

입자크기 및 온도측정을 위한 광학적 방법

김상수 · 서용재

Optical Methods for Particle Size and Temperature Measurements

Sang-Soo Kim, Yong-Jae Suh



- 김상수 (한국과학기술원 기계공학과)
- 1950년생
- 열 및 에너지공학을 전공하였으며, 특히 미소입자의 거동과 관련한 집진 기술, 공정제어에 대한 환경제어, 연소관련 대기오염제어 및 광학적 측정 기술에 관심을 가지고 있다.



- 서용재 (한국과학기술원 기계공학과)
- 1967년생
- 열 및 에너지공학을 전공하였으며, 연소시 발생하는 미소입자의 광학적 측정, 정전집진기 내의 미소입자의 거동 및 대기환경제어에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

발전, 산업용 공정, 가열 및 수송을 위한 연소시스템 -용광로, 보일러, 가스터빈 및 디젤엔진- 에서 입자의 크기, 속도, 온도 분포는 전체 연소효율과 유해물질 배출에 대하여 결정적 역할을 한다. 그러므로 입자를 수반하는 유동에서 입자의 크기, 속도 및 온도를 측정하는 것은 산업분야에서 중요한 영역을 차지한다고 볼 수 있다. 이러한 물리량을 측정하기 위하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 레이저, 전자, 컴퓨터, 장치 및 컨트롤 기술이 최근 여러 장비에 대하여 연구개발, 상품화되어 왔으며, 폭넓은 가격대와 기능을 수렴할 수 있는 장비에 대한 요구와 시장성으로 말미암아 새로운 방법이 개발되고, 개선 및 단순화가 이루어져 오고 있다. 측정기술이 발달함에 따라 실제 연소시스템에서 직접 응용할 수 있고, 시공간적으로 해상도가 높고 유동장과 온도장을 교란하지 않는 방법이 요구되고 있다. 이 글에서는

2장에서 광학적 방법을 이용한 입자의 크기 측정법을 살펴보고, 3장에서는 광학적 방법을 이용한 온도의 측정법에 대하여 설명하고자 한다.

2. 광학적 방법을 이용한 입자의 크기 측정

2.1 고속사진술

고속사진술(high speed photography)은 분무에서 크기분포를 측정하는데 사용되어 왔으며 삽입프로브에 의한 국소적 교란을 피하였다. 그러나 고속사진술은 분무기로부터 만들어진 액적(droplet)의 시간적인 분포를 간단히 구할 수 없고 측정된 입자분포도 작은 입자로 바이어스(bias)된다. 이는 큰 액적이 분무기를 떠난 후 작은 액적의 속도보다 더 큰 속도를 유지하기 때문이다. 또한, 심도(depth of field)에 대한 추가분석이 필요하다. 고속사진술은 레이저 산란 측정법과 병행하여 액적 크기 범위를 증명하는데 아주 유용하며, 분무의 액적 미립화기구(mechanics of droplet break-up)를 기술하는데

도 중요한 수단이 되고 있다.

2.2 홀로그래피

홀로그래피(holography)는 등온유동이나 반응이 있는 묽은 분무 시스템에서 성공적으로 사용되어 왔으며, 사진술에 비하여 심도를 제거하는 3차원 정보를 제공하는 장점이 있지만, 아직 액적 크기 측정을 위한 샘플 체적의 정의에 관해 혼돈의 여지가 있다. 이러한 예로서, 보일러에서 볼 수 있는 진한 분무에서는 홀로그래피를 사용하는 것이 불확실하며, 이는 진한 분무에서의 첫 액적으로부터 회절된 빛이 2차 산란을 일으키고 이에 따라 액적 모양이 제대로 형성되지 않기 때문이다. 그러므로 액적을 명확하게 재구성하기 위해서는 각 액적에 의해 회절된 빛이 장애물을 거치지 않고 통과하여 필름에 이르기까지 방해받지 않는 안된다. 이러한 특성을 가진 홀로그램은 고속사진술과 더불어 레이저 측정과 액적 미립화기구에 유용하게 사용되고 있다.

2.3 광산란 방법

광산란 방법(optical scattering technique)을 두 영역으로 나누면, 평행 레이저 빔에서 액적군으로부터 나오는 빛을 측정하는 방법과 초점에 맞추어진 각각의 액적으로부터 산란된 빛을 측정하는 방법이 있다.

(1) 회절법(diffraction method)

회절산란을 사용하여 액적의 크기를 측정하는 방법은 분무를 통과하는 단파장 평행광의 전방 산란에 기초한다. 액적에 의하여 산란되는 빛의 각도는 이론적으로 평균 액적 크기에 관계되며, 그림 1에서 보는 바와 같이 레이저광을 약 1 cm 정도의 지름을 가지는 평행광으로 확대하여 분무를 통과시키고 광전증배관(PMT)에 초점을 맞춘 다음, 분무에 의하여 산란된 빛을 추적하여 광도(light intensity)의 각도에 따른 분포를 측정한다. 여기서 구한 광도의 각도별 분포로부터 평균

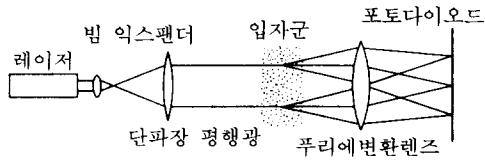


그림 1 회절법을 위한 광학장치

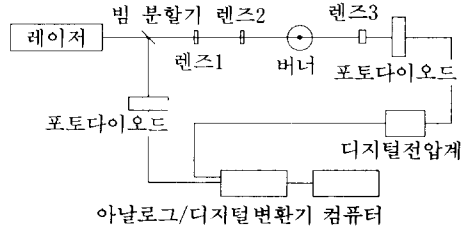


그림 2 광소멸법을 위한 실험장치

지름을 직접 산출하게 되고, 광에너지의 각도별 분포로부터 크기분포를 측정할 수 있다. 회절법은 경로를 따른 측정으로서 산란된 빛이 빔 (beam) 경로를 따라 검출기에서 적분되므로, 고농도에서는 측정이 부정확해진다.

(2) 광소멸법(light extinction method)

분무를 통과하는 빛으로부터 제거된 빛의 양은 빔 경로를 따른 입자의 소멸단면적(extinction coefficient)을 나타낸다. 입자의 체적 농도와 사용한 광의 파장에 대한 굴절률을 알면 소멸단면적으로부터 평균지름(D_{32} , Sauter mean diameter)을 구할 수 있고, 사용한 광의 파장에 대한 굴절률만을 알면, 두 파장에 대한 소멸단면적을 측정함으로써 입자의 체적농도와 크기를 측정할 수 있다. (그림 2참고)

(3) 간섭법

간섭법(interferometry method)은 양빔(dual beam) 레이저 도플러 속도계의 확장이다. 한 액적이 두 빔의 교차점에서 생기는 간섭무늬를 통과할 때 액적의 속도뿐만 아니라 신호의 상대적인 진폭 모듈레이션(relative amplitude modulation or visibility)으로

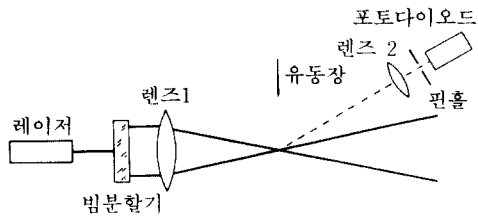


그림 3 LDV 및 간섭법을 위한 광학장치

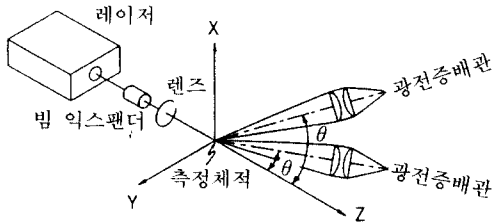


그림 4 산란강도측정법을 위한 광학장치

부터 액적의 크기를 구할 수 있다. 간섭법은 각 액적을 한 점에서 순간적으로 측정하므로 높은 시간적 해상도뿐만 아니라 공간 해상도를 제공한다. (그림 3참고)

(4) 산란강도측정법(scattering intensity ratio method)

SPC(single particle counter)에서 입사광의 광도에 따른 불확실성을 줄이는 방법으로서, 두 각 이상의 각도로부터 산란광을 측정하여 그 비율로써 입자크기를 측정하는 방법이다. 그리고 주로 입자의 형상이나 굴절률에 둔감한 영역인 전방산란으로부터 산란광의 비를 측정한다. 그리고 입자 지름을 측정할 수 있는 범위는 측정 각도와 주사광의 파장에 따라 달라진다. (그림 4참고)

(5) 광산란소멸법

광산란소멸법(light scattering-extinction method)은 미소입자($d < 100 \text{ nm}$)의 크기 및 농도에 대한 분해능력이 뛰어나고 고가의 장비도 요구되지 않으며 비교적 손쉬운 정열로 측정이 가능하여 널리 사용되고 있다. 이글에서는 동심확산화염내에 생기는 매연입자의 크기와 농도를 광산란소멸법으로 측정할 것

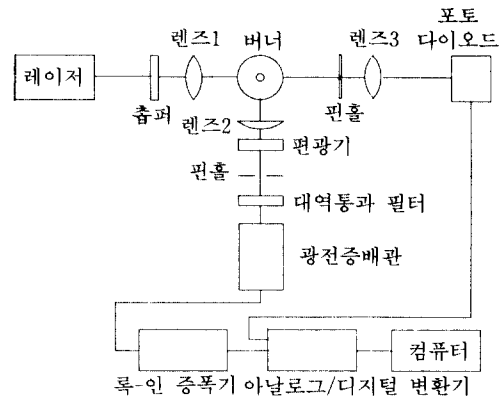


그림 5 광산란소멸법을 위한 실험장치

을 소개하고자 한다. (그림 5참고)

광산란소멸법은 광산란계수와 광소멸계수를 측정하여, 측정체적을 통과하는 입자의 평균지름, 수밀도, 체적분율을 얻어내는 방법이다. 일반적으로 미소입자를 측정하는 광학실험에서 측정체적을 한 개의 입자 또는 그 이하의 크기로 만드는 것은 매우 어렵다. 따라서 이 경우에는 측정체적을 크게 하여 많은 입자들에 의하여 산란되어 나오는 빛을 측정하게 된다. 이때 산란입자의 농도가 충분히 묽고($N < 10^{10} / \text{cm}^3$) 그 크기가 작다면($\pi d / \lambda < 0.3$) 레일리 산란(Rayleigh scattering) 이론을 적용할 수 있다.

○ 광산란 계수 :

$$Q_{vv} = \frac{N}{4} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D_6 \quad (1)$$

○ 광소멸계수 :

$$K_{ext} = -N \frac{\pi^2}{\lambda} \text{Im} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right] D_3 \quad (2)$$

D의 아래 첨자는 입자의 직경에 대한 분포함수로서 모멘트를 취한것을 의미하며 다음과 같다.

$$D_i = \int P(D) D^i dD \quad (3)$$

여기서, 입자크기 분포함수는 식 (4)와 같다.

$$P(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma_g D \exp \left(-\ln\left(\frac{D}{D_g}\right)^2 + 2\sigma_g^2 \right) \quad (4)$$

일반적 평균지름의 정의로부터 평균지름 D_{63} 이 D_3 , D_6 와 관련되고, 식 (1)과 식 (2)에 대입한 후 정리하면 다음과 같다.

○ 체적분율 :

$$\phi = \lambda K_{ext} / 6\pi E(m) \quad (5)$$

○ 평균지름 D_{63} :

$$D_{63} = \frac{\lambda}{\pi} \left\{ \frac{4\pi E(m) Q_{VV}}{F(m) K_{ext}} \right\}^{1/3} \quad (6)$$

○ 수밀도 :

$$N = \frac{12\phi}{D_{63}^3} \quad (7)$$

단위체적당 미소산란계수 Q_{VV} 의 절대값을 계산하기 위하여 산란단면적이 알려져 있는 프로판을 연료노즐에 주입하고 산란되어 나

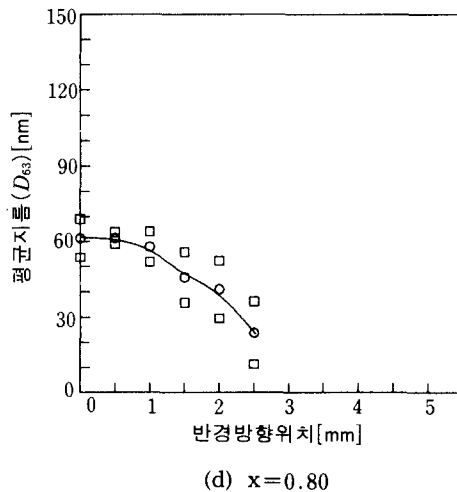
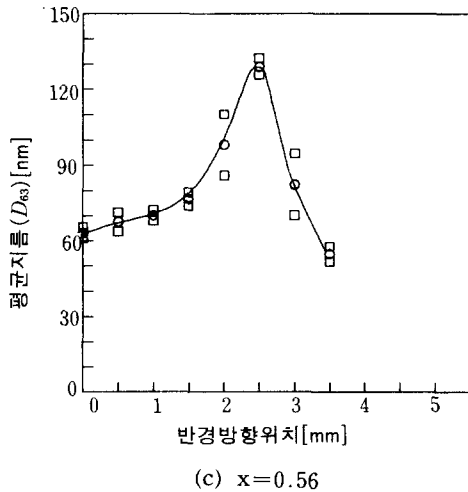
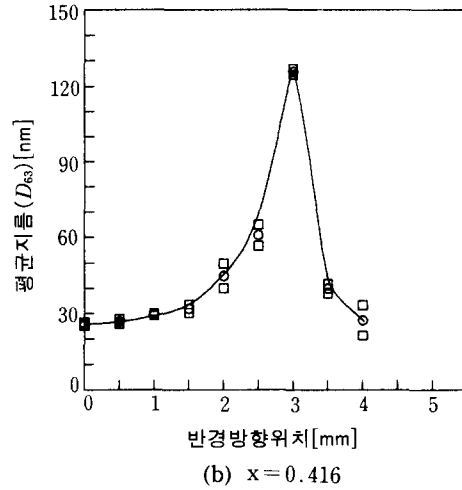
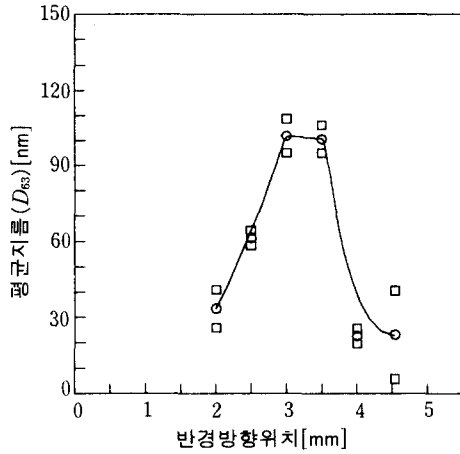


그림 6 매연입자의 평균 크기분포

오는 광을 측정함으로써 보정(calibration)을 수행하고, 산란자의 수밀도는 표준 대기압하에서의 아보가드로 수를 사용한다. (그림 6참고)

3. 광학적 방법을 이용한 온도 측정

열과학(thermal science)의 진보는 정확한 온도의 결정에 좌우된다. 연소에서 온도측정은 방출된 에너지양을 판단하고, 연료의 산화와 오염물질 형성을 지배하는 화학적 동역학에 미치는 온도의 영향을 연구하는데 필수적이며, 열전달 특히, 1000K 이하의 복잡한 대류유동에 대하여 온도측정이 요구된다. 그리고 기체역학에서의 온도측정은 압축성 유동장을 이해하고, 난류와 화학역학(chemical dynamics)과의 상호작용을 조사하는데 중요한 분야이다. 온도 측정법 중에서 레이저를 사용한 방법은 공간적($<0.1 \text{ mm}^3$), 시간적($<10 \text{ ns}$) 고해상도를 가진 비삽입식 측정이 특징이다. 그러므로 이러한 기술을 이용하여 층류유동에서 정확한 온도와 난류유동 내에서의 정확한 확률분포함수(PDF)를 측정할 수 있다. 더욱이 최근에 들어와서 레이저 산란법과 레이저 유도 형광법(laser-induced fluorescence)을 이용하여 2차원 온도 측정이 가능해지고 있다. 이 글에서는 레이저를 이용한 광학적 측정 방법 중에서 방사 및 투과법(emission-transmission method)을 소개하고자 한다.

여기에서 사용한 방사 및 투과법은 축대칭의 프로판 층류 확산화염에서 가시광선($\lambda=632 \text{ nm}$)과 근적외선($\lambda=800 \text{ nm}, 900 \text{ nm}$) 파장대에 대한 매연입자의 방사율 및 투과율의 측정으로부터 토모그래피를 이용하여 매연입자의 온도와 농도분포를 구하는 방법이다. 열역학적 평형상태에서 화염내 매연입자의 방사는 Planck의 흑체복사와 매연입자의 흡수계수의 곱으로 표시된다(Kirchhoff's law). 그리고 측정되는 화염의 방사는 측정방향으로 경로적분된 값으로 측정되므로 이

경로적분된 값으로부터 역변환과정을 거치게 되면, 내부점에서의 방사를 계산할 수 있다.

파장에 대한 자체흡수효과를 고려한 화염의 방사는 다음과 같다.

$$I_{\lambda,r}(y) = \int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{\sqrt{R^2-y^2}} \alpha_{\lambda,a}(x, y) B_{\lambda}(T) \times \exp\left[-\int_{x,y}^{\sqrt{R^2-y^2}} \alpha_{\lambda,e} \times (x', y') dx'\right] dx \quad (8)$$

여기서, $I_{\lambda,r}$ 는 관측경로를 따라 측정되는 화염만의 방사이고, $\alpha_{\lambda,a}$ 와 $\alpha_{\lambda,e}$ 는 각각 국소 흡수계수와 국소소멸계수이다. 레이저 산란 영역에서는 국소산란계수는 무시할 수 있으므로 국소흡수계수와 국소소멸계수는 같다. $B_{\lambda}(T)$ 는 Planck 함수로서 식 (9)와 같다.

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]} \quad (9)$$

여기서, $I_{\lambda,o}$ 는 입사광의 강도로서 화염단면을 지나면서 화염내에 분포하는 매연입자에 의해 지수함수로 감소된다(Bouguer's law). 이때 화염의 방사 $I_{\lambda,r}$ 도 함께 측정되므로 입사광 $I_{\lambda,o}$ 에 대한 측정강도 I_{λ} 는 다음과 같다.

$$I_{\lambda}(y) = I_{\lambda,r}(y) + I_{\lambda,o} \exp\left[-\int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{\sqrt{R^2-y^2}} \alpha_{\lambda,e}(x, y) dx\right] \quad (10)$$

광투과율(transmittance) τ_{λ} 는 식 (10)으로부터 다음과 같다.

$$\tau_{\lambda}(y) = \frac{I_{\lambda}(y) - I_{\lambda,r}(y)}{I_{\lambda,o}} \quad (11)$$

매연입자의 온도와 농도분포를 구하기 위하여, 식 (10)에서 볼 수 있듯이 입사광의 주사 유무에 따라 화염단면을 통과한 광도를 측정하는 것이 필요하다.

그림 7에 나타낸 실험에서는 적외선 방출기(IR emitter)를 사용하여 화염의 방사를

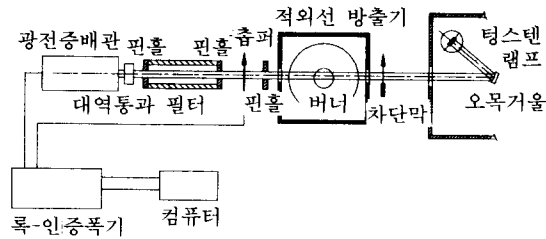


그림 7 방사 및 투과법을 위한 실험장치

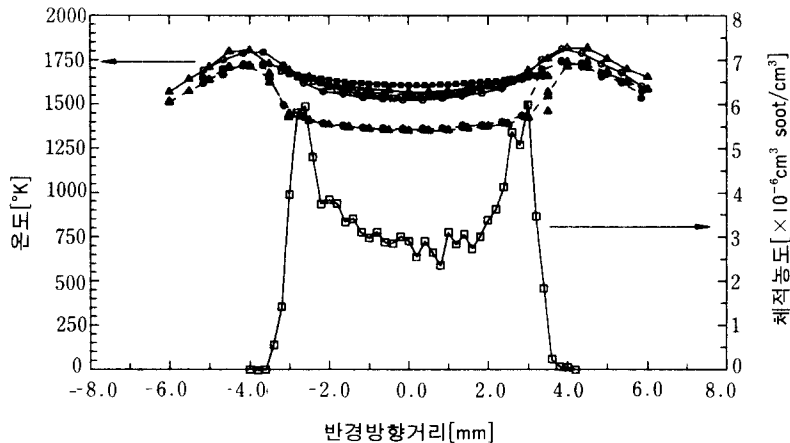


그림 8 층류 확산화염의 70 mm 높이에서의 온

열전대비드 지름 0.22 mm (● : 측정치, ○ : 복사보정치), 열전대비드 지름 0.31 mm (▲ : 측정치, △ : 복사보정치), 방사투과법 (■ : 평균치, □ : 측정치)

보정하였다. 적외선 방출기를 화염위치에 두고 방사율 및 투과율 측정시와 동일한 세팅 하에서 적외선 방출기의 방사를 측정하였다. 이 측정을 통하여 본 실험의 광학장치의 이득(gain)을 알게 되며, 다음과 같이 화염의 절대 방사율이 구해진다.

$$(gain) \times [\epsilon_{IR} \times B_{\lambda}(T_{IR})] = i_{\lambda,IR} |_m \quad (12)$$

$$I_{\lambda,f}(y) = I_{\lambda,f} |_m / (gain) \quad (13)$$

따라서 화염의 절대방사율은 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$I_{\lambda,f}(y) = I_{\lambda,f} |_m \frac{\epsilon_{IR} \times B_{\lambda}(T_{IR})}{I_{\lambda,IR} |_m} \quad (14)$$

여기서, $I_{\lambda,IR} |_m, I_{\lambda,f} |_m$ 는 Lock-in Amp를 통해서 측정된 값이다. (그림 8참고)

4. 맺음말

이상과 같이 입자의 크기와 온도를 측정하는데 사용되는 여러가지 방법들에 대하여 기술하였다.

광학적 방법은 물리적으로 유동을 간섭하지 않는 장점을 제공하지만 이 방법의 한계는 고농도에서의 부정확성이다. 회절법은 신속한 공간적 크기분포를 제공하고, 산란강도 율법과 간섭법은 시간적 크기분포가 측정 가

표 1 입자크기 측정을 위한 광학적방법의 비교

측정방법	경로적분/SPC	측정범위(μm)
고속사진술		5~
홀로그래피		2~1000
간섭법	SPC	3~5000
산란강도율법	SPC	0.1~8
회절법	경로적분	0.2~2000
광소멸법	경로적분	사용과장대 근처
광산란소멸법	경로적분	사용과장대 근처

표 2 온도측정을 위한 광산란방법의 비교

측정방법	정밀도/정확도 (%)	측정범위(K)
진동 라만 산란	2	300~2500
회전 라만 산란	0.3	100~1000
레이저 산란	1	300~2500
레이저 유도 형광법	1	150~2500
방사 및 투과법	3	300~2500

능하고, 광소멸법을 병행하여 입자 평균크기, 체적농도 및 굴절률을 구할 수 있다. 라만 산란은 미소 산란단면적이 너무 낮아 2차원 온도측정에 부적당하고, 국부적 측정시에는 레이저에 의해 발생한 발광과 산란광을 피해야 한다. 그리고 레이저 산란을 2차원 온도측정에 이용하기 위해서는 측정체적 내

에 입자가 존재하지 않아야 한다. 시간해상도가 큰 2차원 온도측정을 위해서는 S/N비가 높은 레이저 유도 형광법을 사용하는 것이 적합하며, 이 방법은 난류유동에서처럼 공간적, 시간적 고해상도를 가진 비삽입 측정이 요구될 때 흔히 사용된다. (표 1, 2참고)

살펴본 바와 같이 모든 방법들이 각각의 장단점을 가지고 있으므로 측정방법의 선택은 측정하고자 하는 입자의 크기 범위 및 실험조건에 따라 적절한 판단이 요구된다.

참고문헌

- (1) Chigier, Norman, 1991, "Combustion Measurements," Hemisphere Publishing Corp.
- (2) Nguyen, Dung D., "Application of Laser to Particles Size Measurement."
- (3) Holman, J. P., 1989, "Experimental Methods for Engineers, Fifth ed., McGRAW-HILL.
- (4) Samuelsen, G. S., "Optical Measurements for Flow Velocity and Droplet Sizing."
- (5) 하영철, 1992, "광산란소멸법을 이용한 층류확산화염내에 매연입자의 크기 및 농도 측정," 한국과학기술원 석사학위논문.
- (6) 송상중, 1993, "방사와 투과를 이용한 층류확산 화염의 매연온도 및 농도 측정," 한국과학기술원 석사학위논문. 