

〈論 文〉

광학 입자 계수기의 응답특성 및 오계수에 관한 연구

안강호* · 이재현**

(1991년 8월 26일 접수)

A Study of Response Characteristics and False Counts in Optical Particle Counter

Kang-Ho Ahn and Jae-Heon Lee

Key Words : Optical Particle Counter(광학입자계수기), Mie Scattering(미산란), Response Characteristics(응답특성), False Count(오 계수)

Abstract

Response characteristics and false counts of laser and white light optical particle counters (OPC) have been studied as a function of particle size using monodisperse polystyrene latex (PSL) particles. Theoretical light scattering calculations for He-Ne laser based counter have been compared with the experimental results and thus good agreements have been found. The light scattering intensity in monochromatic light shows an oscillatory character for the transparent and spherical particles of PSL due to Mie resonance. Because of this effect, the response of the LAS-X OPC showed almost same responses in the diameter ranges of $0.4 \mu\text{m}$ to $0.6 \mu\text{m}$ and $0.7 \mu\text{m}$ to $1.0 \mu\text{m}$ for PSL particles. A laser optical particle counter with high flow rate applied for clean room has been studied to identify the noise sources. Three different manufacturer's clean room optical particle counters also have been tested to measure the background noise level.

기 호 설 명

- D_p : 입자의 직경
- $I(\theta)$: 입자에서 θ 방향으로 R 만큼 떨어진 곳에서 빛의 강도
- I_0 : 입사광의 강도
- i_1 : 산란빛의 수직방향 미(Mie) 강도 계수
- i_2 : 산란빛의 수평방향 미(Mie) 강도 계수
- m : 굴절계수
- R : 거리
- λ : 빛의 파장
- α : 크기 매개 변수(size parameter = $\pi D_p / \lambda$)

1. 서 론

클린룸의 청정도 측정, 대기 오염 측정, 혹은 그 외 입자 오염이 제품의 질이나 작업원의 건강에 영향을 미치는 곳의 청정도 측정시 가장 많이 사용되는 측정계기로 광학 입자 계수기(optical particle counter; OPC)와 응축핵 계수기(condensation nucleus counter; CNC)를 들 수 있다. 특히, 입자갯수 측정을 위하여 OPC가 가장 널리 사용되고 있다. 이는 입자크기(분포)와 입자 갯수를 동시에 측정할 수 있으며, 일반적으로 조작이 간단하기 때문이다. OPC의 기본 작동원리는 레이저나 백색광원 빔을 통과하는 하나의 입자가 산란시킨 빛의 강도를 포토멀티플라이어(photo-multiplier)로 측정함으로써

*정회원, 생산기술연구원

**정회원, 한양대학교 기계공학과

입자의 크기를 알아내며 이를 계수함으로써 입자의 갯수를 측정하는 것이다. 이 때 입자에 의하여 산란된 빛의 강도는 입자의 크기, 모양 그리고 굴절 계수의 함수이므로, OPC는 측정입자가 산란시킨 빛의 강도를 표준입자가 산란 시킨 빛의 강도와 비교하여 측정 입자의 크기를 결정하게 된다.

현재 클린룸제작후 혹은 작동시 이의 성능을 평가하기 위하여 OPC가 널리 사용되고 있다. 그러나 대부분의 경우, OPC제작사가 자체적으로 설정한 기준에 의하여 지시되는 계기의 지시치를 수정 없이 인정하고 수용하는 현실이다. 예를들면, 표준 입자를 이용하여 입자의 크기를 측정하는 경우에도 여러가지 OPC마다 엇갈린 측정결과가 나올 수 있으며 극단적인 경우 계기 전체의 신뢰성에 의심을 가지기도 한다. 따라서 각 계기 마다 입자의 크기와 계기의 출력력을 연관짓는 응답특성을 미리 알아야 할 필요가 있다. 아울러 클래스 1혹은 그 이하의 클린룸에서는 입자농도가 매우 낮으므로 측정하는 계기 자체내에서 오계수(false count)가 없어야 하거나 실제장치에서는 불가피하게 발생되므로 사용하는 계기의 오 계수 정도를 미리 알고 있어야 할 필요성이 있다.

광학계수기의 응답특성을 정확하게 알지 못했을 경우에 생길 수 있는 혼란으로 크게 2가지를 들 수 있다. 첫 째는 계측기마다 서로 다른 입자농도를 나타내므로 정확한 입자농도의 판정이 어려워 진다. 그 이유는 광학입자 계수기의 계수 효율(counting efficiency)이 계수기의 측정한계(detection limit) 근처에서 (주로 $0.1\mu\text{m} \sim 0.3\mu\text{m}$ 의 입자직경) 급격히 떨어 지는데, 클린룸 내에는 일반적으로 많은 입자들이 이 측정한계 부근에 존재하므로(Liu, et al.)⁽¹⁾ OPC의 계수 효율에 따라 입자의 계수 값이 달라 클린룸 클래스 판정에 어려움이 있기 때문이다. 최근들어 생산되는 대부분의 OPC는 입자 크기의 측정 영역을 넓히기 위하여 주로 레이저 광원을 사용하며, 신호대 잡음비(signal to noise ratio)를 증대시키거나 혹은 후면 잡음(background noise)을 낮춤으로써 보다 더 작은 입자를 측정할 수 있도록 설계된다. 이 후면 잡음은 광산란체적(light scattering volume) 내의 공기 분자에 의한 라일리히 산란(rayleigh scattering)과 계기의 전기적 잡음에 의해 야기되기도 하고, 이 외에 샷노이즈(shot noise) 혹은 방사능에 의한 계수가 OPC의 오 계수의 원인이 되기도 한다. 반도체 산

업의 급속한 발달에 의해 클래스 1 혹은 클래스 1 이하의 클린룸을 필요로 함에 따라 OPC의 오 계수는 크린룸의 청정도 측정에 매우 중요한 문제로 대두되고 있으나 OPC 잡음의 원인에 대하여 명확한 결론을 내리지 못하고 있다.

두 번째 생길 수 있는 혼란은 입자 크기분포의 판정에 혼돈을 가져오는 경우이다. 광학계수기 제작사마다 자기 다른 광학구조를 갖는 OPC를 제작하기 때문에 대기중의 부유입자와 같은 표준입자가 아닌 입자를 측정하는 경우에 계측기마다 서로 다른 입자분포도를 보여주게 된다. 이와 같은 문제점들을 이해하기 위해서는 측정 데이터 해석시 사용된 OPC의 응답 특성을 미리 알 필요가 있으며 이에 따라 보다 정확한 판단을 내릴 수 있게 된다.

OPC의 응답특성에 관한 연구는 최근들어 활발히 진행되었으며, 백색광원 OPC의 응답 특성에 대해서는 Cooke and Kerker⁽²⁾, Liu, et al⁽³⁾, Marple and Rubow⁽⁴⁾, willeke and Liu⁽⁵⁾, 그리고 Whitby and Willeke⁽⁶⁾ 등에 의해 연구가 되었으며 최근 들어 많이 사용하기 시작한 레이저 OPC의 특성은 Liu, et al⁽⁷⁾, Liu et al⁽⁸⁾, 그리고 Szymanski and Liu⁽⁹⁾ 등에 의하여 이론과 실험양면에 걸쳐 연구되었다.

본 연구에서는 Climet사의 백색광원 OPC인 CI-226와 PMS사의 laser 광원 OPC인 LAS-X 및 HS-LAS의 응답특성을 측정하여 제작사가 제시한 응답특성과 비교하여 그 정확성을 논하였으며 아울러 고유량(high flow rate) Clean Room용 OPC인 Climet CI-7300, Met One 200, Hiac/Royco5120 등 3가지 장치에 관한 오계수의 원인을 밝히고자 하였다.

2. 응답특성 측정장치 및 실험

응답특성 측정실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 화살표는 유체의 흐름을, 그리고 점선은 전기 배선을 뜻한다. 압축공기(약 2.5기압)가 필터를 통과한후 입자분무기(atomizer) 내의 PSL(polystylen latex) 용액을 무화시켜 PSL 입자를 발생시킨다. 이 PSL 입자는 실리카 젤 확산 건조기(silica gel diffusion drier)를 통과하며 건조되어 원래의 입자 크기를 유지하게 된다. 본 실험에서는 입자 크기가 서로 다른 7가지의 PSL 용액을 사용하였다. PSL 용액 제조방법은 참고문

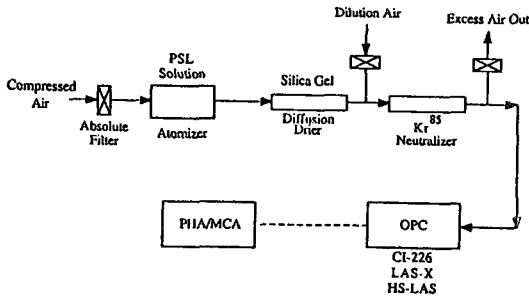


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for optical particle counter

현⁽¹⁰⁾에 자세히 기술되어 있다. 이 PSL 입자농도가 원하는 농도보다 높을 경우에는 PSL 용액을 물로 희석시키거나, 혹은 희석 공기(dilution air)를 섞어 입자의 농도를 낮추었으며 전자의 경우가 보다 더 효과적이었다. 건조된 PSL 입자는 높은 정전기를 띄게 되므로 방사능 발생장치인 Kr⁸⁵나 Po²¹⁰ 등의 전기중화 장치(neutralizer)로 PSL 입자의 하전량을 감소시킨다. 이는 샘플링 라인 내에서 정전기로 인한 PSL 입자의 불규칙한 손실을 줄이기 위한 것이다. 이 PSL 입자는 OPC(CI-226, LAS-X, 혹은 HS-LAS)로 유입되며 OPC는 입자의 크기와 갯수에 관계되는 시그널을 출력시킨다. CI-226과 LAS-X의 아날로그 시그널은 다채널 분석기(multi-channel analyzer, MCA, 혹은 pulse height analyzer, PHA)인 Nuclear Data ND65로 받아 시그널을 분석하였다. 본 실험에 사용한 MCA는 1 mV의 분해능력이 있으며, 각 입자의 펄스 높이에 해당하는 전압을 그에 상응하는 채널에 수용하게 된다. 예를 들면, 어떤 입자가 110mV에 해당하는 아날로그 펄스를 발생시켰다면 MCA의 110번째 채널에 1카운트를 저장하게 된다. 그외에 HS-LAS에서는 장치내에 내장된 입자분포 출력장치에 의하여 자료가 분석된다.

2.1 광학 입자계수기의 광산란 이론

입자에 의한 빛의 산란에는 크게 2 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 입자의 크기가 빛의 파장에 비해 매우 작을 때, 즉 크기 매개 변수(size parameter; $a = \pi D_p / \lambda$)가 약 0.2 보다 작은 경우의 라일리히(Rayleigh) 산란이다. 예를 들면 공기분자에 의한 가시광선의 산란이 이 경우에 해당된다. 둘째는, 크기 매개 변수 a 가 1보다 크거나 같은 경우의 미(Mie) 산란이다.

라일리히 산란에 의해 산란된 빛의 양은 아래와 같이 표시된다⁽¹¹⁾.

$$I(\theta) = I_0 \frac{\pi^4 D_p^6}{8 R^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (1)$$

여기서 $I(\theta)$ 는 입자에서 θ 방향으로 산란된 빛의 강도며, R 은 입자에서 수광기 렌즈까지의 거리, I_0 는 입사광의 강도, D_p 는 입자의 직경, λ 는 빛의 파장, m 은 입자의 굴절계수이다. 라일리히 산란의 특성은 빛의 전면 산란 양과 후면 산란 양이 같으며 산란된 빛의 양은 입자직경의 6승에 비례한다는 것이다.

미(Mie) 산란 이론은 맥스웰(Maxwell)의 전자파 이론에서 나온 것으로서, 빛을 흡수하거나 흡수하지 않는 구형입자, 그리고 모든 α 값에 적용시킬 수 있다. 즉, 라일리히 산란 범위까지도 포함한다. 미(Mie) 산란 방정식은 아래와 같이 표시된다⁽¹¹⁾.

$$I(\theta) = I_0 \frac{\lambda^2}{8 \pi^2 R^2} (i_1 + i_2) \quad (2)$$

여기서 i_1 및 i_2 는 산란되는 빛의 두 편광 방향(수직, 수평)의 미 강도 계수로서 m , a , 그리고 θ 의 함수이며 Legendre Polynomial과 Bessel Function을 포함한 복잡한 무한 급수로 표시된다. 미(Mie) 산란의 특성은 입자에 의한 산란 강도가 산란각도의 함수로 매우 복잡한 형태를 가지며 전반 산란 양이 항상 후방 산란양 보다 많다는 것이다.

2.2 OPC의 응답특성 실험

OPC가 측정 한 입자의 크기를 출력하는 방법에는 2가지가 있으며, 아날로그 펄스(analog pulse)로 출력하는 방법과 입자크기에 해당하는 채널로 출력하는 방법이 그 것이다. 본 논문에서는 표준입자로서 PSL 입자를 사용하여, 아날로그 펄스 출력 방식을 사용하는 PMS사의 LAS-X, Climet 사의 CI-226 그리고 채널 출력방식을 사용하는 PMS사의 HS-LAS의 응답 특성을 규명하였다.

Fig. 2에는 LAS-X OPC의 응답특성으로서 입자 직경에 따른 이론 및 실험적인 총산란 강도를 나타 내었다. 그림에서 실선과 점선은 각각 PSL 입자($m = 1.592 - 0.01i$, i 는 허수)와 카본블랙 입자($m = 1.775 - 0.508i$)로부터의 이론적 결과이며 He-Ne laser 광원의 파장 $0.6328 \mu m$, LAS-X OPC의 집광 각도인 $35 \sim 120$ 도 범위에 대해 식(2)를 적용하여 얻었다. 적분계산에 사용된 프로그램은 Szymans-

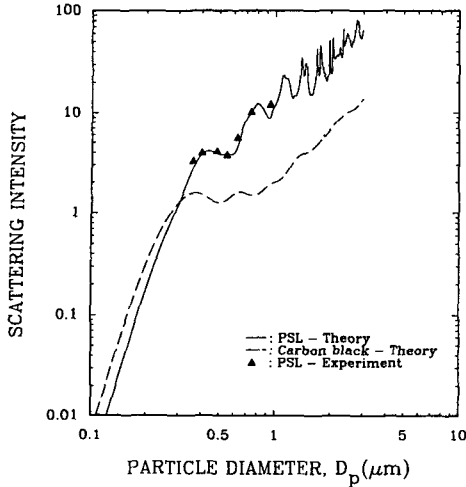


Fig. 2 Theoretical and experimental responses of the LAS-X OPC

ki^(6,9)의 것을 사용하였다. 여기서 종축은 무차원 산란강도 값을 나타내며, 횡축은 입자의 직경을 나타낸다. PSL입자와 카본 블랙 입자의 산란 강도 곡선에서 입자크기가 약 0.3 μm 보다 작을 경우 카본 블랙 입자가 PSL입자보다 더 많은 빛을 산란시키는 것을 볼 수 있다. 그리고, 카본 블랙 입자의 경우 0.3 μm 에서 0.8 μm 범위내의 입자는 거의 구분할 수 없을 정도로 산란된 빛의 양이 입자크기에 비례하지 않음을 볼 수 있다. 이와 비슷한 현상은 Szymanski and Liu⁽⁹⁾의 메틸렌 블루(Methylene Blue)입자를 이용한 산란특성 실험에서도 관측된 바 있다. 그림에서 삼각형은 PSL입자에 관한 본 연구에서의 실험값을 나타내며 Fig. 1 실험 장치도의 LAS-X OPC와 ND65 MCA를 사용하여 얻어진 결과이다.

여기서 실험결과와 이론이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. PSL입자의 이론적 산란 강도값을 보면 입자 크기가 약 0.4 μm 보다 큰 부분 부터 Mie Resonance라 칭하는 매우 심한 변동을 보이기 시작한다. 이런 현상은 PSL 입자와 같은 투명한 입자에서 볼 수 있는데, 카본 블랙 같이 빛을 흡수하는 입자는 투명한 입자에 비해 입자 크기에 따른 산란 강도값의 심한 변동을 보이지 않는다.

이와 같이 투명한 입자에 생기는 미 공진(Mie Resonance) 현상은 같은 산란강도에서 서로 다른 입자 직경 값을 갖게 되므로, 이 영역에서 측정할

입자의 크기가 실제 입자 크기와 다른 값을 가질 수 있음을 의미한다. 이는 그림에서 보듯이 직경 0.6 μm 과 직경 1.0 μm PSL입자가 LAS-X OPC에 의해서는 0.4 μm 으로 각각 측정 될 수 있다는 것이다. 따라서 LAS-X로 PSL입자와 같은 투명한 입자를 측정할 때 0.4 μm ~0.6 μm 범위 및 0.7 μm ~1.0 μm 범위에서의 정확한 입자크기 측정은 어렵다고 할 수 있다.

Fig. 3에서는 백색 광원 OPC인 CI-226을 대상으로 하여 응답특성을 실험적으로 측정된 결과를 제조자가 제시한 응답특성실험과 비교하여 나타내었다. 횡축은 PSL 입자의 직경을 나타내고, 종축은 OPC의 전기적 신호값을 나타낸다. 오차선(error bar)은 측정되는 펄스분포 폭의 $\pm 1\sigma$ (σ : 표준편차)를 표시한 것이다. 여기서 보면 4.5 μm PSL 입자의 경우 약 1 μm 정도 크게 측정되었으나 전체적으로 보아 본 연구에서의 실험결과가 제조업자의 특성 곡선과 일반적으로 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 직경이 0.399 μm 인 PSL입자의 경우에는 그 펄스 분포 1.09 μm 직경의 PSL입자 혹은 4.5 μm 직경의 PSL입자 펄스 분포 폭보다 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 OPC가 직경 0.399 μm PSL 입자를 실제의 입자크기보다 크거나 혹은 작게 측정할 확률이 높음을 의미한다. 따라서 작은 입자 범위에서는 이 OPC의 입자 분해능력이 감소함을 알 수 있다.

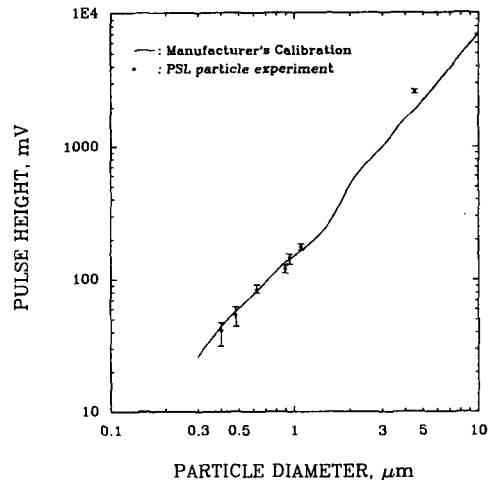


Fig. 3 Comparison with manufacturer's calibration curve and PLS experimental data for Climet CI-226 pulse height

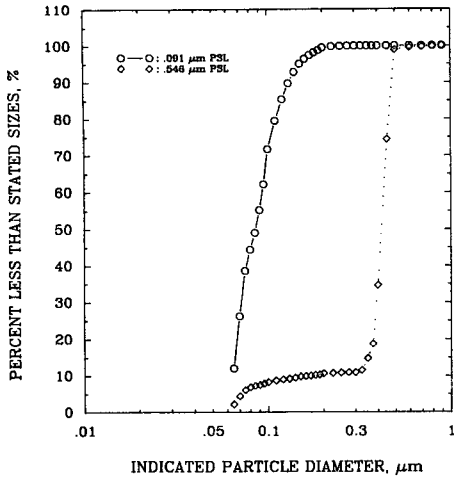


Fig. 4 Size distribution cumulative plots of 0.091 μm and 0.546 μm PSL particles in HS-LAS OPC

단색 광원 OPC의 PMS사의 HS-LAS는 입자분포 표시장치가 내장되었으므로, 아날로그 펄스를 발생시키는 CI-226의 특성 측정방법과는 다르다. 본 실험에 사용한 HS-LAS는 지름이 0.065 μm 보다 큰 입자를 32개 채널로 나눠 표시한다. Fig. 4는 직경 0.091 μm 과 직경 0.546 μm 인 두가지 PSL 표준입자의 크기를 HS-LAS에 의하여 측정하는 것이다. 그림에서 “o”은 직경 0.091 μm , “◇”는 직경 0.546 μm 인 PSL입자에 관한 자료를 각각 나타내며, 횡축은 HS-LAS에서 32개로 분류되는 각 채널에 해당되는 입자의 지시 직경을 나타낸다. 종축은 측정되는 입자의 갯수를 적산한 퍼센트로 나타낸다. 예를 들어, 횡축의 지시 직경 0.1 μm 에서 실제 직경 0.091 μm 인 PSL입자의 “o”포에 해당되는 종축의 y값은 72% 인데, 이는 직경 0.1 μm 이하의 입자 갯수가 측정된 전체 입자 갯수의 72%임을 나타낸다. 그림에서 보면 0.091 μm 과 0.546 μm 의 직경을 가진 PSL입자의 자료가 모두 bi-modal 분포를 보이고 있다. 특히 0.07 μm 의 지시 직경 근처에서 하나의 모드(mode)를 보여 주고 있다. 이는 PSL 용액 자체 혹은 초 순수(de-ionized water) 자체가 갖고 있는 불순물에 의하여 형성된 잔류 입자의 영향으로 보여진다. 그림에서 직경 0.091 μm 과 직경 0.546 μm 인 PSL입자의 적산 퍼센트가 50% 되는 지시직경은 각각 0.086 μm 과 0.42 μm 임을 알 수 있으며 이는 원래 PSL입자크기 보다 각각 5.5% 및 23.1% 정도 작게 나타났음을 알 수

있다. 이와 같이 본래의 실제 입자크기와 다르게 OPC가 입자의 직경을 측정하는 이유는 미(Mie) Resonance에 의해 나타난 것으로 판단된다.

위의 3가지 OPC의 특성 실험결과 각각의 OPC마다 입자크기 측정의 정확도에 문제가 있음을 알 수 있다. 본 실험에서 OPC 자체의 지시 직경은 laser 광원인 경우 미(Mie) Resonance 영역 부분에서 입자크기가 최대 50% 정도 불확실한 값을 보여 주었다. 특히 OPC 자체가 PSL 입자의 산란 강도를 기준으로 입자의 지시 직경을 나타내므로 입자의 산란 계수가 알려져 있지 않은 일반 대기중 입자나 클린룸내의 입자 크기를 해석하는데 유의하여야 한다고 판단된다.

2.3 오계수 원인분석

입자 측정에서 가장 중요한 2개의 변수는 입자크기와 입자 갯수 측정의 정확도이다. 앞에서는 OPC의 입자크기측정 정확도에 관해 백색광원 및 단색 광원 레이저 OPC들에 대해 실험하였다. 여기에서는 OPC 입자 갯수 측정의 정확도에 영향을 미치는 오계수 정도를 실험으로 측정하고 오계수의 원인에 대하여 검토하고자 한다. Fig. 5는 OPC의 오계수 측정을 위한 실험 장치도이다. 초청정 공기 공급기(ultra-cleanair supply system)에서 초청정 공기를 측정하고자하는 OPC와 응축계수기(CNC)에 1cfm(28.3lpm)와 0.05cfm(1.41lpm)씩 각각 공급하고 나머지 공기는 밸브를 통해 배출된다. 응축계수기(CNC)는 공급 공기의 청정도를 모니터링하는데 사용되었다. 초청정 공기 공급 시스템(ultra clean air supply system)은 3 $\times 10^7$ 리터의 샘플공기중에서 2~3개의 입자들만이 존재할 만큼 매우 깨끗한 공기 공급 시스템이다.

Fig. 6은 3개의 OPC(Climet CI-7300, Hiac/Royco 5120, 그리고 Met One 200)에 대한 오계수

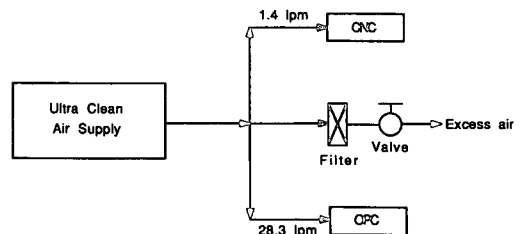


Fig. 5 Experimental set-up for measurement of OPC noise counts

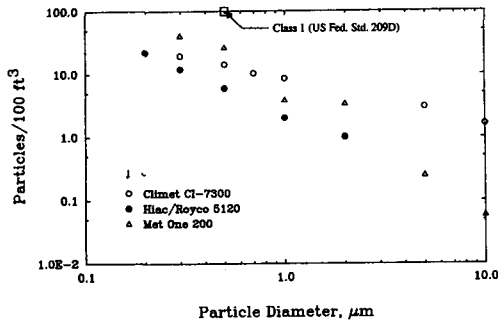


Fig. 6 Average background counts of three high flow rate cleanroom OPCs

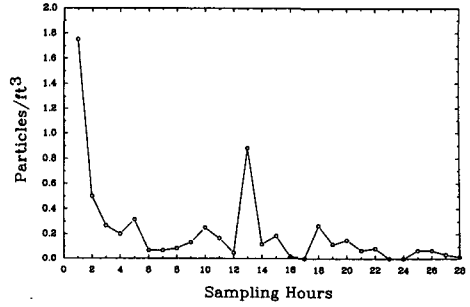


Fig. 7 Climet CI-7300 background counts for 28 hours

를 측정된 결과이며 각 입자크기에 대한 100ft³ (2830liter) 당의 적산계수들로 나타낸다. 그림에는 비교를 위하여 0.5µm 직경이상의 입자가 1ft 당 1개 이하 존재하는 미국국가 표준 209D의 클래스 1 성능을 표시하였다. 실험은 각각의 OPC에 대해 500분 씩 계속되었으며 사용된 OPC의 오계수는 모두 미국 국가 표준 209D의 클래스 1 기준에서 보다 낮으므로 클래스 1정도 클린룸 측정에는 적합하지만, 클래스 1이하 클린룸 측정에는 오계수 때문에 적합하지 않음을 볼 수 있다.

이와 같은 OPC의 오계수 원인을 밝히기 위하여 3개의 OPC 중 CI-7300을 이용하여 추가적인 정밀 실험을 행하였다. CI-7300을 채택한 이유는 OPC의 구조변경 없이 원하는 실험을 수행할 수 있었기 때문이다. 샘플링 라인의 오염도가 오 계수에 미치는 영향을 알기위하여 오염된 타이공 튜브를 사용하여 오계수를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 횡축은 입자채집시간을 나타내며 종축은 28.3리터(1ft³)당 계수되는 입자 갯수를 나타낸다. 실험 데이터는 CI-7300의 샘플링 라인으로 오염된 튜브를 사용하여 초청정 공기를 샘플링 했을 때 오염입자 갯수를 28시간 동안 기록한 결과이다. 처음 한 시간 동안에 28.3리터 당 약 1.8개의 입자가 검출되었으며, 그 이후로도 계속 0.1~0.3개의 입자가 검출되었다. 이 실험에서 오염된 튜브의 자체정화 시간은 약 2시간 정도 걸림을 알 수 있다. Fig. 8은 총 28시간 동안 계수된 입자갯수 분포도로, 횡축은 입자의 직경, 종축은 각 입자 크기 범위당의 갯수를 계수된 총 입자 갯수로 나뉘준 값의 퍼센트를 나타낸다. 여기서 보면 0.3~0.5µm 그리고 1~5.0µm의 입자직경 범위 입자가 다른 입자범위에 비해 상대적으로 많이 존재하는 것으로 측정된 것을 볼 수

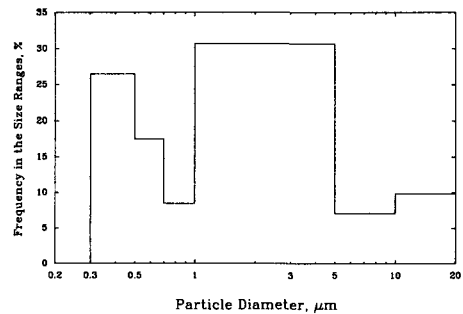


Fig. 8 Background counts distribution over 28 hour sampling period with CI-7300

있다. 이것은 이 실험에서 0.3~0.5µm 그리고 1.0~5.0µm크기의 입자들이 다른 크기의 입자들에 비해 상대적으로 많이 관찰되며 또한 오계수가 관찰될 때는 항상 큰 입자크기와 작은 입자크기가 함께 나타남을 뜻한다.

그러나, 깨끗한 샘플링 튜브를 사용하고, OPC 내장 펌프 모터를 제외한 모든 전기적 시스템이 작동하였을 경우, 즉 OPC에 공기를 일절 공급하지 않았을 때 6시간 동안에 단 1개의 카운트만 검출되었고, 또한 OPC 내장펌프를 작동시키지 않은 상태에서는 10시간동안 초청정 공기를 OPC에 강제로 밀어 넣어도 단 한 개의 입자도 포착되지 않았다. 이 실험에서 보면 내장펌프 비작동시는 어떠한 전기적 노이즈가 OPC의 오 계수에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

OPC 내장펌프를 작동시키지 않았을 경우의 실험에서는, 펌프 모터에서 발생될지 모르는 전기적 잡음과 기계적 진동이 생기지 않기 때문에 OPC의 오 계수 근원을 밝혀낼 수 있다.

Fig. 9는 초청정 공기 공급 시스템에서 OPC 샘플링 라인에 오염된 튜브를 연결하고 OPC 내장펌

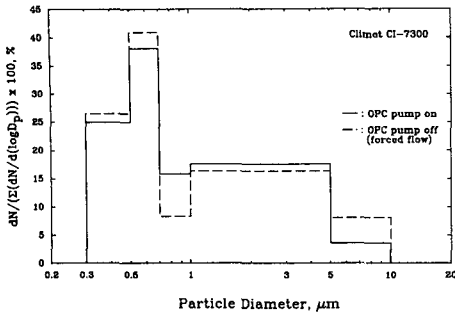


Fig. 9 Background count distributions when CI-7300 was taking a sample through the contaminated Tygon tube with OPC internal pump on and pump off, i.e., forced flow cases

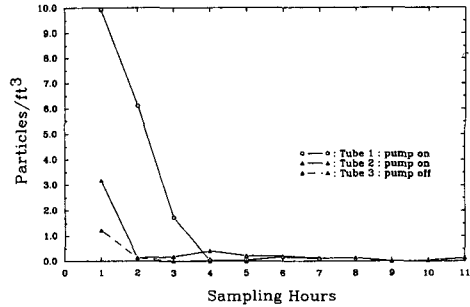


Fig. 10 Background count decay measurement comparison with and without OPC internal pump working when the contaminated Tygon tube was placed at the sampling line

프를 작동하며 초청정공기를 샘플했을 경우와 OPC 내장펌프를 끄고 초청정 공기를 강제로 밀어 넣었을 경우에 OPC가 측정할 두가지 입자 분포도를 작성한 것으로서, 횡축은 입자의 크기를 나타내며 종축은 총 입자계수에 의하여 대수정규화(log-normalize)된 각 채널의 입자 갯수를 나타낸다.

그림의 입자 분포도를 보면 OPC 내장펌프 작동시와 비작동시의 입자분포가 비슷한 것을 볼 수 있다. 만약 OPC 펌프 모터의 전기적 잡음이 OPC의 오계수의 근원이라면 1~5 μm 혹은 10 μm 보다 큰 입자가 측정되지 말아야 한다. 왜냐하면, 전기적 잡음에 의한 필스는 그 높이가 낮기 때문에 OPC의 제일 낮은 채널, 즉 CI-7300의 경우 0.3~0.5 μm 에 기록되어야 한다. 그러나 OPC 내장펌프 모터의 작동 유무에 관계없이 Fig. 9에 나타난 것과 같은 입자 분포도를 보여주고 있다. 이는 OPC의 입자계수가 펌프 모터의 전기적 잡음에 의한 노이즈를 입자로 계수하지 않음을 입증하는 것이다.

OPC 샘플링 라인에 오염된 튜브를 연결하여, OPC 내장 펌프 모터 작동시와 비작동시에 OPC가 측정할 시간별 입자갯수를 Fig. 10에 나타내었다. 펌프 모터 작동시는 처음 2~3시간 동안 많은 양의 입자가 검출될 뿐만 아니라 그 이후로도 계속적으로 입자가 검출되는 반면, 펌프 비작동시는 처음 1~2 시간 동안만 소수의 입자가 검출되고 3시간 이후부터는 한 개의 입자도 검출되지 않았다. 이 실험 결과에서 보면 내장펌프에 의한 진동이 샘플링 라인이나 OPC 하드웨어 내에서 입자를 발생시키는 것으로 간주된다.

이상과 같은 CI-7300 OPC의 오계수 실험 결과를

종합해보면, 전기적 잡음은 OPC의 오계수에 영향을 미치지 않으며 OPC 내장펌프의 진동, 혹은 샘플링 라인내에서 유체의 흐름에 의한 전단력(shear stress)이 OPC에 오계수를 야기시킨 것으로 해석된다. 다시말하면 전단력에 의해 큰 입자는 작은 입자에 비해 표면에서 잘 떨어지므로, 유동 혹은 진동이 공기유로 내에 부착되었던 큰 입자를 표면에서 부터 분리시키고 이 분리된 큰 입자는 빠른 속도로 이동하다가 샘플링 라인벽에 부딪혀 여러 작은 입자로 부서지거나 혹은 벽에 붙어있던 물질을 이탈 시켜 이것이 오계수의 직접적인 원인이라고 판단된다. 따라서 클린룸 청정도 측정시 오염된 튜브를 OPC 샘플링 라인으로 썼을 경우에 클린룸 입자오염에 대해 잘못된 데이터를 얻게될 가능성이 가장 높다고 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 레이저 OPC인 LAS-X와 HS-LAS, 그리고 백색광원 OPC인 CI-226의 PSL 입자에 대한 응답 특성을 실험적으로 고찰하였다. 또한 OPC 특성중 입자 계수의 정확도에 영향을 미치는 오계수 근원을 밝히기 위하여 Climet CI-7300 입자 계수기를 사용하여 그 원인을 규명하였다.

레이저 OPC인 LAS-X의 광 산란 특성의 실험값은 이론값과 매우 잘 일치하였으며 LAS-X는 PSL 입자의 경우 0.4~0.6 μm 직경의 입자와 0.7 μm ~1.0 μm 직경의 입자는 그 크기를 구분할 수 없음을 이론과 실험에서 증명되었다. 백색광원 OPC인 Climet사의 CI-226에 관한 본 실험에서의 특성

곡선은 제조업자의 특성 곡선과 대체로 일치하였으며, 작은 입자(lower sensitivity 부분)의 경우 입자의 분해능이 큰 입자의 경우보다 떨어 짐을 관찰하였다.

클린룸용 OPC인 CI-7300를 이용한 오계수 측정 실험에서 이 OPC는 클린룸 클래스1에 사용하기에 충분히 낮은 저잡음(low noise level)을 가지고 있었으며, 오계수(noise)가 관찰될 때는 항상 큰 입자크기와 작은 입자크기가 함께 관찰되었다. 여기서는 OPC에 내장된 펌프가 오계수(background noise count)의 주요원인으로 판단되며, 그 이유는 펌프의 진동에 의해 샘플링 라인에 붙어 있던 입자가 떨어져 나가기 때문이다.

참고문헌

- (1) Liu, B.Y. H., Lee J. W., Pui D.Y.H., Ahn K. H. and Gilbert S.L., 1987, "Performance of a Laboratory Clean Room," J. Environmental Sci., Sep./Oct., pp22~25.
- (2) Cooke, D.D. and Kerker, M., 1975, "Response Calculations for Light Scattering Aerosol Counters," Applied Optics, Vol. 14, pp. 734~739.
- (3) Liu, B.Y.H., Berglund, R.N., and Agarwal, J. K., 1974, "Experimental Studies of Optical Particle Counters," Atmos. Environ., Vol. 8, pp. 717~732.
- (4) Marple, V.A. and Rubow, K.L., 1976, "Calibration of Optical Particle Counters," J. Aerosol Sci., Vol. 7, pp. 425~433.
- (5) Willeke, K. and Liu, B.Y.H., 1976, "Single Particle Optical Counter : Principle and Application, : in Fine Particles : Aerosol Generation, Measurement, Sampling and Analysis.(B.Y.H. Liu, ed.), New York, Academic Press.
- (6) Whitby, K.T. and Willeke, K., 1978, "Single Particle Optical Counters : Principles and Field Use," in Aerosol Measurement, (Lundgren, D.A. et al. ed.), University of Florida Press, Gainesville.
- (7) Liu, B.Y.H., Szymanski W.W. and Pui D.Y.H., 1984, "Response of a Laser Optical Particle Counter to Transparent and Light-absorbing Particles," Report to the American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Particle Technology Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota 55455.
- (8) Liu, B.Y.H., Szymanski W.W. and Ahn K.H., 1985, "On Aerosol Size Distribution Measurement by Laser and White Light Optical Particle Counters," J. Environ. Sci., Vol. 28, pp.19~24.
- (9) Szymanski, W.W. and Liu B.Y.H., 1986, "On the Sizing Accuracy of Laser Optical Particle Countes," Part. Charact., Vol. 3, pp. 1~7.
- (10) 안강호, 1987, "Aerosol Particle Generation의 원리 및 특성," "공기조화-냉동공학, 제16권 제1호, pp. 44~54.
- (11) Van der Hulst, H.C., 1957, Light Scattering by Small Particles, John Wiley, New York.