염물질의 농도를 장기적이고 연속적으로 측정할 필요가 있다. 이러한 목적으로 일정 지역 내에 과학적이고 계획적으로 몇 개의 측정소를 선정하여 자동측정기를 설치한 후 연속적이고 종합적으로 대기오염도를 측정하는 네트워크를 대기오염 측정망이라 부른다. 1998년 12월 기준으로 환경부에서 관리하는 대기오염 측정소는 101개소, 지방자치단체에서 관리하는 측정소는 41개소이다.

에어로졸(TSP, PM_{10})은 SO_2 , O_3 , NO_2 , CO 등과 함께 기준성 대기오염물질로 지정되어 대기오염 측정망에서 자동측정기로 24시간 연속하여 측정되고 있다. 에어로졸의 경우 1971년 공해방지법 제정 이후 TSP가 측정되고 있으며,

1994년 대기환경기준이 개정되면서 1995년부터 PM₁₀이 추가로 측정되고 있다. 표 1은 국내 대기환경기준의 변천을 나타낸 것이다.

국내 실내 공기질 관리에 대한 변천을 살펴 보면, 1986년 5월 보건복지부(공중위생법)에서 공중이용시설에 대한 실내 공기질의 위생적 관

표 1. 국내 대기환경기준의 변천

대기오염물질	대 기 환 경 기 준			측 정 방 법	비 고
	1983년	1990년	1994년		
아황산가스 (SO ₂ , ppm)	연평균 0.05 24시간 평균 0.15	연평균 0.05 24시간 평균 0.15	연평균 0.03 24시간 평균 0.14 1시간 평균 0.25	자외선 형광법	
일산화탄소 (CO, ppm)	1개월 평균 8 8시간 평균 20	1개월 평균 8 8시간 평균 20	8시간 평균 9 1시간 평균 25	비분산 적외선 분석법	
이산화질소 (NO ₂ , ppm)	연평균 0.05 24시간 평균 0.15	연평균 0.05 24시간 평균 0.15	연평균 0.05 24시간 평균 0.08 1시간 평균 0.15	화학발광법	
먼지 (μg/m ³)	TSP 연평균 150 24시간 평균 300	연평균 150 24시간 평균 300	연평균 150 24시간 평균 300	대용량 공기포집법	
	PM ₁₀	-	연평균 80 24시간 평균 150	베타선 흡수법	1995년 시행
오존 (O ₃ , ppm)	연평균 0.02 1시간 평균 0.1	연평균 0.02 1시간 평균 0.1	8시간 평균 0.06 1시간 평균 0.1	자외선 광도법	
탄화수소 (HC, ppm)	연평균 3 1시간 평균 10	연평균 3 1시간 평균 10	-	-	1994년 삭제
납 (Pb, μg/m ³)	-	3개월 평균 1.5	3개월 평균 1.5	원자흡광 광도법	

리를 위하여 7개 항목(먼지, CO, CO₂, 기류속도, 온도, 습도, 조명)에 대한 위생관리 기준을 개정하였다. 1992년 6월 건설교통부(건축설비기준법)에서 환기설비의 공급 공기질을 관리하기 위하여 보건복지부의 공중이용시설에 대한 기준과 유사한 5개 항목(먼지, CO, CO₂, 기류속도, 습도)에 대한 관리 기준을 정하였다. 환경부에서는 1989년 지하생활공간 관리 권고기준을 설정한 후, 1996년 12월 지하역사, 지하상가를 대상으로 7개 오염물질(먼지, CO, CO₂,

SO₂, NO₂, HCHO, 납)에 대하여 규제 기준을 정하여 관리하고 있다. 현재 건설교통부의 건축설비기준은 폐지된 상태이며, 보건복지부의 공중위생법은 1999년 2월 8일부로 공중위생관리법으로 개정되어 1999년 8월 9일부터 시행되고 있다. 이외에도 교육부와 노동부에서 학교와 작업장을 대상으로 부분적으로 관리하고 있다. 표 2는 국내 주요 실내 공기질 규제 기준 및 권고 기준을 비교하여 나타낸 것이다.

표 2. 국내 주요 실내 공기질의 규제 기준 및 권고 기준

항 목	지하생활공간 공기질 관리법 (환경부)		공중위생관리법 (보건복지부)
미세먼지(PM ₁₀ , $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24시간 평균	200	150
일산화탄소(CO, ppm)	1시간 평균	25	10
이산화탄소(CO ₂ , ppm)	1시간 평균	1000	1000
아황산가스(SO ₂ , ppm)	1시간 평균	0.25	—
이산화질소(NO ₂ , ppm)	1시간 평균	0.15	—
포름알데히드(HCHO)	24시간 평균	0.1	—
납(Pb, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24시간 평균	3	—
기류속도(m/s)	—	—	0.5
온도(°C)	—	—	17~28
습도(%)	—	—	40~70
조도(lux)	—	—	100

3. 에어로졸의 측정방법

에어로졸의 형상은 일반적으로 비구형이므로, 기하학적 특성이나 입자의 광산란 현상, 전기적 이동도, 공기역학적 이동도를 이용하여 입경을 정의한다. 입자의 물리적 특성을 이용하는 경우 대상 입자가 나타내는 물리량(예, 광산란량, 전기적 이동도, 중력침강속도)과 동일한 물리량을 나타내는 구의 직경으로 입경을 나타낸다.

단위 체적당 입자의 양을 나타내는 에어로졸 농도는 일반적으로 질량농도, 수농도 및 상대농도로 표현한다. 질량농도는 단위 체적당 에어로졸의 질량이고, 수농도는 단위 체적당 에어로졸의 개수이다. 상대농도는 질량농도 또는 수농도에 대응하는 물리량으로 나타내는 상대적인 수치이다. 조대 입자의 경우 질량농도가 중요하고, 미세 입자의 경우 수농도가 중요하다.

필터(filter)의 입자채취효율, 인체의 기관지 내 입자 침착, 시정장애의 정도는 입경에 따라 달라진다. 그림 1에서 보는 바와 같이 에어로졸의 크기가 매우 광범위하므로, 입경분포는 보통 대수 척도(log scale)로 나타내며, 각 입경 범위에 적합한 여러 가지 측정기를 사용하여 에어로졸의 입경별 농도분포를 측정한다.

에어로졸의 질량 측정방법으로는 필터, 다단 임팩터, piezoelectric mass sensing technique, β -attenuation mass sensing technique 등이 있고, 단일 입자 측정방법으로는 광학 입자계수기, 응축핵 계수기(condensation nucleus counter, CNC), 공기역학적 입자계수기(aerodynamic particle sizer spectrometer, APSS 또는 aerosizer particle size analyzer) 등이 있다. 입자의 전기적 측정방법으로는 electrostatic classifier(보통 differential mobility analyzer, DMA라고 부름)와 응축핵 계수기(또는 aerosol

electrometer)를 함께 사용하는 differential mobility particle sizer(DMPS, 최근에는 데이터 처리속도를 빠르게 하여 scanning mobility particle sizer, SMPS로 판매)가 있다.

광학 입자계수기는 보통 0.1 μm 이상의 입자를 몇 개의 채널(channel)로 나누어 입경별 수농도를 측정하는 데 사용되고, 응축핵 계수기는 광학 입자계수기로 측정할 수 없는 매우 작은 입자(약 10 nm 이상)의 수농도를 측정하는 데 사용된다. 공기역학적 입자계수기는 0.5 ~ 20 μm (aerosizer particle size analyzer의 경우 0.6~200 μm) 범위인 입자의 크기별 수농도를 측정하는데 사용되고, DMPS/SMPS는 0.01~1 μm 범위인 입자의 크기별 수농도를 측정하는데 사용된다.

국내 대기 에어로졸 연구에 대용량 샘플러

(high volume air sampler), 소용량 샘플러(low volume air sampler), β 선 흡수식 질량농도계 (β -attenuation mass sensor), PM_{10} sampler, $\text{PM}_{2.5}$ sampler 등이 주로 사용되어 왔으나, 최근 들어 mini volume air sampler, 다단 임팩터, dichotomous sampler, 광학 입자계수기, 라이다, transmissometer, nephelometer 등도 사용되고 있는 추세이다.

현재 많이 사용되고 있는 대기 및 실내 에어로졸의 측정방법을 비교하여 표 3에 나타냈고, 대표적인 입경분포 측정기의 작동범위를 그림 2에 나타냈다. 본 고에서는 실내 및 대기 에어로졸 측정에 사용되는 다단 임팩터, 광학 입자계수기, 공기역학적 입자계수기, 응축핵 계수기, DMPS/SMPS의 원리 및 특성을 소개하고자 한다.

표 3. 실내 및 대기 에어로졸의 측정방법

측 정 대 상		측 정 기	비 고
질량 농도	총농도	TSP	· 조대 입자 · 성분 분석 · 대기, 실내
		PM_{10} $\text{PM}_{2.5}$	
	입경분포	· Cascade impactor	
수농도	총농도	· Condensation nucleus counter · Aerosol electrometer	· 미세 입자 · 클린룸
	입경분포	· Optical particle counter · Aerodynamic particle sizer spectrometer · Aerosizer particle size analyzer · Scanning mobility particle sizer	

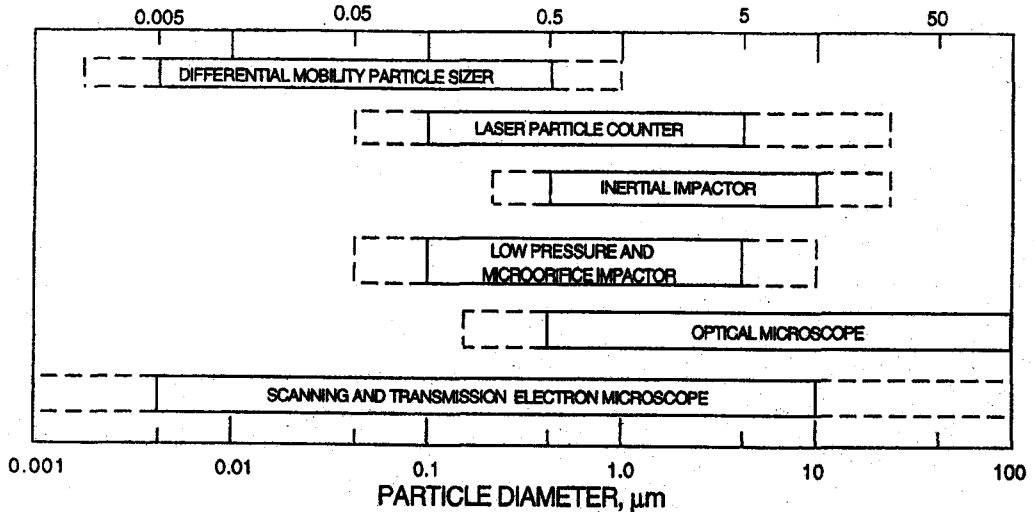


그림 2 에어로졸 측정기의 작동 입경 범위

4. 에어로졸 측정기의 원리 및 특성

4. 1 다단 임팩터

임팩터는 그림 3에 나타낸 바와 같이 입자를 포함한 공기가 노즐을 통해 충돌 표면으로 향할 때 충분한 관성력을 갖는 큰 입자는 표면에 부딪히고, 작은 입자는 공기를 따라 흐르도록 설계되어 있다. 즉, 임팩터는 입자의 관성력을 이용하여 특정 크기 이상의 입자를 분리시키는 기기이다. 임팩터의 입자분리 특성에 영향을 미치는 설계 인자로는 노즐의 직경(또는 폭, W), 노즐과 충돌판간의 거리(S), 노즐 목의 길이(T), 제트 유동의 레이놀즈 수, 노즐 입구의 형상 등이 있다.

임팩터의 입자채취효율은 입자의 관성을 나타내는 무차원 수인 스톡스 수(Stokes number)의 함수로 표현될 수 있다. 이상적인 임팩터는 특정 크기 이상의 입자는 모두 채취하고,

이보다 작은 입자는 채취하지 않아야 한다. 즉, 입자채취효율 곡선이 계단함수(step function) 형태이어야 한다. 그러나, 실제로 사용되고 있는 임팩터의 입자채취효율 곡선은 S 형태이다. 그러므로, 임팩터의 분리입경(cut size, aerodynamic diameter)보다 큰 입자의 일부가 채취되지 못하고, 분리입경보다 작은 입자의 일부가 채취되는 단점이 있다.

에어로졸의 입경분포를 측정하기 위해서는 그림 4에 나타낸 바와 같은 다단 임팩터를 사용하며, 다단 임팩터는 일반적으로 6~8단의 충돌판과 최종 필터로 구성된다. 다단 임팩터는 아래 단으로 내려감에 따라 노즐의 크기를 줄여 노즐을 통과하는 제트의 속도를 증가시킴으로써 보다 작은 입자도 충돌판에서 채취되도록 설계되어 있다. 즉, 아래 단으로 내려갈수록 충돌판의 분리입경이 작아지고, 마지막 단에서도 채취되지 않은 매우 작은 입자는 최종 필터에서 채취된다. 그러므로, 모든 단에서 채취된

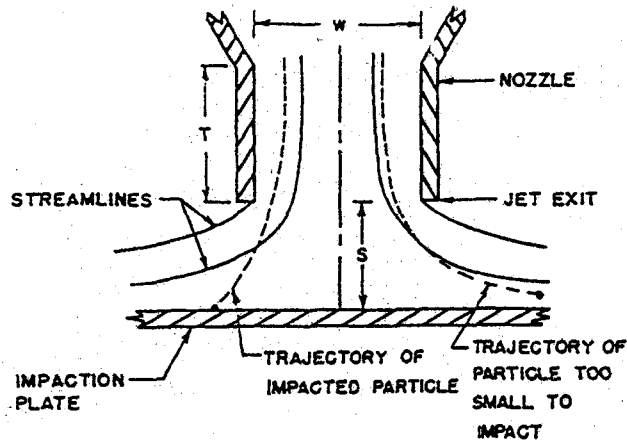


그림 3 임팩터의 구조 및 설계 인자

양과 최종 필터에서 채취된 양을 합하면 총부 유입자(TSP)가 된다. 다만 임팩터에서 입자는 입구, 단간의 구조(interstage), 충돌판에서 입자의 튀어나오는 현상 등에 의해 손실되어 입경분포 측정에 영향을 미친다.

임팩터는 입자의 관성을 이용하여 기류로부터 입자를 분리하므로, 입자 충돌판의 재질 및 표면상태, 입자재질, 그리고 흡인유량 등에 따라 입자채취 특성이 달라질 수 있다. 임팩터의 이론, 설계방법, 사용법, 데이터 처리 등에 대해서는 잘 알려져 있으며, 널리 사용되는 임팩터의 성능 특성에 대해서도 많은 연구가 수행되었다.

임팩터는 입자의 관성을 이용하여 입경을 분류하므로 주로 크기가 $1 \mu\text{m}$ 이상인 조대 입자의 분류에 사용되었으나, 최근 미세 입자에 대한 관심이 높아짐에 따라 저압(low-pressure)이나 미세 오리피스(micro-orifice)를 사용하여 미세 입자를 분류할 수 있는 다단 임팩터가 개발되어 널리 사용되고 있다. 미세 오리

피스를 사용한 임팩터는 1980년대 초에 개발되어 현재 시판되고 있으며, 기본적인 성능 특성도 알려져 있다. 최근 들어 국내에서도 미세 오리피스를 사용한 다단 임팩터(microorifice uniform deposit impactor, MOUDI, MSP Corp., USA)가 대기 및 실내 에어로졸의 입경분포 측정에 사용되고 있다.

지금까지의 다단 임팩터는 기본적으로 충돌판(필터나 알루미늄 호일)에 채취된 입자의 무게를 전자저울로 측정하므로, 에어로졸의 입경별 질량농도 분포를 구하는데 많은 시간이 걸렸다. 신속한 정보에 대한 요구가 증가함에 따라 최근에 저압 임팩터에 에어로졸의 전기적 측정방법을 접목하여 실시간으로 에어로졸의 입경분포를 측정할 수 있는 전기적 저압 임팩터(electrical low pressure impactor, ELPI)가 개발되어 시판되고 있다. ELPI는 먼저 코로나 하전기(corona charger)에서 샘플링된 입자를 하전시킨 후 임팩터로 보내 입경을 분류시키며, 대전된 입자가 충돌판에 부착하면 전류가

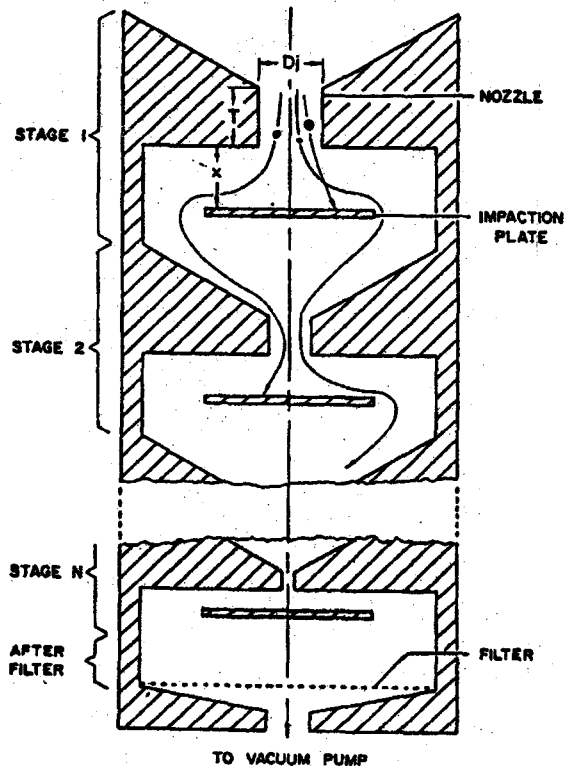


그림 4 다단 임팩터의 개략도

흐르는데, 이것을 electrometer로 측정하여 0.03 ~ 10 μm 범위인 에어로졸의 입경분포를 구한다. 표 4는 현재 널리 사용되고 있는 다단 임팩터를 각 모델별로 시방을 비교하여 나타낸 것이다.

4. 2 광학 입자계수기(레이저 입자계수기)

광학 입자계수기는 클린룸, 실내공간, 대기 에어로졸의 입경별 수농도 분포를 측정하는 기기로 가장 많이 사용되고 있다. 광학 입자계수기는 그림 5에 나타낸 바와 같이 광원(백열광, 가스 레이저, 레이저 다이오드), 관측체적 (viewing volume), 유로계, 광학계로 구성된다.

그림 6은 광학 입자계수기의 일반적인 작동원리를 나타낸 것이다. 개별 입자는 진공펌프에 의해 관측체적 내로 공기와 같이 유입되고, 이때 광원으로부터 발생된 빛을 산란시키게 된다. 입자로부터 산란된 빛은 집광장치에 의해 모아져 광감지기(photodetector)로 보내지며, 광감지기는 집광된 양에 비례하는 전기적 신호를 발생시킨다. 전기적 신호의 크기는 입경과 관계되고, 펄스수는 입자수와 관련되므로, 입경별 수농도를 측정할 수 있다. 현재 시판되고 있는 광학 입자계수기는 보통 광원으로 레이저를 사용하고, 최소 측정 입경(lower detection limit)은 약 0.1 μm 이나 0.06 μm 정도의 작은

표 4. 상분화된 다단 입액터의 특성

모 델	샘플링 유량 (L/min)	단(stage) 수	분리입경 범위 (μm)
Andersen 20-800	28	8	0.4 ~ 10
GRA Sierra/Marple 210	7	10	0.16 ~ 18
GRA Low Pressure Impactor	3	12	0.08 ~ 35
HAU Berner Low Pressure Impactor	30	9	0.06 ~ 16
Andersen Low Pressure Impactor	3	13	0.08 ~ 35
MSP MOUDI	30	10	0.056 ~ 10
TSI ELPI 3935	10, 20, 30	12	0.03 ~ 10
SKC Marple Personal Sampler	2	8	0.5 ~ 20

입자까지도 측정할 수 있는 광학 입자계수기도 있다.

광학 입자계수기의 입경 반응(size response)은 기기와 입자의 특성에 따라 달라진다. 기기의 특성으로는 광학계의 설계, 광원의 종류 및 파장, 전자회로의 gain이 중요하고, 입자의 특성으로는 크기, 굴절계수(refractive index), 형상, 광원의 입사빔에 대한 비구형 입자의 상대적인 방향 등이 중요하다.

광학 입자계수기의 대표적인 성능으로는 입경 정확도(sizing accuracy), 분해능(resolution), 계수효율(counting efficiency), 최소 측정 입경을 들 수 있다. 입경 정확도는 측정 입경과 실제 입경간의 차이를, 분해능은 측정 가능한 최소 입경 간격을, 그리고 최소 측정 입경은 계수효율이 50%인 입경을 의미한다.

광학 입자계수기에서 입자의 크기 및 농도 측정에 영향을 미치는 인자로는 multi-valued

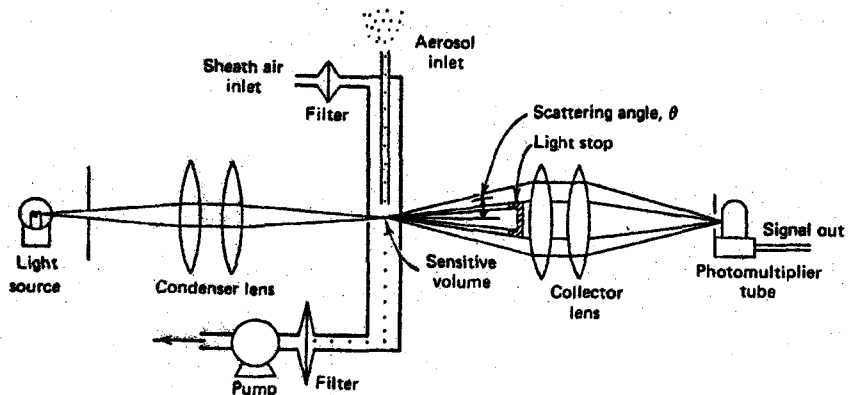


그림 5 광학 입자계수기의 구성도

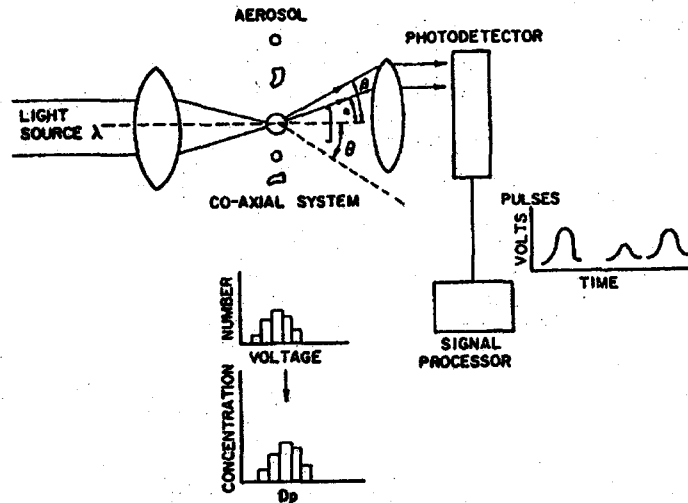


그림 6 광학 입자계수기의 작동원리도

response, 제한된 분해능, 굴절계수의 불확실성, 관측체적의 크기, 관측체적내 불균일 조사(illumination), 전기적 노이즈, 샘플링 유량의 불확실성, 동소공존의 오차(coincidence error), 저농도에서 계수 정확도의 통계적 한계, 흡입효율(inlet efficiency), 샘플링관내 입자손실 등이 있다.

표 5는 현재 널리 사용되고 있는 광학 입자계수기를 각 모델별로 시방을 비교하여 나타낸 것이다. 광학 입자계수기를 구입하고자 하는 경우 적절한 입경에 대한 감도, 크기 정확도, 분해능, 측정입경범위, 최대 샘플링 유량, 수리의 용이성 등을 고려하여야 한다.

4. 3 공기역학적 입자계수기

공기역학적 입자계수기는 입자가속 노즐과 광산란장치를 조합하여 입자의 공기역학적 크기를 측정한다. 그림 7은 공기역학적 입자계수기의 개략도를 나타낸 것이다. 입자를 포함한

공기가 노즐을 통과하면서 빠른 속도로 가속되는데, 입자가 가속되는 정도는 입경에 따라 다르다. 즉, 입자의 가속영역인 노즐 끝 부분에서 큰 입자의 경우 관성력이 커서 천천히 가속되지만, 작은 입자의 경우 관성력이 작아 속도가 빠르다. 입자가 일정한 간격을 유지하고 있는 2개의 레이저 빔 사이를 통과하면서 산란시키는 빛의 펄스 간격을 측정하여 입자속도를 구하고, 입자속도로부터 공기역학적 입경을 산출한다.

시판되고 있는 공기역학적 입자계수기(APSS)는 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 범위인 입자를 측정하고, 최근에는 공기역학적 입경뿐만 아니라 광학적 입경($0.3 \sim 20 \mu\text{m}$)을 동시에 측정할 수 있는 기능도 추가되었다. Aerosizer particle size analyzer는 넓은 범위($0.6 \sim 200 \mu\text{m}$)의 입경을 측정할 수 있어 분체(powder) 및 에어로졸 연구에 많이 사용되고 있다.

표 5. 상품화된 광학 입자계수기의 특성

모 델	샘플링 유량 (ft ³ /min)	입경 범위 (μ m)	입경분류 채널 수	광 원
Hiac/Royco 5300	1.0	0.5~15	6	백색
Hiac/Royco 5200	0.1	0.1~2	6	레이저
Hiac/Royco 5100	1.0	0.25~10	6	레이저
Hiac/Royco 5000	0.01~0.05	0.3~10	6	백색
Met One 205	1.0	0.16~10	6	레이저
Met One 200	1.0	0.3~10	6	백색
Met One 207	0.1	0.5~5	5	레이저
PMS LPC-101	0.1	0.1~1	4	레이저
PMS LPC-525	1.0	0.2~5	5	레이저
PMS LAS-X	0.01	0.09~3	16	레이저
PMS HS-LAS	0.1	0.05~1	16	레이저
PMS μ LPC-110	1.0	0.1~5	5	레이저
Status 4000	1.0	0.3~5	5	백색
Status 2100	0.01	0.5~5	2	백색

4. 4 응축핵 계수기

응축핵 계수기(CNC)는 보통의 광학적인 방법에 의해서 측정이 불가능한 매우 작은 입자를 열역학적 특성을 이용하여 광학적으로 측정할 수 있는 크기로 성장시켜 입자의 수농도를 측정하는 기기이다. 응축핵 계수기는 1888년 John Aitken에 의해 처음으로 제작되어 100년 이상의 역사를 갖고 있으며, 대기환경에서 "Aitken particles"는 응축핵 계수기로 측정할 수 있는 작은 입자들을 말한다. 일반적으로 응축핵 계수기는 0.01 μ m 이상의 입자를 측정하며, 측정농도는 0.01~10⁷ 개/cm³로 매우 광범위하다.

입자의 농도와 크기를 동시에 측정할 수 있는 광학 입자계수기와 달리 응축핵 계수기는 입자의 농도만을 측정하므로, 입경분포를 측정하여야 할 경우에는 확산 입자분류기(diffusion battery, DB)나 전기적 입자분류기(DMA) 등과 같이 입경을 분류할 수 있는 기기와 함께 사용하여야 한다. 응축핵 계수기는 대기오염 및 입자에 의한 환경오염 측정에 많이 사용되어 왔으며, 최근에는 반도체 제조환경인 클린룸내 오염입자 측정에 많이 사용되고 있다.

응축핵 계수기는 부유입자를 포화시킨 후 입자 성장에 필요한 과포화 상태를 만들기 위하여 단열팽창 또는 다른 메커니즘에 의해 냉각시킨다. 존재하는 모든 핵(입자)은 동일한 시

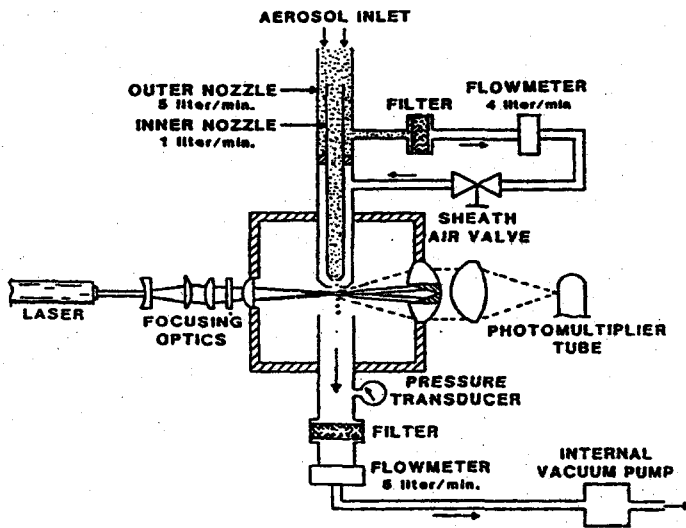


그림 7 공기역학적 입자계수기의 개략도

간에 똑같은 과포화 상태에 노출되어 초기 크기에 무관하게 $10 \mu\text{m}$ 정도로 커진다. 각 핵은 성장하여 액적이 되므로, 액적과 핵의 농도는 같게 되고, 액적의 수농도는 보통 광학적인 방법으로 측정된다. 응축핵 계수기는 기체를 과포화시키고 응축 증기를 냉각시키는 방법에 따라 크게 3가지 종류로 구분된다. 즉, 가장 오랫동안 사용되어 온 단열팽창형(adiabatic expansion) CNC, 1980년을 전후하여 개발된 열확산형(thermal diffusional) CNC와 합류형(two flow mixing) CNC가 있다.

열확산형 CNC는 입경을 분류할 수 있는 기기와 결합하여 사용할 수 있도록 개발된 것으로 기체를 연속적으로 샘플링할 수 있다. 그림 8은 열확산형 CNC의 구조를 나타낸 것으로, 이것은 크게 포화기(saturator), 응축기(condenser), 광학측정부로 구성되어 있다.

열확산형 CNC의 작동원리는 다음과 같다.

입자를 포함한 기체를 흡인하여 먼저 작동유체(주로 알코올 사용)로 젖어 있는 포화기를 통과시킨다. 이 포화기는 상온보다 높은 온도(35°C)를 유지하게 되며, 이곳을 통과한 기체는 증기로 포화되게 된다. 이 포화된 기체가 입자와 함께 상온보다 낮은 온도(10°C)로 유지되고 있는 응축기로 유입되면, 과포화 상태가 되어 증기의 응축 현상이 생긴다. 이러한 응축은 기체 내에 포함된 일정 크기 이상의 초미세 입자의 표면에서 생기며, 응축기를 통과하는 동안 초미세 입자는 계속 성장한다. 이때 성장할 수 있는 최소 입경을 Kelvin 입경이라고 하며, 이보다 작은 입자가 성장하기 위해서는 더 높은 과포화 상태를 유지시켜야 한다. 이렇게 성장한 입자는 수 μm 크기가 되며, 응축기 출구 부분에서 간단한 광학계를 사용하여 입자의 수농도를 측정한다.

보통 계수효율이 50%일 때의 입경을 최소

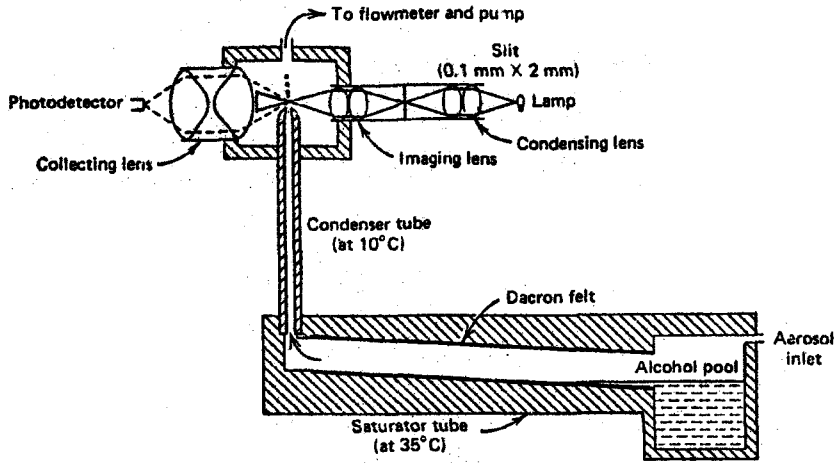


그림 8 열확산형 CNC의 구조

측정 입경이라고 부른다. 모델마다 약간씩 다르나 보통 $0.01 \mu\text{m}$ 근처의 입경에서 50%의 계수효율을 나타낸다. 입경이 최소 측정 입경보다 2~3배 크면 계수효율은 100%가 되고, 3~5 μm 이상의 입자는 샘플링 효율 및 응축핵 계수기 내부에서 관성에 의한 손실에 의해 100% 이하의 계수효율을 나타낸다.

응축핵 계수기는 개개 입자를 측정하지만, 꽤 높은 농도를 측정할 수도 있다. 고농도 측정시 동소공존(coincidence error)의 오차는 관측체적으로 입자가 동시에 2개 이상 지나갈 때 몇 개의 입자가 단지 1개의 입자로만 측정되기 때문에 생긴다. 동소공존의 오차를 보정하면 실제 농도는 아래 식(1)과 같이 결정된다.

$$N_s = N_c \exp(N_c Q t) \quad (1)$$

여기서, N_s 는 실제 농도, N_c 는 측정 농도, Q 는 샘플링 유량, t 는 개개 입자가 관측체적에

머무는 유효시간이다. $t = 0.2 \mu\text{sec}$ (펄스 폭)이고, $Q = 1.4 \text{ L/min}$ 인 경우 10^4 개/ cm^3 에 대한 동소공존의 오차는 5% 정도이다.

현재 널리 사용되고 있는 CNC를 각 모델별로 시방을 비교하여 표 6에 나타냈다. 미국 TSI사의 제품은 열확산형이고, 일본 Kanomax사와 Rion사의 제품은 합류형이다.

4. 5 전기적 입경분포 측정 시스템(DMPS/SMPS)

DMPS/SMPS는 입자의 전기적 특성을 이용하여 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 범위의 입경별 수농도 분포를 측정하는 시스템이다. 이 시스템은 크게 전기적 입자분류기(DMA), 응축핵 계수기(CNC), 그리고 이 두 기기를 통합 조절 및 데이터를 수집하여 처리하는 컴퓨터로 구성되어 있다.

DMA는 다분산 입자(polydisperse)를 Kr^{85} , Po^{210} 등과 같은 방사능에 노출시켜 전기적으로 중화된 입자를 전기적 이동도에 따라 입경별로 분류시키는 기기이다. 방사능에 노출된 입자들

표 6. 상용화된 응축핵 계수기의 특성

모 델	샘플링 유량	최소 측정 입경 (nm)	최대 측정 농도
TSI 3010	1 L/min	10	10^4 개/cm ³
TSI 3022A	5 cm ³ /s	7	10^7 개/cm ³
TSI 3025A	0.5 cm ³ /s	3	10^5 개/cm ³
TSI 3760A	1.5 L/min	11	10^4 개/cm ³
TSI 3762	3.0 L/min	11	10^4 개/cm ³
Met One CNC-1100	0.05 ft ³ /min	10	10^7 개/ft ³
Kanomax 3851	2.8 L/min	10	10^7 개/ft ³
Kanomax 3861	5.6 L/min	50	3×10^6 개/ft ³
Rion KC-60	2.8 L/min	10	30 개/cm ³
Hiac/Royco HP-CNC	1 ft ³ /min	10	—

은 입경에 따라 일정한 비율의 양전하, 음전하 및 중성으로 대전된다. 이것을 볼츠만 평형 대전량 분포(Boltzmann equilibrium charge distribution)라고 부른다. 이렇게 전기적으로 중화된 입자는 그림 9에 나타낸 바와 같이 외부 원통의 안쪽으로 유입되어 일정한 전압이 걸려있는 전기장을 통과하게 된다. 일반적으로 외부 원통은 접지되어 있고, 내부 원통은 '-' 전압을 인가하여 사용한다. '-' 전압이 인가되면 '+' 전하를 띤 입자는 내부 원통 방향으로 이동하게 되며, 이때 입자는 공기에 의한 저항력과 전기장에 의한 전기력이 균형을 이루며 하류로 이동한다. 입자의 대전량이 같으면 큰 입자는 멀리 이동하여 하류 측에서 채취되고, 작은 입자는 상류 측에서 채취된다. 내부 원통의 적당한 위치에 좁은 슬릿을 만들어 놓으면, 원하는 크기의 입자를 슬릿을 통하여 분리할 수 있다. 이렇게 분리된 입자는 단분산(monodi-

perse) 입자로 기하학적 표준편차는 1.05 정도이다.

그림 10은 DMPS의 개략도를 나타낸 것이다. DMA는 다분산 입자를 에어로졸 중화기(aerosol neutralizer)로 중화시킨 후 내부 원통에 인가되는 전압을 바꾸면서 입자의 전기적 이동도를 이용하여 단분산 입자만을 골라내는 역할을 한다. CNC는 DMA로부터 분리된 단분산 입자의 수농도를 측정한다. DMA와 CNC에 연결된 컴퓨터는 DMA의 전압을 자동적으로 바꾸면서 CNC의 입자농도를 측정하고, 이들 데이터를 처리하는 역할을 한다. 이러한 시스템을 DMPS라 하며, 이 시스템은 DMA 전압을 단계적으로 변화시키며 입자의 수농도를 측정함으로써 하나의 입경분포 데이터를 얻는데 20분 정도의 시간이 걸린다. 이러한 단점을 개선하여 DMA에 걸리는 전압을 지수함수적으로 계속 변화시키면서 측정하는 방법을 도입한 시스템을

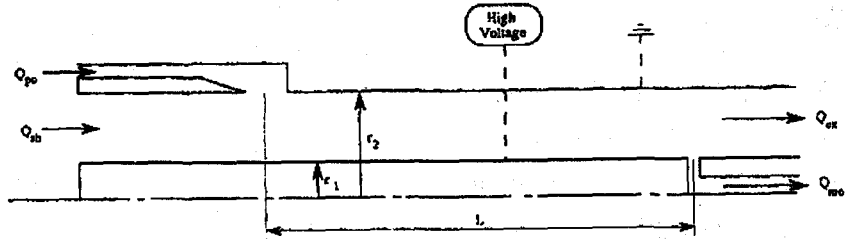


그림 9 전기적 입자분류기의 개략도

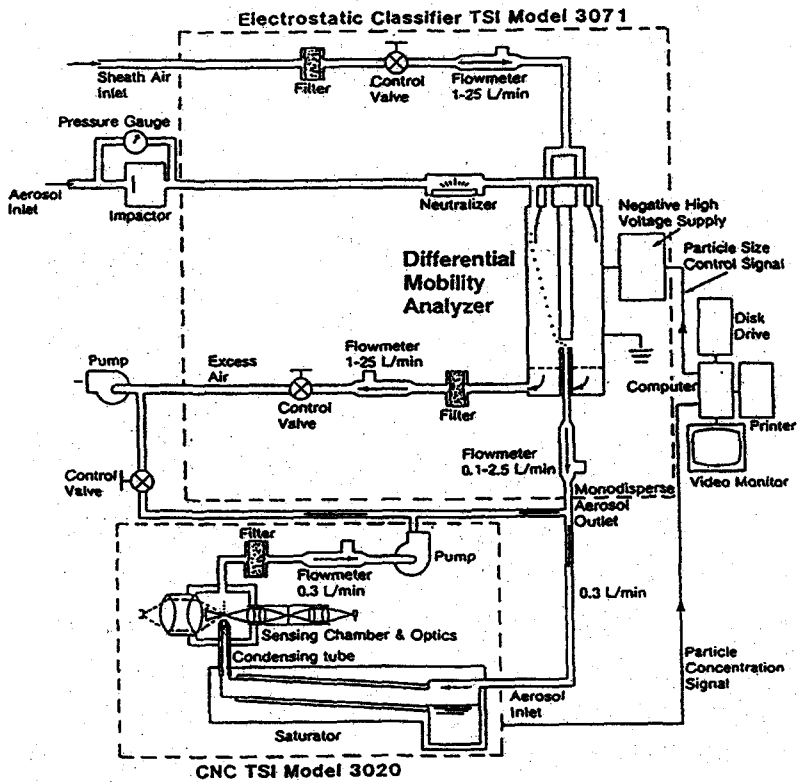


그림 10 DMPS의 개략도

SMPS라 부르며, 20~30초 정도면 하나의 입경 분포를 얻을 수 있다.

5. 맺음말

국내에서도 대기 및 실내 에어로졸에 대한 연구가 다각적으로 수행되고 있다. 즉, 대도시의 대기오염 및 시정장애, 공단지역의 대기오염, 대기와 실내 에어로졸의 비교, 지하공간, 사무실 및 주택내 공기오염, 에어로졸의 장거리 이동 및 침적, 황사, 수직 에어로졸 분포 등 매우 다양한 분야에 대한 연구가 진행되고 있다.

국내 대기 및 실내 에어로졸 연구에 질량농도를 측정할 수 있는 측정기가 주로 사용되고 있는데, 외국에서는 이외에도 응축핵 계수기, 공기역학적 입자계수기, 전기적 입경분포 측정 시스템 등이 대기 및 실내 에어로졸 연구에 많이 사용되고 있다. 향후 국내에서도 이러한 측정기들을 사용한 연구가 활발히 수행될 것으로 예상되므로, 본 고에서는 대기 및 실내 에어로졸의 입경분포 및 수농도를 측정할 수 있는 대표적인 에어로졸 측정기의 원리와 특성을 소개하였다.

에어로졸의 농도, 입경분포 등을 정확히 측정하기 위해서는 에어로졸 기술(aerosol technology)을 잘 활용하는 것이 중요하다. 즉, 사용하는 에어로졸 측정기의 성능 특성을 잘 이해하여야 하고, 흡인유량, 여지, 입구(inlet) 등과 같은 측정시 오차의 원인을 파악하여야 한다. 다음으로 입자 발생 및 측정기법을 사용하여 실험실에서 에어로졸 측

정기를 교정한 후, 이러한 자료를 근거로 에어로졸 측정 및 데이터 분석 기법을 향상시킬 필요가 있다.

- 참고 문헌 -

1. 공기청정편람편찬위원회, 1996, 공기청정편람(기초편), 한국공기청정연구조합.
2. 김기현 편, 1999, 대기오염물질의 측정기술, (사)한국대기환경학회·한국환경분석학회.
3. 김윤신, 1999, "실내 공기질 연구의 현황과 전망", 한국대기환경학회지, 15(4), 371-383.
4. 배귀남, 1994, "응축핵 계수기", 제6회 분체공학기술교육세미나, 한국화학공학회 분체공학부문위원회, 74-90.
5. 안강호, 1995, "입자 측정장치 및 표준입자 발생장치 개론", 대한기계학회지, 35(5), 379-389.
6. 안강호, 김남효, 이종호, 배귀남, 1996, "Differential Mobility Analyzer (DMA) 내의 입자운동 및 특성 분석", 대한기계학회논문집(B), 20(6), 2005-2013.
7. Cohen, B. S. and Hering, S. V., 1995, Air Sampling Instruments, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc.
8. Hinds, W. C., 1982, Aerosol Technology, John Wiley & Sons, Inc.
9. Lodge, Jr., J. P. and Chan, T. L., 1986, Cascade Impactor: Sampling & Data Analysis, American Industrial Hygiene Association.