

PARTICLE COUNTER에 의한 CLEAN ROOM계측

Measurement of Clean Room by the Particle Counter

이 석 주*
Seok - Ju Lee

1. Particle Counter의 발자취

우리들이 호흡하며 생활하고 있는 공기 중에는 많은 미소입자들이 부유하고 있다. 이러한 사실은 19세기 이래로부터 알려져 왔으나 어디까지나 학문적 흥미의 대상일뿐 산업적인 측면에서 주목된 것은 제 2차대전의 군사 기술에 관련되면서 부터이다. 원폭에 사용되는 핵분열물질의 정제 작업시에 방사성 부유 입자의 비산을 방지하여 작업원의 건강을 보호하며, 초고속으로 회전하는 항공기의 Gyro Compass의 신뢰성 유지를 도모하는 목적으로 Contamination Control의 개념이 생겨 작업 환경의 공기 청정화 기술이 현저한 진보를 보였다. 어떤 기술이 진보하기 위하여는 그 내용을 객관적으로 평가하는 기술을 동반할 필요가 있다. 전쟁이라고 하는 특이한 정황 속에서 고도의 공기 청정화 시스템과 광산란에 의한 부유 입자 계측기의 개발이 병행하여 진행되었다.

최초의 단계에서 Sinclair와 LaMer (증발 응축형 미스트 발생 장치의 고안자로도 유명)는 입자의 산란하는 빛의 강도가 조사광의 진행방향의 광축에 가까울수록 강하다는 점에 착안하여 그림 1에 나타난 것과 같은 近前方散亂光型의 장치를 만들었다. 이 장치는 엄밀히

말하면 입자 계수기라고 말하기는 어렵고, 또한 노즐에 따라 형성되는 가는 시료 공기 기류가 아닌 검출 상자를 만들었다. 이 장치는 엄밀히 말하면 단일 입자 계수기라고 말하기는 어렵고, 또한 노즐에 따라 형성되는 가는 시료 공기 기류가 아닌 검출 상자를 중앙부에 작은 구멍을 뚫고 칸막이로 갈라서, 측정하려는 시료 공기는 한쪽의 구멍으로 들어가 또 다른 한쪽으로 흡입된다. 광학계는 한외현미경에서 힌트를 얻었다고 생각되는 중공 원주 입사광형의 근전방 산란광 방식으로 옆면 구멍의 위치에 입사광의 초점을 맞추어 입자가 통과 시에 산란하는 빛은 광전관에 모여진다. 이 장치가 어느 정도의 성능을 가지고 있는지는 불명이다.

다음으로 O'Konski와 Doyle은 Sinclair와 LaMer의 장치를 그림 2와 같은 구조로 개량했다. 이 장치에서는 시료 공기의 흐름을 노즐에서 조사광축과 직각으로 교차하도록 분출시킨 구조로 되어 있다. 그 결과 그림 1의 장치와 같은 입자가 조사광축을 따라 긴 거리를 저속으로 이동하기 때문에 생기는 입자를 하나 하나 분리하여 계수하는 능력의 저하는 대폭 개선되었다. 더구나 이 장치에서는 노즐을 2중 원통형으로 하여 중심부를 흐르는 시료

* 천호기계(주), 기획실장

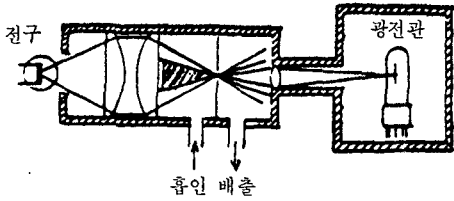


그림 1 Sinclair와 LaMer의 장치

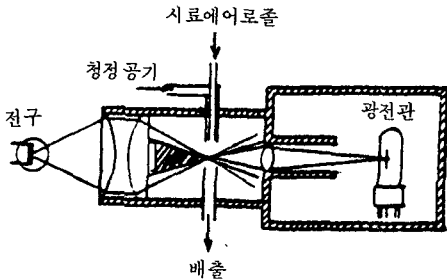


그림 2 O'Konski, Pickard, Pitts 등의 장치

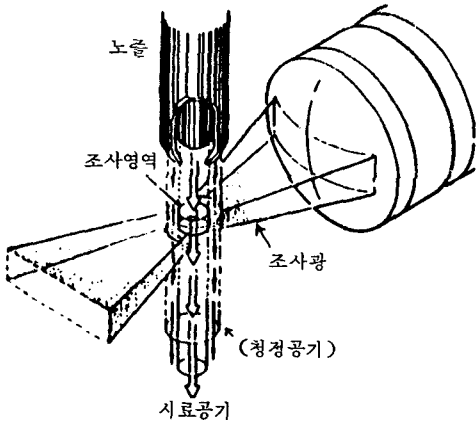


그림 3 SHEATH방식의 구성

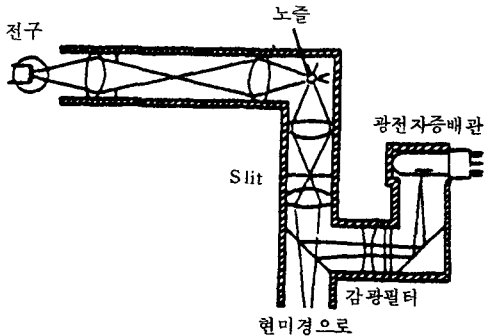


그림 4 Deloncle의 장치

공기를 외부의 원통으로 흐르는 청정 공기에 의하여 Sheath상태로 쌓여져, 입자가 검출 상자 내에서 늦어져서 일어나는 중복 계수를 막아준다. 이 방식은 현재 Particle Counter의 구조 중 빼어 놓을 수 없는 중요한 기술이다 (그림 3). 이 같은 장치로 1947년 Gucker는 “1 μm 의 입자를 분당 1,200개 카운트 가능하다.”라고 보고하고 또한 Rose의 협력을 얻어 1955년에는 4종류의 광학계에 대하여 입경대응답 신호의 이론적 계산을 하였다 (손잡이 계산기 시대에 이와 같은 계산은 실로 대단한 노력을 요한다).

시카고의 병기 연구소(Armour Research Foudadation)에 소속된 Katz와 Fisher는 이 연구를 기본으로 Aerosoloscope라고 불리는 장치를 만들었다. 그들은 당시 일반화된 광전관과 비교하여 감도가 높은 광전자 증배관을 광전 변환 소자로 사용하여 매분 12,000 카운트(동시 통과 손실 3.5%)의 성능을 나타 냈으나 제품으로서 시판되기까지는 미치지 못하였다.

이렇게 O'Konski 이후, 장치는 나름대로의 개량을 거듭해 입자의 개별 계수 능력은 현저히 향상되었으나 광학계는 Sinclair 이후 별 진전이 없었다.

이 즈음 입자경의 관하여 광산란에 의하여 구해진 값과 현미경에 의한 관찰경을 비교하는 목적으로 Deloncle는 그림 4와 같은 실험 장치를 만들었다. 이것은 조사광과 직각으로 교차된 시료 공기를 또다른 3차원의 직각 방향에서 관찰 가능한 구조(3축 직교, 현재의 광축 교차 각 90°형 측방 산란광 방식)로 되어 있다.

연구자들은 이 장치가 소기의 목적은 광학 현미경의 분해 능력을 제약시켜 수 μm 정도 이상의 입자를 다루는데 그쳐 충분한 성과를 올리지 못했는데도 불구하고 강한 흥미를 나타냈다.

당시 사용되던 근전방 산란광형 즉 조사광 축과 산란광 수광축 등이 동일 선상에 있는 광학계에서는 본질적으로 입자의 산란광 이외

의 미광을 감소시키는 것이 어려워 $0.5\ \mu\text{m}$ 의 하의 입자를 검출하는 성능의 실현은 곤란하였다. 그러나 Deloncle의 3축 직교형 장치에서는 그 배경관이 당연히 훨씬 적다. ART의 Katz 등이 개발한 Aerosoloscope는 이 90° 측방 산란광 방식을 채용한 것이다. O'Knoski와 Doyle는 당시 발표된 Daw Chemical사의 극히 양호한 상태로 분산된 포리스틸렌라텍스(PSL)입자를 청정 공기 중에 분산시켜 장치의 감도를 측정했다. 현재 광산란에 의한 부유 입자 계수장치의 입경 분별 기능은 모두 이 PSL입자에 의한 교정법을 채용하고 있다. 그림 5는 O'Knoski 등의 장치이다. 여기에서는 동시 통과 손실, 미광을 감소하는 목적에서 조사광과 시료 공기의 교차하는 공기를 Slit에 의하여 한정되는 연구가 진행되어 Sheath air를 갖춘 노즐도 채용되어 현재 시판되고 있는 백색 광원 Particle Counter의 성능과 거의 다름없는 최소가측 입경 $0.3\ \mu\text{m}$ 의 성능을 갖고 있다. 그 후 Royco사에서 이 구조와 거의 같은 장치가 제품으로 개발되어 미국 뿐만 아니라 유럽이나 일본에서도 널리 쓰였다. 여기에서 Particle Counter는 백색광을 광원으로 한 장치로서의 도달 가능한 입자 검출성능 한계에 이르렀다고 할 수 있다. 이 제품 Royco 200형에 대하여는 1962년 Zinky 등의 보고 이후, 많은 Report가 발표되었고, 일본에서는 1969년에 가네다, 요코지가 상세한 보고를 하였다.

한편 근전방 산란 방식을 구조로 한 장치에도 현저한 진보가 있었다. 근전방 산란광형의 결점은 이미 이야기 한바와 같이 배경광의 과다 이외에 집광각이 좁은 경우, 입자의 크기에 대한 응답의 비례성은 잊어 버리는 것이다(특성 곡선에 계곡이 생긴다). 산란광을 포착하는 집광계는 렌즈를 사용하는 한, 집광 각도를 반비례성의 Dilemma로부터 벗어날 수 있을 정도의 광각화가 불가능하다. 여기에서 집광계로서 추원면경, 방물면경 등, 비구면경을 사용한 장치가 나타났다. 그림 6은 Bausch & Lomb사의, 또한 그림 7은 Climet사의 광

학계를 나타냈다. B & L사의 제품에 관하여는 Randall과 Keller가 1965년에, Climet사의 제품에 대하여는 Huser가 1974년에 각각 보고하였다. 나중에 다시 거론 되겠지만 비구면경을 Particle Counter의 광학계로 채택한 것은 대단한 착상이었다. 레이저가 광원으로 등장하고 더구나 백색광원 시대의 한계였

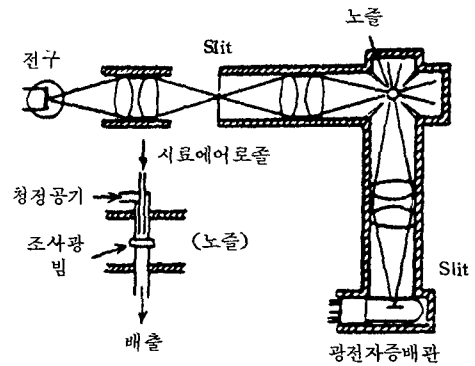


그림 5 O'Knoski의 장치

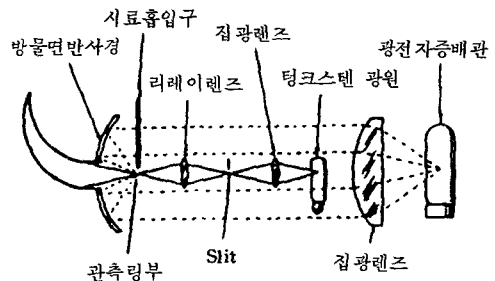


그림 6 Bausch & Lomb의 방물면경을 사용한 광학계

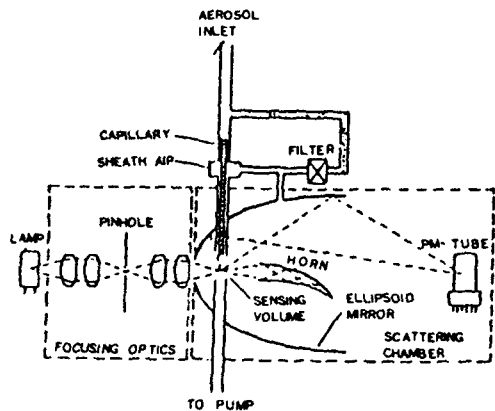


그림 7 Climet의 추원면경을 사용한 광학계

던 최소가측입경 $0.3 \mu\text{m}$ 입자의, 수백분의 1에 지나지 않는 산란광량의 $0.1 \mu\text{m}$ 입자를 검출 가능하게 한 것은 비구면경의 특징을 충분히 활용한 것이다.

산란광의 집광각도에 대하여 Royco 200형에서는 조사 렌즈와 집광 렌즈의 열려진 반각이 각각 $\gamma = \beta = 24^\circ$ 였으나 B&L사의 40-1형은 γ 를 14° 로 좁히고, β 는 54° 로서 압도적인 광각화에 성공하였다. 또한 후발의 Climet사의 CI-201형에서는 $\gamma = 16^\circ$, β 는 90° 에 달하여 그 결과 그림 8에 나타난 Kerker에 의하여 계산된 Climet사 제품의 응답 특성(Parameter는 입자의 굴절율)에서 밝혀 졌듯이 입자경에 대하여 직선성이 대단히 우수한 장치가 실현되었다.

Southern Reserch Instetute (SRI)의 Thomas와 Bird는 1960년에 광축교각을 직각 축방과 전방의 중간각(45°)로 한 특이한 형의 축방 산란광 방식의 장치를 발표하였다. 그러나 그들의 실험장치에서는 γ , β 가 모두 14° 로서 좁아 좋은 결과를 얻지 못했다. 이 결과만을 놓고 볼 때 어중간한 광축교각은 장치의 성능에는 유익하지 않은 듯이 생각됐다. 그러나 가네가와, 요꼬지(당시 정대 원자로)는 수집 가능한 산란광양, 굴절율 의존성, 입경에 대한 직선성 등을 종합적으로 고려하여 축방산란광 방식의 광축교각은 60° 정도가 바람직하다고 발표했다. 그 연구 결과에 의하여 단 산업이 광축교각 60° 의 제품을 발표하고 다음으로 같은 설계 사상에 의하여 리온은 70° 의 또한 단 과학이 50° 의 축방 산란광 방식의 Particle Counter를 발표하여 일본에서의 축방 산란광 방식의 전성기를 맞이 하였다. 이 제품들은 모두 특수 가스를 봉입한 Halogen Lamp라고 불리는 백열전구를 광원으로 한 것으로 최소가측입경은 $0.3 \mu\text{m}$ 이며, 그림 9는 대표적인 입자 검출 시스템 구조이다.

1960년 Maiman에 의하여 처음으로 실현된 레이저 발진에 의한 빛은 유도 방출이라고 하는 특수한 수단에 의하여 발생하며 방출된 광 에너지 모두가 같은 진동수의 파장이며 부

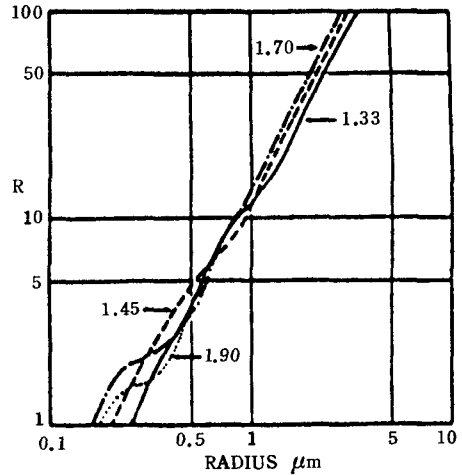
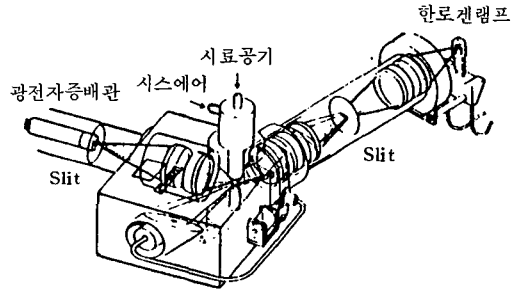


그림 8 Climet CI-201의 응답특성 (M, Kerker)



* 입경은 빛의 파장에 비교하여 몇분의 1 정도의 영역에서는 산란광량이 입경이 5~6 제곱 비례하여 감소한다.

그림 9 대표적인 축방산란 광학식입자검출시스템의 구조

분 마다의 나란한 모양도 균일하다. 백색광은 집중 가능한 에너지의 밀도가 겨우 몇 W/cm^2 이나 이것은 파장도 위상도 진동의 방향도 고르지 못한 광들을 렌즈에 의하여 모으려면 렌즈는 빛을 굴절시키는 능력이 파장에 따라 조금씩 틀리고, 초점을 모을 거리에 차이가 생기기 때문에 광 묶음의 전 에너지를 작은 면적 내로 집중시키는 것이 불가능하기 때문이다. 레이저 광의 경우는 원래 높은 에너지 밀도로서 발생시키는 것이 가능하며 렌즈에 의한 집중 능력도 높기 때문에 두꺼운 철판까지도 절단 가능한 것은 익히 알고 있는 사실이다.

Particle Counter로서 $0.3 \mu\text{m}$ 의 벽을 깨

고 최소가측입경을 더욱 미소입경 영역으로 발전시키는 데에는 레이저 광의 밀도를 이용할 뿐만 아니라 적극적으로 비구면경을 집광계로서 채용하여 미약한 산란광을 가능한 한 효율적으로 수집할 필요가 있다. 그림 10은 이러한 조건을 제일 빠른 시기에(1970년대 전반) 착안하여 산란광의 강도비율로서는 $0.3\ \mu\text{m}$ 입자의 수 100분의 1 정도 밖에 안되는 $0.1\ \mu\text{m}$ 입자의 검출에 성공한 PMS사의 레이저 파티클 카운터의 구조이다. 여기에는 방울면경이 쓰이고 있기 때문에 B & L 계통이라고 할 수 있다. 다음에 그림 11은 Climet 계의 추원면경을 채용한 광학계를 나타낸다. 이 집광계의 특징은 어떤 광학계라도 산란광중에 경면을 향하지 않고 개구부에서 직접 외부로 향하는 성분은 무효가 되는 점을 개량하여 미소입자의 레이저 광에 의한 광산란의 각도에 의한 광도차를 이용하여 고집광 효율을 구한 점이다. 그림 12는 이 추원면집광계 파티클 카운터의 구조이다.

현재 시판되고 있는 레이저 파티클 카운터의 대부분은 He-Ne형 레이저(파장 633nm)를 사용하여 공칭(카다록에 표시된 치. 실력에 대하여는 의문이 있는 장치도 있음.) 최소가측 입경은 대개 $0.1\ \mu\text{m}$ 정도의 미소입자를 검출하며 조사광의 파장은 짧을수록 유리하기 때문에 Ar 이온형(488nm: 청록색)이나 He-Cd형(442nm: 청색)의 레이저에 의하여 보다 작은 영역의 입자 검출의 실험도 이루어지고 있다.

최소가측 입자 성능의 향상과 병행하여 단 시간에 대량의 시료공기를 측정하는 장치의 개발도 이루어지고 있다.

이러한 장치는

a) 노즐의 직경을 크게, 조사 영역을 크게 한다.

b) 흐름의 직경은 그대로 두고 펌프의 성능을 강화시켜 류속을 높인다 라고 하는 수단중에 하나를 택하지 않으면 안된다. a)의 방법은 동시 통과 손실의 확률이 증대하여 계측가능한 계수 농도의 상한선이 저하된다. b)의

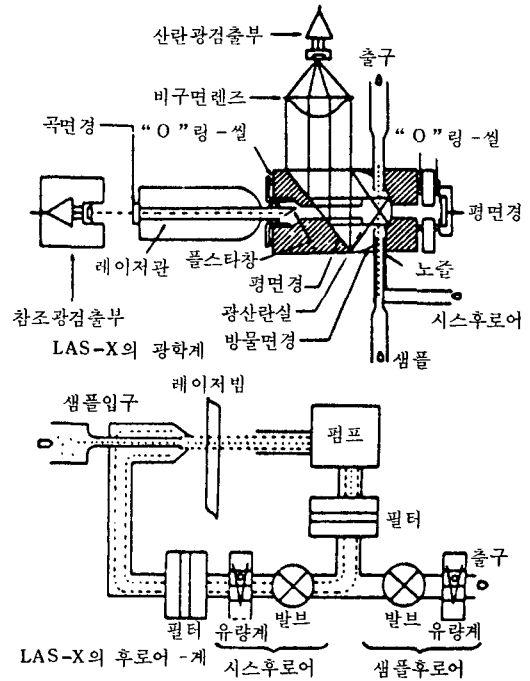


그림 10 최초로 $0.1\ \mu\text{m}$ 를 검출 가능케한 PMS사의 레이저 OPC (LAS-X형)

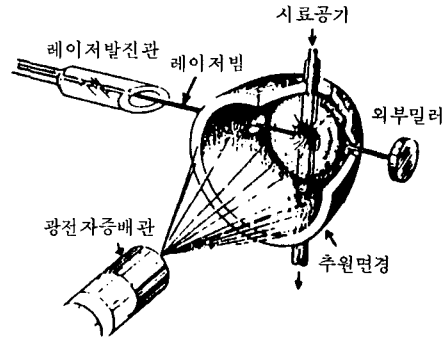


그림 11 추원면경을 사용한 레이저 OPC의 광학계

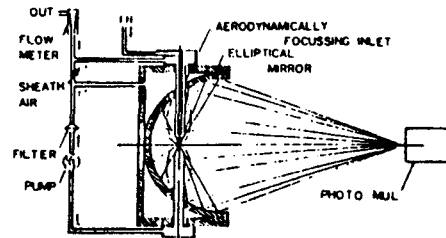


그림 12 추원면경을 사용한 레이저 OPC (KC-14)의 구성

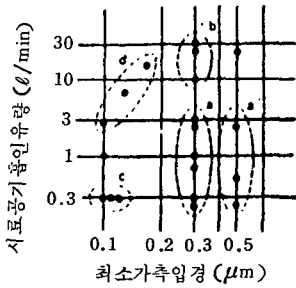


그림 13 현재시판되고 있는 OPC의 분류

수단의 류속의 상한은 실용적으로는 매초 300 m를 초과하기는 어려우며, 펌프의 형태나 중량이 장치의 편리성을 악화시키므로 한계가 있다. 그러므로 류속의 많음과 가측 입경의 하한은 상반되는 성능항목이다.

그림 13은 현재 시판되고 있는 파티클 카운터의 최소가측입경과 시료공기 흡입량과의 관계를 나타낸 도표이다. a와 a'는 저청정도를 측정 대상으로 설계된 제품들로서 파티클 카운터중에도 제일 저렴한 가격의 부류이다. 청정도가 높아짐에 따라 a, a'군으로는 계수치가 감소하는 크라스 100 정도의 청정도를 측정할 경우, 의미 있는 계수치를 얻기 위하여는 수십분에서 1시간 이상의 측정시간을 필요로 한다.

여기에서 개발된 것이 b군으로 시료공기의 흡입 능력을 크게 하여 단시간내에 고정정 구역의 측정 결과를 얻는 것이 가능하다. c, d 군은 초 LSI의 제조공정과 같은 특별히 높은 청정 환경의 측정에 쓰인다. 레이저를 광원으로한 고급 기종이다.

이들 중에서 a와 a'의 차이는 최소 가측 입경으로서 가격은 당연히 $a > a'$ 가 된다. 파티클 카운터의 상대적인 가격 형성의 비율은 시료 공기가 같은 경우에 최소 가측 입경에 반비례한다. 예를들면 입경 $0.1 \mu\text{m}$ 까지 계측 가능한 파티클 카운터는 $0.3 \mu\text{m}$ 이상 밖에 계측하는 카운터보다 3배의 고가이다. $0.5 \mu\text{m}$ 의 카운터는 $0.3 \mu\text{m}$ 의 카운터에 비하여 3/5 정도 저렴하다고 할 수 있다. 그러면 a군과 b군의 차이는 계측하는 입경의 한계는 같으

나 단위 시간내에 계측 가능한 공기량이 달라, 그 비율과 가격에는 어떤 상관관계가 있는가? 이것도 대충 a'군 중에도 1분간에 0.283ℓ (0.01CF)의 흡입능력 밖에 없는 제품과 2.83ℓ (0.1CF)의 카운터는 2배, 또한 28.3ℓ (1CF)의 장치는 약 4배의 차이가 있다. a군의 1ℓ 및 3ℓ 와 b군의 10ℓ 와 30ℓ 의 가격도 약 2배 정도 틀린다고 봐도 좋다.

2. 에어로졸계측 기술과 O. P. C의 위치

기체 중에 작은 입자가 부유하고 있는 분산계를 에어로졸이라고 한다. 일부에서 일컬어지고 있는 것과 같이 부유 입자 자체가 아니고 분산매체인 기체와 분산상은 교체거나 액체거나 혹은 생물 입자거나 기체 이외의 물질이 혼연 일체가 되어 있는 분산계의 형태를 표현하는 용어로서, 담배의 연기가 차 있는 회의실의 공기도, 상쾌한 산속의 공기도, 청정도가 다른 것뿐 모두 에어로졸이라고 할 수 있다. 단위 체적의 기체중에 부유하는 물질의 양을 농도로서 나타낼 경우 다음에 나타난 3종류의 방법이 있다.

- I) 물질 농도(g/m^3) 전체 부유 입자의 합계 중량(시료 채취할 때 입경의 상한을 규정)
- II) 개수 농도(개/ℓ) 부유 입자의 합계 개수(계수할 때 입경의 하한치를 규정한다.)
- III) 상대 농도 - 질량 혹은 개수 농도를 대응하는 적당한 물리량에 의하는 상대적인 지수치.

농도 계측은 입자를 기체 중에 부유시킨 상태에서 계측하는 방법과 기체와 입자를 분리 - 입자를 포집하여 고정시킨 후 계측하는 방법이 있다.

○ 비포집법의 특징

- a) 입자의 원상태가 변화(파쇄, 응집) 하지 않는다.
- b) 측정 결과의 즉시 응답성이 뛰어나다.
- c) 자동 연속 측정이 용이

○ 포집법의 특징

- a) 입자의 조성 분석이 가능
- b) 입경 질량에 대하여 직접 계측이 가능

표 1 계측법의 분류

(a) 포집법

$\left\{ \begin{array}{l} \text{여과형 에어 샘플러} \\ \text{충돌형 에어 샘플러} \\ \text{정전형 에어 샘플러} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{평 량 법} \\ \text{(질 량농도)} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{정밀 천평에 의한다.} \\ \text{압전 진동자의 공진주파 저하에 의한다.} \\ \beta \text{선의 흡수 감쇠도에 의한다.} \end{array} \right\}$
	$\left\{ \begin{array}{l} \text{계 수 법} \\ \text{(개수농도)} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{광학·전자현미경에 의한다.} \\ \text{확대된 상을 전자적으로 화상 처리} \\ \text{입자의 하전량으로 추정} \end{array} \right\}$

(b) 비포집법

$\left\{ \begin{array}{l} \text{포 토 메 터} \\ \text{(디지털 분진계)} \\ \text{파티클 카운터} \\ \text{(광산란식 입자 계수} \\ \text{기 CNC)} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{균 계 측 법} \\ \text{(상대농도)} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{광투과량의 감쇠도에 의한다.} \\ \text{광산란에 의한다.} \end{array} \right\}$
	$\left\{ \begin{array}{l} \text{개 계 측 법} \\ \text{(개수농도)} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{광산란에 의한다.} \\ \text{과포화 증기에 의한 입경 확대 광산란} \\ \text{에 의한 검출} \end{array} \right\}$

c) 형상에 대한 모양을 알 수 있다.

d) 입자의 상(고체, 액체)에 대한 판정이 가능

입자의 개별로 계측하는 방법으로는 개수 뿐만 아니라 입경도 알 수 있다(응축핵 계수기 : CNC를 제외하고). 그러나 여기에서 입경을 보는 원리적인 차이에 의하여 다음과 같이 3 종류의 “상당경”이 있어 같은 에어로졸을 동시에 계측하였을 때에 그 결과(입경 분포 등)는 꼭 일치하지 않는다.

가) 현미경 관찰에 의한 규격 계측(입자의 최대경)

나) 공기 동력학 상당경(기체중에 운동 특성에 의한)

다) 광산란 상당경(특정 굴절을 입자와 같은 광산란량)

계측의 목적에 따라 입자를 개별로 검출하여 계수하는 수단을, 아니면 전체로서 파악하는 방법을 택하는 가는 적절한 선택되지 않으면 안되나 선택의 기준은 주로 공간 농도에 의한다. 예를 들면 크린 룸이나 벤치와 같은 고정정도 공간에 대하여는 개별 검출 방식이 또

한 회의실의 담배 연기와 같은 환경에서는 전체로서의 방식이 적당하다.

개별 계측은 평판상에 표집된 입자를 현미경으로 계수하는 방법이 오래 전부터 행하여져 현재에도 개수 농도 계측의 기준법으로서 지위를 확보하고 있다. 그러나 현미경 시야로서 입자를 1개 1개 입경을 재면서 계수하는 작업은 측정자에게 매우 힘든 노동일 뿐만 아니라 측정치의 개인차도 커서 파티클 카운터와 같은 타각적인 자동 계측 장치가 개발되었다. 산란광 방식에서는 입자의 직경이 $0.1\mu\text{m}$ 이하가 되면 계측이 곤란하므로 특수한 수단에 의한 입자경을 확대하는 장치가 병용되었다.

전체 계측으로서 제일 일반적인 질량 농도의 기준 측정법은 여지위에 포집한 입자의 질량을 정밀 천평에 의하여 계산하는 방법이나 입자 포집에 장시간을 필요로 하는 것(평량 가능한 양을 포집하는 필요가 있어)과 평량 작업이 어려운 등의 단점이 많아 압전진동자상에 입자를 포집하여 그 진동수 저하에 의하여 입자 질량을 구하는 방법이나 방사선(β 선)의 투과 감쇠량이 누적한 입자의 질량에 비례하

는 등의 현상을 이용한 새로운 방법도 널리 사용되게 되었다.

3. OPC로서 얻어진 계측치가 가진 의미

일반적으로 길이나 질량, 온도, 전류등, 물리법칙에 따라 정하여진 측정량을 물리량, 소음 레벨이나 표면 측정과 같은 측정에 대한 약속 조건에 의하여 결정된 측정량은 공업량이라고 한다. 파티클 카운터에 의한 입경계측치는 후자에 속하며 어떤 가늘고 긴 입자라도 검은 그으름과 같은 물질도 굴절을 1.6으로 투명한 구형 입자가 산란하는 빛의 양도, 같은 값의 입경으로 환산한 계측치이다. 예를들면 소음이나 진동레벨은 공업량으로서 시민들이 미리 권리를 획득하여 특정 조건에 따라 계측된 양인 점은 상식으로 되어 있으나 파티클 카운터의 표시치를 물리량과 틀리게 이해하는 사람들이 의외로 많다.

「공기 중에 부유하는 입자의 직경과 개수 농도는 공업량으로서 파악하는 이외에는 방법이 없어, 따라서 진실된 값은 존재하지 않는다. 그러나 예전부터 행하여져 온 현미경에 의한 포집 관찰법이 일반적으로 개수 농도 계측에서 기준이 된 것이 많아 파티클 카운터와 현미경법 사이에 생기는 차이를 측정 원리상 어쩔수 없는 오차로서 열거하여 보면

- a) 입자 형상의 영향
- b) 입자의 광학적 성질(굴절률, 흡광도)의 영향
- c) 2개 이상의 입자가 동시에 검출역에 들어감에 의한 차이(동시 통과 손실이라고 함)
- d) 입경 판별 능력의 낮음(감도 교차의 크기)에 의한 영향(일반적으로 숫자에 한함)

이 4 항목 중에 a), b)는 공업량으로서의 계측상에 약속에 관한 것으로 c), d)의 항은 장치의 설계에 의하여 어느 정도 경감이 가능하여 본질적으로 제로가 되기에는 불가능하다.

이상은 측정 원리가 틀린 다른 방법과 차이의 원인에 대하여 알아 보았으나 같은 산란광에 의한 파티클 카운터도 계측치의 차이가

생긴다.

그 원인을 크게 나누어 보면

1) 장치 자체의 설계, 제조, 조정에 문제가 있다.

2) 장치의 취급이나 기종의 선정이 적절하지 않은 것.

등이 있다. 이것은 본래 정상으로 작동하는 파티클 카운터라면 계수치 N이어야 하는데 n으로 표시되어 오차라고 해도 좋다. 우선 장치 자체의 설계, 조정이 안되어 생기는 오차는,

- e) 미주 입자에 의한 틀린 계수
- f) 자발 내부 잡음에 의한 틀린 계수
- g) 외부 전기 잡음에 의한 틀린 계수
- h) 입경 판별치의 설정 오차
- i) 입자의 조사광 불통과, 검출 시야 협착에 의한 계측 불완전

우선 e)의 미주입자는 시료 공기의 흐름이 어지럽기 때문에 한번 조사영역을 통과한 입자 중에 일부의 입자가 다시 조사 영역속으로 들어와 정상이면 그림 14와 같은 모양이 되어야 할 응답 신호가 그림 15와 같은 이상한 펄스 폭이 긴 포물선을 그린다. 그림 16은 입자

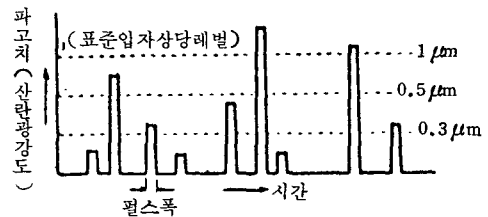


그림 14 정상적인 OPC의 응답신호파형 (모식도)

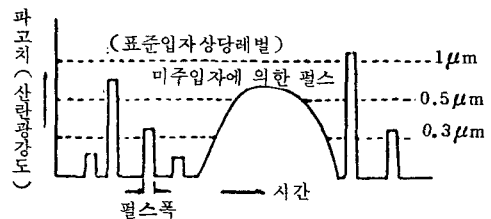


그림 15 입자의 미주가 일어나고 있는 OPC의 응답신호파형 (모식도)

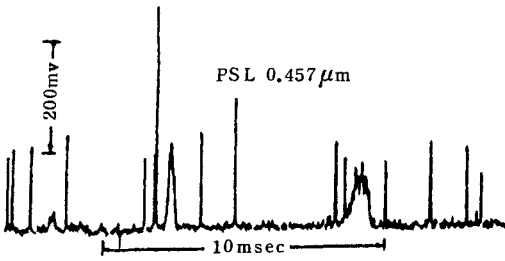


그림 16 입자의 미주가 일어나고 있는 OPC의 응답신호파형

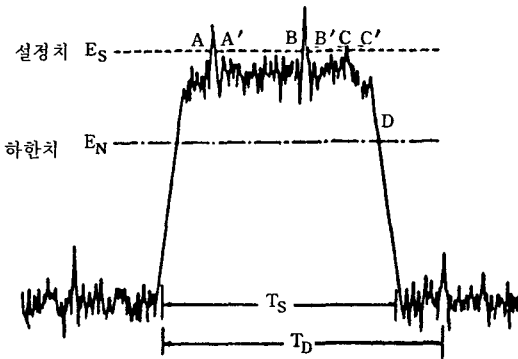


그림 17 신호펄스에 중복지된 난음파형의 영향

의 미주가 일어나고 있는 장치의 실제 모양으로서 미주 입자에 의한 긴 펄스에 자체 잡음이 중복되기 때문에 과잉 계수치는 1개의 입자에 대하여 여러번 카운트되는 경우도 있다. f)의 자체 내부 잡음에 의한 거짓 계수는 잡음의 제일 높은 파고치가 그대로 입경 판별기의 제일 낮은 설정치를 넘어서 발생하는 한편 그림 17에 나타난 것과 같이 입자의 응답 펄스에 잡음이 중복되어 1개의 펄스를 여러번(그림의 예로는 A-A', B-B', C-C'로 3회) 계수하는 현상으로 장치의 적절한 신호처리가 실시되지 않는 경우가 나타난다. g)의 거짓 계수는 파티클 카운터를 사용하는 환경이 변화하거나(공장의 레이아웃의 변경 등) 새로운 제조 설비(초음파 가공기, 세척기 혹은 고주파나 방전을 이용한 대형 장치 등)를 도입한 직후에 빈번히 나타나는 예가 많다. 고정정구역에 놓인 카운터는 돌연 이유 불명한

계수를 나타낼 때가 있어 장치의 고장으로 오해된다. 한도를 초과한 강력한 외래 잡음에 대하여 튜닝을 없앤 AM라디오(포터블)을 써서 발생원을 찾아내 잡음 자체의 발생을 억제하는 것이 바람직하다.

h), i)는 장치에 대하여 전문적인 지식이 필요하여 사용자의 입장에서 이항목에 해당하는 오차의 발생 여부를 판정하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 판정 능력이 있는 기관에 의하여 장치의 성능이나 기능에 대하여 검정을 실시하여 사용자가 안심하고 파티클 카운터를 사용하도록 하는 시스템이 확립됨이 바람직하다.

다음은 사용자측의 책임이 있는, 취급이나 장치의 기종 선정이 잘못된 원인으로 발생하는 오차로서는

- j) 샘플링관의 입자 침착
- k) 시료 공기량의 계량 실수

l) 계수치가 너무 적은데서 오는 통계학적인 오차

에어로졸은 Colloid 상태의 분산계로서 그 특성의 내용은 시간적이나 공간적으로도 항상 변동하고 있는 불안정한 존재이다. 특히 가는 공간이나 관을 통과시키면 예외없이 그 특성은 변화한다. 측정을 할 경우 가능한 한 샘플링 관은 사용하지 않고 할 수 없는 경우에 가능한 한 짧게할 필요가 있다. 특히 1-5 μ m 정도의 입자는 중력에 따라 침강하는 속도가 빠르기 때문에 수평으로 놓인 내경 5mm의 관 속을 10초 정도 걸려서 대기가 통과할 경우, 입자수는 1/2이하가 되어 정확한 입경 분포를 알 수가 없다.

다음으로 시료 공기 흡입량이 계측하려 하는 청정도와 맞지 않는 장치로 계측할 경우, 1회 측정으로 얻어진 계수치가 실제와 많은 차이가 나는 경우가 많다. 예를 들어 용적이 283 m^3 (10,000 ft^3)의 크린 룸에 100만개의 입자가 부유하고 있는 경우, 이 실내의 1 ft^3 당 평균계수는 100개이며, 10,000으로 등분된 각각의 영역중에 거의 6,830개의 영역에 대하여 $100 \pm \sqrt{100}$, 즉 90~110개의 범위내에

있는 것이 통계학적으로 말할 수 있다. 혹시 그 크린 룸을 파티클 카운터로서 0.1ft³만 샘플링하여 입자수를 계수하면 약 68%의 확률로서 7~13개를 나타내게 된다. 이에와 같이 계수치가 너무 적은 경우, 측정 시간을 연장하는 수단에 의하여 적어도 3자리수의 계수치를 얻어야 한다(장시간 측정하는 방법에서는 농도 변동에 대한 정보는 모두 평균화되어 소멸된다. 정확한 측정을 위하여는 시료 공기의 입자 개수 농도에 맞는 Sampling rate를 갖춘 장치를 사용하는 이외의 방법은 없다.).

4. 비판되고 있는 OPC의 문제점

사용자의 입장에서 파티클 카운터를 보던 어쨌든 시료 공기에 의하여 자동적으로 숫자가 나타나는 Black box로서 눈을 통하여 1개씩 세던 현미경법 시대와 비교할 수 없을 정도로 측정이 용이한 반면에 얻어진 수치를 어디까지 믿을 수 있을까 하고 불안한 걱정을 버릴 수 없는 사람도 많지 않을까? Black box속의 진실한 모습을 아는 것은 공기 청정 기술에 종사하는 사람으로서 필요하다고 생각되어 여기에서 비판되는 파티클 카운터의 실상을 연구하여 보자.

정상적으로 설계되고 조정된 파티클 카운터라면 당연히 계수되어야 할 값이 카운트되지 않고, 또한 반대로 실체가 아닌 카운트가 나타나는 장치가 당당히 통용되는 경우가 있다. 더구나 고의인지 우연인지 최소가측 입경에서의 파고 판별 설정치를 카다룩에 나타난 대로의 정당한 치를 설정하지 않은 데서 오는 계수 실수를 또한 전장의 e)에서 말한 미주입자에 의한 중복 계수 효과와 조합시킴에 의하여 사용자가 옥외 대기 등에 분포되어 있는 에어로졸을 계측하여 보면 좀더 나은 측정치를 얻을 수 있게 되어 있는 장치도 있다. 물론 그러한 장치에 의한 계측치는 측정 대상의 실체를 표시할 수 없을 뿐만 아니라 모르고 사용하면 현실에는 존재하는 입자를 보지 못하기 때문에 뜻하지 않은 장해(제품의 판매 부

진이나 신뢰도의 저하)가 나타날 위험성이 있다. 파티클 카운터에서는 검출 가능한 입자경의 한계가 중요한 성능으로서 각 메이커가 서로 그 한계를 확장하려고 노력하고 있다. 파티클 카운터는 공업용 계측기로서는 수수께끼와 같은 존재로서 성능이나 기능에 대하여 JIS에는 존재하나 실제의 제품에 대하여는 유감스럽게 효력을 발휘 한다고는 할 수 없다(최근 서독의 J. Gebhart 등에 의해 발표된 몇가지의 파티클 카운터에 관한 실상보고를 참고하십시오).

Particle Counter의 감도와 광원과의 관계

공기중에 부유하고 있는 입자를 통상의 상태로 직접 관찰하는 것은 곤란하나 암실에서 가늘고 강한 광선을 비추면 작은 광점이 되어 움직이는 것을 볼 수가 있다. 이것이 광산란에 의한 부유입자 계측법의 원리이다.

전구를 광원으로 한 Particle Counter는 시료공기를 청정공기로 붓뚜껑처럼 쌓아서 조사광과 교차시키는 구조로 되어 있다(그림 1).

그림 2에 Particle Counter의 측면 산란방식에 의한 백색 광원 입자 검출부의 구조를 나타낸다. 조사영역을 통과하는 시료공기중의 입자에 의하여 산란된 빛은 렌즈로 모여져 포토 멀티 프라이어(광전자 증배관)로 보내진다.

여기에서 산란광은 그림 3과 같이 전기 신호로 변환한다.

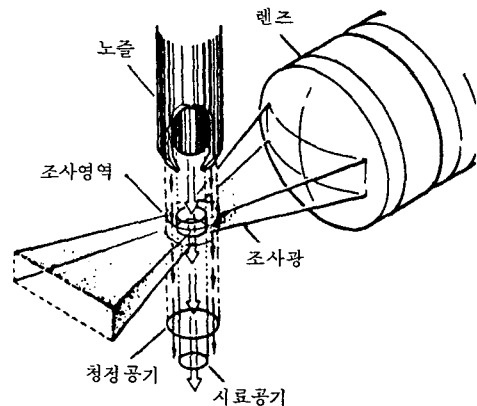


그림 1 시료공기 기류와 조사광의 교차

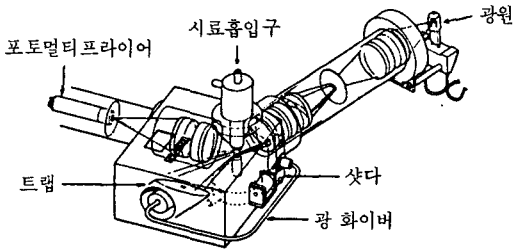


그림 2 입자검출부의 구조

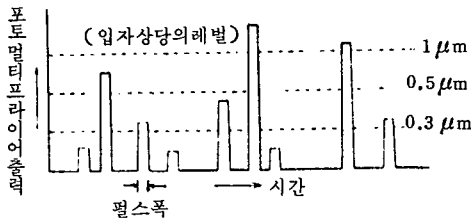


그림 3 광전자 증배관의 출력신호

입자에 의한 산란광의 양과 입자의 직경에는 일정한 관계가 있다. 그래서 전자 현미경으로 측정하여 직경을 알 수 있는 것이다. 크기가 일정한 표준입자를 검출부로 보내 포토 멀티 프라이어의 출력에 나타난 Pulse 신호의 높이를 읽어서 Particle Counter의 입경 분별기능을 초과하는 값을 결정할 수 있다. 그러나 광원의 밝기가 변화하면 동일직경 입자에 의한 산란광의 양도 변하여 정확한 입경측정이 불가능해진다. 이를 위하여 Particle Counter는 입자 검출부에 자동 감도 조정기능을 갖추고 있다.

그림 2로 이 감도 조정 기능을 설명하면 조사영역을 통과한 조사광은 Trap(광을 흡수하는 기구)에 도달하여 이곳에서 소멸 되는데 Trap에는 작은 창이 있어 조사광의 일부를 받아서 내보내도록 되어 있다. 이 빛은 광 Fiber로 집광계(산란광을 검출하는 광학계) 광축으로 보내진다. 입자 측정중 이 빛은 Shutter에 의하여 차단되어 집광계로 들어가지 않지만 입자 검출부의 감도조정의 시간에는 Shutter가 단시간 동안 열려 집광계로 직접 들어간다. 이 집광계에 대하여 입자 검출부의

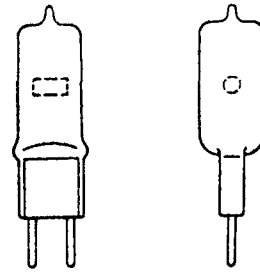


그림 4 할로겐 램프의 외관

전기적 반응의 크기를 판정하여 그 값이 일정하게 하도록 포토 멀티 프라이어의 감도를 조정한다.

예를들면 광원의 밝기가 저하된 경우에는 광 Fiber를 통해 포토 멀티 프라이어에 도달한 빛의 양도 적어져 포토 멀티 프라이어의 출력도 저하된다. 이 출력신호의 크기가 기준 Level (Vcal, 광원이 어두어지기 이전의 수준)이 되도록 포토 멀티 프라이어의 감도를 증가시켜 밝기의 저하를 보완한다.

광원 전구의 수명이 다됐던가 단선에 의하여 교환할 경우에는 광량이 변하지만 자동 감도 조정 기능에 의하여 어느 정도 범위내의 오차를 허용한다며는 본래의 입경판별 감도가 감하게는 할 수 있다. 그러나 전구마다의 차이 때문에 본래와 같은 상태가 된다고는 보증할 수 없다. 따라서 전구를 교환한 경우에는 꼭 표준입자에 의한 입경판별기능의 기본 교정을 해야 한다.

그림 4는 Particle Counter의 광원에 쓰이는 Halogen Lamp의 외관이다. 이 Lamp의 Filament를 확인하여 보면 그림 5의 사진과 같은 Maker의 동일 형식의 제품에도 Coil부의 길이나 깊이가 모두 틀리는 것을 알 수 있다. 또한 Filament Coil의 감긴 축의 방향에 따라 밝기를 측정하면 그림 5의 그래프와 같다. 그래프의 종축은 밝기를 나타내며 Lamp에 따라 Filament의 부분마다의 밝기가 크게 차이가 남을 알 수 있다.

Particle Counter의 자동 감도 조정의 경우 조사광의 극히 일부만 주입되어 그 부분

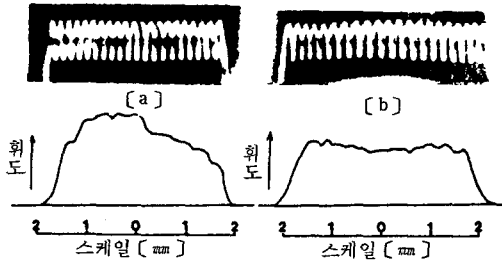


그림 5 할로겐 램프 필라멘트의 확대그림과 빛 확산의 분포도

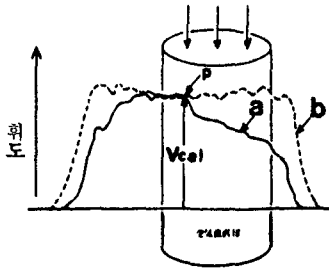


그림 6 조사광 강도의 검출점과 시료 기류의 관계

의 밝기만 대상으로 하여 조정되고 만다. 예를들면 그림 5의 A와 같은 특성을 가진 Lamp의 중심부(Scale O의 위치)와 (b)의 중심부의 밝기를 비교하면 1:0.6이 된다. 이 부분(그림 6의 P점)에서 감도 조정이 되는 경우 Lamp (a)를 (b)로 바꾸면 포토 멀티 프라이어

의 감도를 Vcal의 값이 같아지도록 하여 (b)의 Filament의 밝기가 그림 6의 점선으로 나타난 분포가 되도록 결정된다. 따라서 교환하는 2개의 Lamp의 밝기 분포가 비슷하면 입자에 대한 감도는 거의 변화하지 않지만 여기에 나타난 예와 같이 극단적으로 틀린 경우에는 조사광과 시료 공기의 흐름의 상대적인 교차 위치에 따라서는 Vcal의 값을 같도록 하였어도 입자에 대한 감도가 변화하여 표준입자를 사용한 시험이 아니면 검출이 불가능하다.

따라서 Particle Counter에 의한 청정도 측정에 있어서 그 측정치의 정확성을 기하기 위하여는 년 1회 이상의 정기점검을 계속 실시하는 것이 중요하다.

※ Halogen Lamp에 대하여

Halogen Lamp는 보통의 전구와 같이 관내가 진공이 아니며 미량의 Halogen Gas가 봉입되어 있다. Halogen Gas가 Filament에 의하여 뜨거워져 관내를 대류할 때 증발한 Tungsten의 금속 증기와 Gas 분자가 결합하고 다시 금속원자만이 고온의 Filament 표면으로 회귀하는 Halogen Cycle이라고 하는 현상이 일어나 Filament의 노화(증발에 의한 Filament의 가늘어짐)를 억제한다. 이 때문에 고온으로 장시간 점등 되는 점이 이 Lamp의 특징이다.