

광학입자센서 내 유동장과 측정영역이 측정효율에 미치는 영향

김영길[†] · 전기수^{*} · 김태성^{**}

Effect of Flow Field and Detection Volume in the Optical Particle Sensor on the Detection Efficiency

Young-Gil Kim, Ki-Soo Jeon and Tae-Sung Kim

Key Words : optical particle sensor(광학입자계수기), monitoring system(모니터링 시스템), light scattering(광산란),

Abstract

The OPS (Optical Particle Sensor) using light scattering from the particles (real-time measurement without physical contact to the particles) can be used for cleanroom or atmospheric environment monitoring. For particles smaller than 300 nm, the detection efficiency becomes lower as scattered light decreases with particle size. To obtain higher detection efficiency with small particles, the flow field in particle chamber and the detection volume should be designed optimally to achieve maximum scattered light from the particles. In this study, a commercial computational fluid dynamics software FLUENT was used to simulate the gas flow field and particle trajectories with various optical chamber designs for 300 nm PSL particle. For estimation of laser viewing volume, we used a commercial computational optical design program ZEMAX. The results will be a great help in the development of OPS which can measure small particles with higher detection efficiency.

기호설명

D : 챔버 직경
 r_1 : 입구 직경
 r_2 : 노즐 직경
 r_3 : 출구 직경
 r_f : 입자 빔 반지름
 D_L : 레이저 빔 직경

1. 서론

광학입자센서 (Optical Particle Sensor)는 미세입자 측정장비로 초청정 공간의 오염제어, 실내 공기질 관리, 대기오염 측정분야, 환경 감시 분야 등에 적용되어 활용되고 있다. 이처럼 응용분야가 광범위

하고, 첨단 분야의 생산성 향상을 위한 오염제어 뿐만 아니라 환경에 대한 관심이 높아지면서 광학 입자센서를 적용코자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

광학을 이용하여 입자를 측정하는 방법으로는 optical aerodynamics 를 이용하여 입자의 relaxation time 을 측정하거나, 광 소스에 대한 입자의 산란 크기를 이용하는 방법, 입자의 산란과 흡수 비율에 따른 측정법, 빛의 위상을 측정하는 방법 등이 있다⁽¹⁾. 여러 측정 방법들 중에 입자의 산란 강도에 따른 측정법은 실시간으로 샘플링 없이 측정이 이루어지며, 시스템 구성이 용이하여 측정장비의 크기가 작고 가격이 저렴하다는 장점을 갖는다. 이런 장점을 활용하여, 초청정 공간, 실내, 지하철 역사 내 등의 환경 감시가 필요한 분야에서 여러 곳에 설치되어 24 시간 모니터링 장비로 사용될 수 있으며, 설치된 광학입자센서 위치에 따라 오염발생 여부 판단이 가능하다.

광학입자센서는 측정 가능한 최소 입자 직경과 측정 효율에 따라 성능이 평가된다. 성능은 사용

[†] 성균관대학교 대학원

^{*} HCT

^{**} 성균관대학교 기계공학부&성균나노과학기술원
E-mail : tkim@skku.edu
TEL : (031)290-7466 FAX : (031)290-5889

되는 광 소스 출력, 광 소스 집속과 관련된 렌즈 광학계, 광학 챔버 형상과 유량, 검출기의 민감성 등에 의해 영향을 받는다⁽²⁾. 본 연구에서는 광학 챔버 형상과 유량에 초점을 두고 챔버 형상을 모델링하여 유동 특성을 평가하였으며, 그에 따른 측정영역을 구하였다. 이를 통해 광학입자센서 내에서 측정영역과 유동장이 측정효율에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 이론적 배경

2.1 물리적 모델

본 연구에서는 광학입자센서 내 유동장과 측정영역이 측정효율에 미치는 영향을 보기 위하여 HCT의 시 제작품을 기본 모델로 사용하였으며, 기본 모델을 바탕으로 챔버형상을 변화시켰다.

Figure 1에 광학입자센서의 개략도와 본 연구에서 사용된 좌표계를 나타내었다. 유동방향은 -y 방향이며, 분석대상인 입자 또한 동일하다. 레이저 소스에서 발진된 레이저는 렌즈모듈을 지나면서 집속되며, 집속된 레이저는 입자와 부딪혀 산란이 일어난다. 산란된 레이저는 z 축 방향에 구성되어 있는 photodetector에서 측정이 이루어진다.

2.1.1 챔버모델형상

광학입자센서 챔버 내 유동영역에 해당하는 부분은 Fig. 1에서 r_1, r_2, r_3, D 로 나타내는 영역으로 D는 광학모듈의 반사경에 해당하기 때문에 변하지 않으며, 입구와 출구직경인 r_1, r_2, r_3 에 따라 다른 형상을 모델링하였다. 총 3가지의 경우로 모델링 하였으며, Table 1과 같다. r_1 은 입구 직경을 나

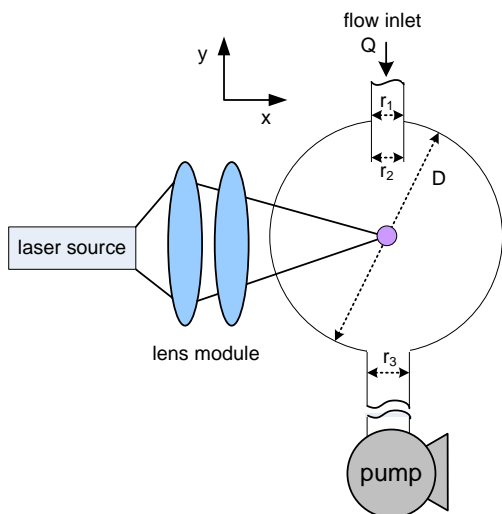


Fig. 1 Schematic layout and coordinate system for a Optical Particle Counter.

타내며, r_2 는 노즐직경, r_3 는 출구 직경을 나타낸다. Case1은 입구와 출구 크기가 동일하기 때문에 직선형태를 갖으며, case2는 case1보다 r_1, r_2, r_3 가 모두 작고 출구직경이 입구직경보다 크게 설계하였다. Case3는 입자를 모으기 위한 목적으로 r_1 과 r_2 의 크기를 달리하여 목을 형성하였으며, r_1, r_3 은 case1과 동일하고 r_2 는 case2와 동일하다.

2.1.2 측정영역

광학입자센서의 측정영역은 광학입자센서 내에서 산란이 발생하는 영역으로 측정효율에 직접적으로 영향을 미친다. 레이저 초점 크기에 비해 입자 빔 직경은 매우 크기 때문에 실제로 산란이 일어날 수 있는 범위는 매우 제한적이며, 측정영역 부피와 레이저 빔 직경에 해당하는 높이를 갖는 입자 빔 부피의 비로 정의되는 측정효율은 감소하게 된다. 레이저의 초점거리를 조절하여 초점 크기를 작게하면 레이저 강도를 키울 수 있기 때문에 더 작은 입자를 측정할 수 있지만 측정영역이 작아지기 때문에 측정효율은 저하된다. 또한, 레이저는 중심을 기준으로 Gaussian 강도 분포를 갖기 때문에 입자가 지나가는 경로에 따라 조사되는 강도가 달라질 수 있다. 레이저 강도는 산란강도와 직접 관련이 있기 때문에, 측정영역을 구하여 조사되는 레이저 강도 범위를 구함으로써 측정효율과 정확성을 높일 수 있다.

광학입자센서의 측정영역은 입자 빔과 레이저 빔, photodetector 투영면 세 영역이 교차되는 부피로 정의되며, Fig. 2와 같이 시각화될 수 있다⁽³⁾. 교차되는 부피에 해당하는 측정영역은 입자 빔과 레이저 빔의 크기, photodetector 투영면의 크기에 따라 다양한 형태로 나오며 그 부피도 각각 다르다. 입자 빔 직경은 상용코드인 Fluent를 사용하여 구하였으며, 레이저 빔 직경은 상용렌즈 설계 프로그램 ZEMAX를 사용하여 평가하였다.

Table 1 Chamber design parameter.

case	parameter 1	parameter 2
1	$r_{1C1} = r_{2C1} = r_{3C1}$	
2	$r_{1C2} = r_{2C2} < r_{3C2}$	$(r_{1C2}, r_{2C2}, r_{3C2}) < (r_{1C1}, r_{2C1}, r_{3C1})$
3	$r_{1C3} = r_{3C3} > r_{2C3}$	$r_{1C3} = r_{1C1},$ $r_{2C3} = r_{2C2}$ $r_{3C3} = r_{3C1}$

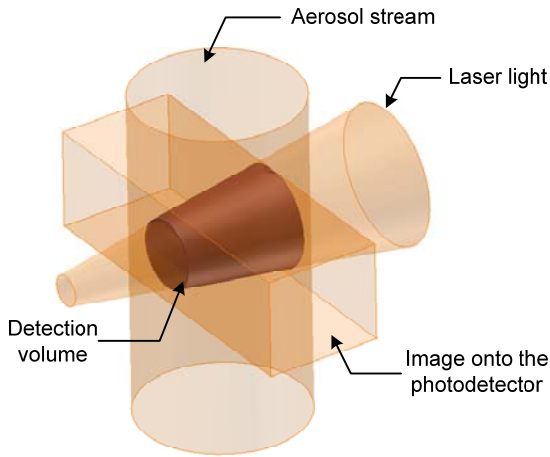


Fig. 2 Formation of the detection volume.

Photodetector의 투영면은 현재 HCT에서 사용되는 부품 (S1223, Hamamatsu)의 실제 측정면적을 참조하였다.

2.2 유동해석 지배방정식과 경계조건

정상상태 비압축성 난류유동을 해석하기 위해 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

i) 연속방정식

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

ii) 운동량방정식

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

iii) 에너지방정식

$$\nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

여기서 k_{eff} 는 전도도를 나타내며, $\bar{\tau}$ 는 점성 항이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

출구에서 출구면에 수직인 -y 방향으로 펌프에 의해 일정한 유속의 공기가 유출되며, 입구면에서는 출구 유속에 따라 자연스럽게 형성이 된다. 벽면은 no-slip이며, 벽면에 부딪힌 입자는 모두 붙는 것으로 가정한다. 모델형상에 관계없이 출구면에서 유출되는 공기유량은 동일한 조건으로 해석을 수행하였다.

2.3 광학해석 조건

레이저 빔 직경을 결정하는 렌즈 모듈의 성능을 평가하기 위해 필요한 렌즈 데이터는 HCT의 데이터를 참조하였다.

3. 유동해석 격자계 및 해석방법

3.1 유동해석 격자계

격자계 구성은 해석대상인 입자 빔의 변화를 살펴보기 위해서 입구에서 출구까지 y축 방향의 조밀한 사각격자를 구성하였으며, 입자 빔이 영향을 미치지 않을 것으로 예상되는 영역은 상대적으로 큰 격자를 구성하였다. 그 결과 유동해석을 위해서 사용된 격자 수는 약 540,000 개이며, Fig. 3과 같다.

3.2 해석방법

(1), (2), (3)과 같은 비선형지배 방정식의 해를 구하기 위해 FVM (Finite Volume Method) 기법을 사용하였으며, 이산화를 통해 각 변수에 대해 방정식을 계산하기 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 또한, 난류유동을 해석하기 위하여 standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

광학입자센서 챔버 내에서 산란된 레이저를 모으기 위해 구성되었는 반사경은 전체 유동영역에서 큰 부피를 차지하지만 실제로 입자 빔에 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. Case1과 case2의 경우에는 해석의 편의를 위해 반사경에 의한 유동영역을 생략하였으며, case3은 반사경에 의한 유동영역을 고려하여 가정이 적절한지 판단하였다.

입자는 입자크기, 유속 등의 조건에 따라 유선을 따라 움직이는 정도가 다르며, 입자의 거동을

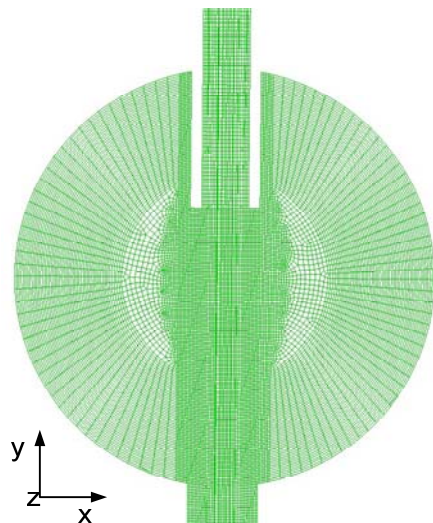


Fig. 3 Grid system of OPS.

살펴보기 위해 DPM (Discrete Phase Model)을 사용하였다. 표준구형입자 PSL (Polystyrene Latex)을 사용하여 물성치를 입력하였으며, 0.3 μm 직경 입자를 입구에서 x 축과 z 축으로 각각 10 개씩 등간격으로 배치하여 시뮬레이션을 수행하였다.

광학계 해석을 위해 ZEMAX 를 이용하여 렌즈 데이터를 입력하였으며, 렌즈 면을 따라 순차적으로 시뮬레이션이 진행되는 sequential mode 를 사용하였고, 렌즈에서 발생하는 산란은 무시하였다. 빛은 cone angle 을 통해 특정 각도를 지정하여 입사시켰으며, 단파장 658 nm 가시광선 영역을 사용하였다. 렌즈 재질은 BK7 을 사용하였으며 spot diagram 을 사용하여 레이저 빔 직경을 평가하였다.

4. 해석결과

광학입자센서 내에서 유동장과 측정범위가 측정효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 세가지 챔버 형상에 대하여 각각 유동장과 측정영역의 특성을 파악하였다.

4.1 유동 해석 결과

동일한 경계조건 하에서 r_1, r_2, r_3 만 변화시키면서 해석한 결과는 Fig. 4 와 같다. 세가지 형상 모두 입구에서 출구방향 (-y 방향)으로 유동이 형성되는 것을 확인할 수 있으며 x 축, z 축 방향으로 큰 변화가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 반사경을 고려한 Fig. 4(c)와 그렇지 않은 Fig. 4(a), (b)를 비교할 때, 반사경 영역은 유동의 변화가 적은 것을 확인할 수 있으며, 예상한 바와 같이 입자 빔에 영향을 주지 않는다는 사실을 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 광학입자센서 측정효율 향상을 위한 반사경의 직경과 굴절률 설계 시, 유동장을 고려하지 않아도 된다는 사실을 알게 되었다.

4.1.1 속도장 해석

r_1, r_2, r_3 의 크기가 모두 동일한 case1의 경우, 입구직경과 출구직경이 case2, 3의 경우보다 크기 때문에 최고유속 및 평균유속이 느리며 유속의 변화가 크게 일어나지 않는다. 유속이 느리기 때문에 유속에 의한 측정 효율 감소는 없을 것으로 예상된다.

Case2의 경우, case1보다 r_1, r_2, r_3 의 크기가 모두 작기 때문에 최고유속 및 평균유속이 빠르며 직경이 작아지는 출구에서 매우 빠른 속도를 보인다. 하지만 측정이 이루어진 후에 출구부에서 속도가 빨라지기 때문에 유속에 의한 측정효율 감소는 없을 것으로 보인다.

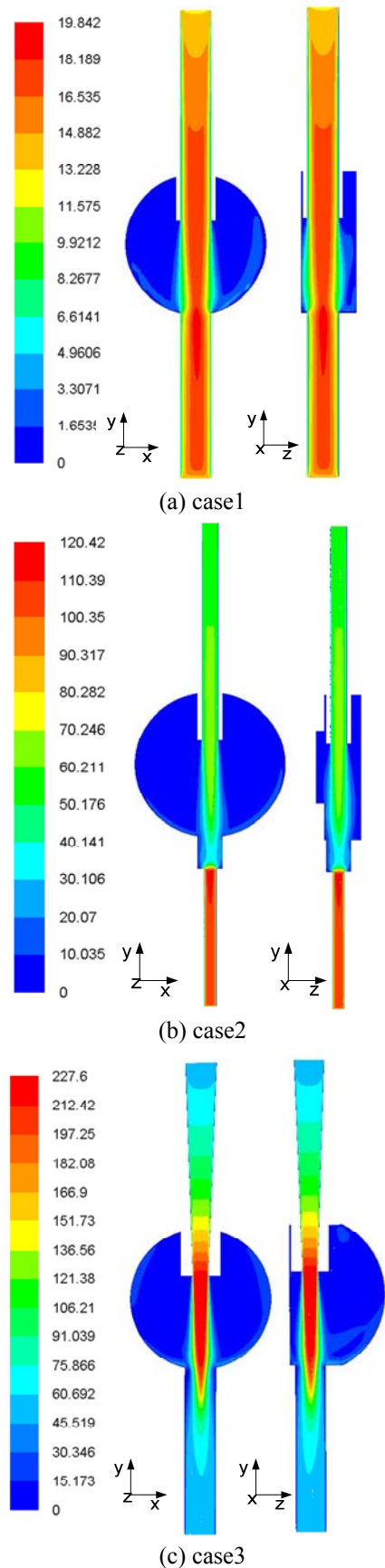


Fig. 4 Velocity distribution at case1, 2, 3.

입구직경과 출구직경은 case1 과 동일하지만 r_2 의 크기를 case2 와 동일하게 하여 목을 형성시킨 case3 의 경우, case1 과 달리 유동장이 모아지기는 하지만 노즐부위에서 매우 빠른 속도를 보이며 출구에서 다시 느려지는 것을 볼 수 있다. 노즐을 지나 측정영역 부위에서 입자 속도가 매우 빠르기 때문에 높은 photodetector 민감도가 필요하다.

4.1.2 입자경로 해석

PSL 0.3 μm 입자를 시뮬레이션한 결과 입자경로는 Fig. 5 처럼 유동장과 유사한 결과를 보였다. 전체적으로 입구에서 출구까지 유동장처럼 직선경로를 보이지만, 유동장은 노즐에서 나온 이후 점차 퍼지는 것과는 달리 입자는 관성의 영향으로 퍼지지 않고 직선운동을 하는 것을 확인할 수 있다. 입자의 직선운동 때문에 세가지 경우 모두, 노즐의 크기가 입자 빔 크기와 동일하며, 측정영역 계산시 활용될 수 있다.

입자 빔을 모으기 위한 목적으로 설계된 case3 은 입구 직경이 같지만 목이 설계되지 않은 case1 과는 달리 입자 빔이 모이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 목이 형성되었기 때문에 속도장과 동일하게 입자의 속도가 빨라지고, 입자의 잔류시간과 측정시간은 매우 짧아지게 된다. 각각의 경우에 대한 잔류시간과 속도, 측정시간은 Table 2 와 같다. 잔류시간은 입구에서 출구까지 통과하는 시간을 나타내며, 속도는 측정이 이루어지는 영역에서 입자의 속도를 나타낸다. 측정시간은 측정영역을 통과하는데 걸리는 시간으로, 이 결과를 바탕으로 광학입자센서의 photodetector 민감도를 결정할 수 있으며, 측정효율 상승을 기대할 수 있다

4.2 측정영역 해석

유동장해석 결과를 바탕으로 입자 빔 크기를 구할 수 있으며, photodetector 측정면적은 부품 선택

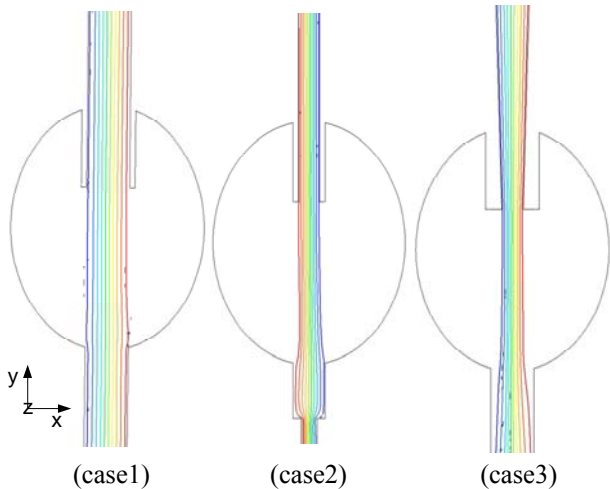


Fig. 5 Particle trajectories by case.

Table 2 Residence time & detection time by case.

Case	1	2	3
Residence time (msec)	4.001	1.038	0.6636
Velocity (m/s)	18	65	233
Detection time (10^{-1} msec)	1.111	0.308	0.08583

에 따라 결정된 값이다. 레이저 빔의 크기는 설계된 렌즈 모듈을 상용 렌즈디자인 소프트웨어인 ZEMAX 를 통해 시뮬레이션함으로써, Fig. 6 과 같이 입자 빔 크기 (r_f)에 따른 레이저 빔 크기 (D_{L1} , D_{L2})를 구할 수 있다. 각 챔버 형상에 대한 상수값과 측정영역의 크기와 측정효율은 Table 3 과 같다. Case2 와 case3 은 노즐직경 (r_2)이 동일하기 때문에 입자 빔 직경이 동일하며, 측정영역과 측정효율도 동일하다. 렌즈모듈은 정해져 있기 때문에 L 은 일정하며, 입자 빔 직경 크기에 따라서 D_{L1} , D_{L2} 가 결정된다. Case1 과 case2, 3 을 비교할 때, 입자 빔이 작아질수록 측정영역은 작아지지만 photodetector 측정면적은 동일하고 레이저 빔 크기가 상대적으로 조금 작아지기 때문에 오히려 측정효율은 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 측정효율을 높이기 위해 노즐을 사용하여 입자 빔 직경을 작게할 경우, Table 2 에서 볼 수 있듯이 입자의 속도가 매우 빨라지며 측정가능시간이 매우 짧아지기

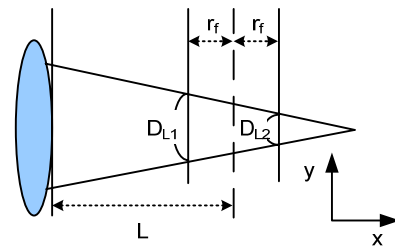


Fig. 6 Laser light analysis.

Table 3 Counting efficiency by case.

Case	1	2, 3
Aerosol stream, r_f (mm)	2	1
Laser light (mm)	D_{L1}	2.60
	D_{L2}	1.51
Detection volume (mm^3)	9.349	5.568
Counting efficiency (%)	28.61	76.00

때문에 photodetector 민감도에 의해 측정에 문제가 발생할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 광학입자센서 내에서 유동장과 측정영역이 측정효율에 미치는 영향에 대해서 수치적으로 연구하였다. 해석 결과로부터 측정시간을 구하여 측정효율 미치는 영향에 대해 고찰하였고, 측정영역을 구하여 측정효율을 확인하였다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1) 챔버형상에 따른 측정영역의 변화를 확인하였다. 측정영역은 입자 빔 크기에 영향을 많이 받는 것을 확인하였으며, 입자 빔 크기가 작을수록 측정영역은 작아지지만 측정효율은 높아지는 것을 확인하였다.

2) 챔버형상에 따른 유동장의 변화를 확인하였다. 노즐직경에 따라 측정영역에서 속도가 달라지는 것을 확인하였고, 출구직경보다는 노즐직경에 의한 영향이 큰 것을 확인하였다. 측정영역에서의 유속은 입자의 유속과 동일하며, 측정시간에 영향을 미치기 때문에 photodetector 민감도에 따라 측정효율이 감소될 수 있다는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 측정효율을 높이기 위한 photodetector 민감도기준을 마련할 수 있었다.

3) 측정효율을 높이기 위해서는 입자 빔 크기를 작게하여 입자 빔을 형성시켜야 한다. 하지만 형성되는 입자 빔은 속도가 빨라지기 때문에 photodetector 민감도에 따라 측정효율이 감소할 수도 있다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 HCT의 지원하에 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Son J. Y., Kang K.H. and Jeon H. W., 1991, "Characteristics of Optical Single Particle Sizing Techniques," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 24, No. 2, pp. 137~144.

(2) Bohren Craig F. and Huffman Donald R., 1998, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, A Wiley-Interscience Publication, New York.

(3) Peters C. and Rudolph A., 1993, "Optimization of a Measuring Setup for Near Forward Scattering," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 24, Suppl. 1, pp. S217~S218.