

레이저 토모그래피 가시화 방법

Visualization Method of Laser Tomography

권 철 홍
Chul Hong Kwon



權 哲 洪

- 1953년 4월생
- 자연비 저공해 엔진기술 연구
- 한국에너지기술연구소 수송기
술연구팀

$$\frac{(I-I_0)}{I_0} \propto \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (1)$$

따라서 정량적 측정이 가능한 새로운 방법이 요구되고 있는데 최근 외국에서는 공간분해능이 높은 레이저 토모그래피 (laser tomography) 가시화방법을 활용하는 예가 점차 증가하고 있다. 본고에서는 이와같은 레이저 토모그래피 가시화방법의 원리, 광학계구성 및 활용예 등에 대해 알아보도록 한다.

1. 머릿 말

차량의 엔진을 개발할 때 뉴메리컬 시뮬레이션 코드 (numerical simulation codes)에 의한 실린더내 연소현상의 모델링의 필요성이 크게 대두되고 있다.¹⁾ 그러나 이와 관련하여 실제 연소현상에 대한 정확한 이해가 요구되고 있는데, 이를 위해 최근 레이저광을 이용하는 가시화방법이 보다 활발히 적용되어지고 있다.^{2,3,13,14)}

국내에는 지금까지 연소현상의 파악을 위해 쉘리렌 가시화방법이 많이 사용되고 있으나 이 방법은 다음 식(1)에서와 같이 화상바탕의 밝기 I_0 가 일정하다면 밝기 변화량 $I-I_0$ 를 나이프렛지에 수직인 방향, y 로 적분하여 밀도 ρ 를 구할 수 있으나 실제 광학계의 수차 등으로 화상바탕의 밝기가 일정하지 않아 정량적인 분석이 불가능하다는 문제점을 가지고 있다.

2. 레이저토모그래피의 원리

레이저 토모그래피 (laser tomography: tomê <단면>+ graphein <graphy>)는 원어에서도 유추할 수 있듯이 측정공간에 상당히 얇은 두께의 레이저광을 조사시켜 입자로부터 산란된 광을 CCD 카메라 등의 촬영장치를 이용하여 단층사진과 같은 형태로 가시화 시키고, 얻어진 이미지를 컴퓨터를 이용한 화상해석처리 방법으로 분석, 특성치를 얻는 방법이다. 이때 관측체적내로 입사된 광이 입자에 의해 산란되는 것은 Mie 광산란 (Mie scattering) 법에 따르는데, Mie 광산란법이란 명칭은 균일 매질내에 위치한 균일球형체에 의한 플레인 모노크로매틱 (plane monochromatic)광의 산

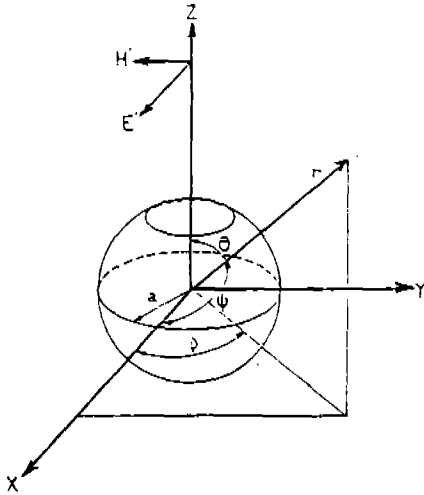


그림 1 Mie 산란광 해석 기본도

란에 관한 문제가 1908년 G. Mie에 의해 풀어진 데 기인하며^{4,5)}, 그림 1과 같이 위치한 입자에 의해 산란된 광의 강도는 식(2)와 같이 표현된다.

$$I_u = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} (i_1 + i_2) \quad (2)$$

여기서 I_u 는 산란광 단위강도, λ 는 입사광 파장, r 은 입자의 직경이며 i_1, i_2 는 입자굴절율(m), 입자크기(α) 및 관찰각(θ)에 따라 변하는 조도함수이다. 따라서 관측체적내의 입자수가 N , 비례상수 K 인 경우 산란광속 I_{rd} 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며 실제 화상해석시는 이 값을 그레이 레벨(gray level)로 변환시켜 이용한다.

$$I_{rd} = K \cdot N \cdot I_u \quad (3)$$

이하 식(1)에서 얻어질 수 있는 결과중 레이저 토모그래피방법의 응용시 유의하여야 할 기본사항 두가지를 정리해 보면 다음과 같다.

2.1 관찰각에 따른 산란광의 강도 변화

그림 2에서 보는 바와 같이 아주 작은 球형 입자의 경우(입자크기변수, $\alpha \rightarrow 0$) 입사광

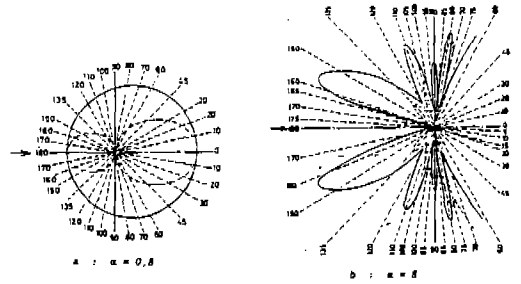


그림 2 구형입자에 의한 광산란도 (굴절율, $n = 1.25$)

은 구중심을 지나며 입사광의 진행방향에 직각인 평면에 대해 대칭인 형태로 산란되고, 입자크기가 커질수록 입사광의 산란형태는 점차 비대칭형으로 변하게 된다. 산란광 강도의 최고값은 관찰각, $\theta = 0^\circ$ 및 180° 에 위치하고 있는 반면, 최소값은 입사광의 진행방향과 직각이 되는 곳에 위치하고 있다. Mie 효과⁶⁾로 알려진 이와같은 사실로부터 가시화화상을 해석할 때 카메라 관찰각에 따라 동일입자의 산란광 강도가 변화하여 화상의 그레이 레벨 해석이 복잡해지는 문제점을 피하기 위해서는 입자들의 산란광을 받아 들이는 CCD 카메라의 관찰각을 항상 일정각도로 고정시켜야 한다(통상 90°)는 점을 알 수 있다.

2.2 입자크기에 따른 산란광의 강도 변화

Rayleigh 영역(입자크기, $d < 0.1 \mu m$)에 속한 입자들의 산란광 강도는 d^6 에 비례하여 변화하고, 기하학적 광학영역($d > 4 \mu m$)에 속한 입자의 경우에는 d^2 에 비례한다.⁷⁾ 반면 중간영역에 속한 입자들의 산란광강도는 비록 d^3 에 비례하는 경향을 띄고 있으나⁸⁾ 산란광의 강도곡선이 회귀직선을 중심으로 심하게 진동하고 있기 때문에 가시화화상의 해석시 그레이 레벨 해석이 복잡해진다(그림 3 참조). 따라서 Mie 이론을 활용하는 경우 취급하는 입자들의 크기가 Rayleigh 영역 또는 기하학적 광학영역(입자크기에 따른 산란광의 강도 변화가 비교적 단조로운 영역)에 속하고 있는지의 여부를 먼저 검토하여야 한다.

실제 내연기관의 연료입자를 측정하는 경우

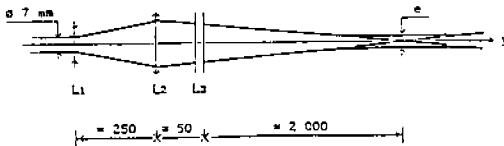
표 1 레이저 특성치 일례

특 성 치	He - Ne laser	Nd : YAG laser
wave length	632.8 nm	532 nm (1,064 nm)
average performance	10 mW	2 W
divergence of beam	0.7 milliradian	< -
beam diameter	6 mm	< -
energy per pulse	-	100 mJ
pulse duration	-	11 ~ 12 ns
frequence of pulse	-	5 ~ 30 Hz

의 광의 크기를 cylindrical 볼록렌즈로 입광시키기 전에 필요에 따라 조절하기 위해 구형 볼록렌즈 및 구형 오목렌즈를 사용한다. 레이저광의 두께는 일반적으로 최대 300~400 μm 까지 줄일 수 있으며, 두께 500 μm , 광폭 100mm의 레이저광 시트를 만들기 위해 사용되었던 렌즈군 배열 일례를 그림 6에 나타내었다. 측정공간 위치에 따라 광로를 변형시키기 위해 평면거울군도 사용한다. 각 렌즈 및 거울은 특히 펄스레이저 사용시 레이저순시 에너지밀도(예 : 5~10 mJ/mm^2)가 높기 때문에 이를 견딜 수 있는 것을 사용하여야만 한다.

3.2 화상액퀴지션 및 처리장치

입자에서 산란된 광을 이용하여 필요한 정보를 얻기 위해서는 CCD 카메라와 화상액퀴지션카드를 이용하여 산란광을 디지털형태의 화상신호로 변환, 컴퓨터로 입력시켜 처리한다. 이와같은 CCD 카메라를 이용하는 방법은 분석대상을 직접 눈으로 관측할 수 있고 필요시 화상으로 출력시킬 수도 있다는 장점으로 인해 선호되고 있다.



L₁: 구형 오목렌즈, L₂: 구형 볼록렌즈, L₃: 실린더형 볼록렌즈

그림 6 렌즈군 배열 일례¹¹⁾

CCD 카메라 : CCD(charge coupled device)는 IL(inline-transfer) 센서, MOS-XY(x/y-addressed Mos)센서 그리고 FT(Flame transfer)센서로 구분된다(자세한 것은 참고 문헌 12 참조). 이중 IL센서형은 복합실리콘 전달게이트(TG)을 통해 二相수직 CCD 시프트 레지스터(shift register)에 연결된 많은 수의 어레이(array)들로 구성되어 있는데(그림 7 참조), 주사는 2:1 인터레이스(interlace) 방식으로 NTSC 방식에 따라 이루어진다(유럽의 경우 PAL 방식 등). 이러한 CCD 소자로 이루어진 카메라는 관측체적의 최소조도가 3.5룩스인 경우에도 사용할 수 있다(표 2 참조).

화상액퀴지션카드 : CCD 카메라를 통해 생성된 신호는 화상액퀴지션카드(이하 frame grabber)를 통해 컴퓨터로 전달되어 화상처

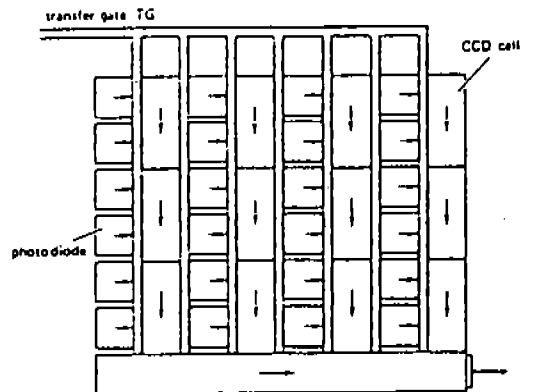


그림 7 IL형 CCD 소자의 개념도

표 2 CCD 카메라 특성치 일례

제조회사 : i 2 S 사
(모델명 : i MC 500)

구 분	특 성 치
CCD 소자	IL형 CCD, 500(H)×582(V)
광소자칩수	17 μm×11 μm
광감응면적	8.8mm×6.6mm
spectral domain	400~1100nm
최소감응조도	3.5lux
S/N 비	55dB(CCIR 567의 경우)
작동온도	-10℃~50℃
선형외곡도	<5%

리된다. 후에임그라버는 CCD 카메라를 통해 전달된 아날로그 신호를 A/D 변화기로 디지털신호로 바꿔(이때 8비트의 해상도를 가진 경우에는 256 그레이 레벨을 형성) 480 lines × 512 pixels 의 한 화상을 만든다(유럽의 경우 512×512). 모든 디지털 신호는 비데오램에 저장되기 전에 input LUT(lookup table)로 전송되어 필요시 그레이 레벨을 수정할 수 있으며 이후 비데오램에 화상이 저장된다(480×512×8 bits, 통상 4장 저장가능). 비데오램에 저장된 화상은 적색, 청색, 녹색의 3색 변환기로 구성된 아웃 루트를 거쳐 아날로그신호로 바뀌어 모니터에 나타나게 된다(그림 8 참조). 이와같은 일련의 조작과 화상처리는 컴퓨터를 통해 이루어진다.

매크로렌즈 : 관측체적내의 입자를 확대 촬영할 필요가 있는 경우 CCD 카메라에 매크로렌즈를 사용하는데 이때 렌즈의 심도변화가 입자의 율곽 변화에 미치는 영향과 in-focus 입자의 선택에 대한 방법을 사전에 충분히 검토, 사용하여야 한다.

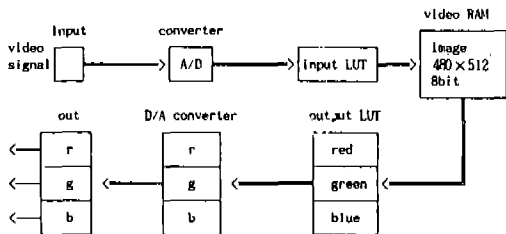


그림 8 frame grabber의 기능도

3.3 관측체적

분석대상의 유체흐름이 가시화되는 관측체적은 기본적으로 레이저광을 관측체적내로 받아들이는 입사창, 레이저입사축과 90°인 위치에 있는 산란광을 받아 들이는 CCD 관찰창, 레이저광이 빠져나가는 후방창 등 총 3군데의 관찰창으로 이루어져 있다(가시화엔진 일례 그림 9 참조).

이때 관측체적내부와 외부 등에서 입자에 의해 산란된 광과 레이저입사광 등에 의한 난반사등으로 야기되는 에러를 가능한한 줄일 수 있도록 무광 흑색처리 등의 조치가 필요하다. 관측창은 가능한한 표면가공정도가 좋고 aberration이 적은 quartz 등으로 가공하는 것이 바람직하다.

3.4 노이즈

레이저토모그래피 방법과 같은 가시화 광계측시 가능한 노이즈는 다음과 같다: 1) 레이저 performance의 시간적 변화, 2) 광로상의 먼지 및 대기교란 등에 의한 레이저광산란, 3) 광학계의 진동, 휨, 불결 등에 의한 노이즈, 4) 포토멀티플라이어 (photomultiplier) 나 포톤(photon)감지기 등의 전자적 노이즈 및 열적 노이즈 등.

3.5 광산란용 혼입입자

전술한 바와 같이 화염전면의 거동을 관측하기 위하여 관측체적내에 광산란용 입자를

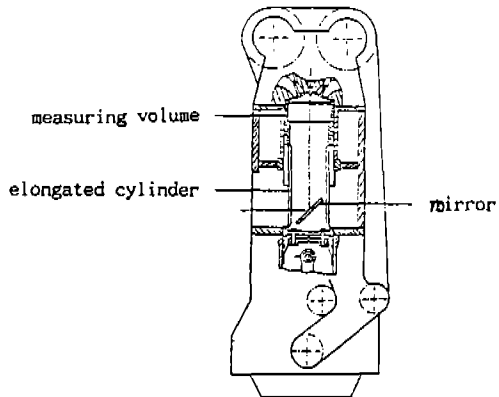


그림 9 가시화엔진

혼입시켜야 할 필요가 있는 경우 입자의 선정에 주의를 기하여야 한다. 균일한 바탕의 화상을 얻기 위해 단지 입자크기가 상당히 작은 고체상 입자(TiO_2 , Al_2O_3 , BN, NaCl, 중공폐물수지질 등 $< 5 \mu m$)를 사용하는 경우, 입자들이 관측창에 부착되어 실험시간이 길어짐에 따라 산란광의 영향이 커져 중극에는 화상관측이 불가능하게 되고, 실험간 실시하는 관측체적내 청소도 상당히 힘들어진다. 내연기관의 경우에는 혼입된 입자가 연료와 더불어 즉시 연소될 수 있는 것이 바람직한데, 저자는 그림 10 과 같은 압축공기이용 혼입입자 생성기로 만든 약 $10 \mu m$ 크기의 해바라기 기름을 사용하여 상당한 좋은 효과를 보였다.¹³⁾

4. 화상처리

frame grabber 를 통해 얻어진 화상의 컴퓨터처리는 분석목적에 따라 그 처리절차가 각기 다르지만 일반적인 화상처리루틴 그림 11에서 화상내 대상물체의 특성치(feature)을 도출하는 단계까지는 거의 같다.

화상을 액퀴지션하는 경우 후레임그라버의 특성상 이중상이 나타나기도 하고, 레이저, 광학계 및 CCD카메라 등의 노이즈 그리고 관측창 등에서의 난반사 등으로 화상내에는 예기치 않았던 명암(shading)이 발생한다. 따라서 화상처리의 첫번째 단계는 이들 불필요한 명암을 제거하는 화상의 restoration 을

실시하는 것이다. 이중상은 수작업으로 제거하게 되고, 웨이딩은 웨이딩함수를 추정하여 조작하는 등의 방법을 사용하여 줄이는데 반드시 다음 단계로 넘어가기 전에 blurring 등과 같이 화상의 필요정보(gray level)가 과도하게 변형되지 않았는가 하는 점을 반드시 확인해 보아야 한다. 또한 morphological operation, gaussian and differential filtering 방법이 이 단계에서 오리지널화상의 화질 개선을 위해 사용된다.

다음은 segmentation 단계로서 전술한 바와 같이 불필요한 명암이 제거된 화상을 대상으로 특정한 그레이레벨(threshold)을 기준으로 2원화(그림 12 와 같이 흑색과 백색)시켜 대상물체가 흑색으로 나타나는 binary

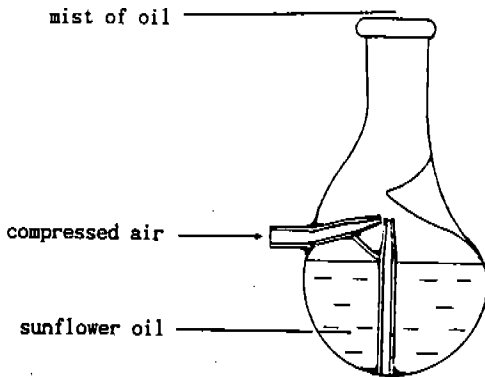
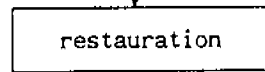


그림 10 광산란용 입자 생성기 일례

불필요한 명암이 있는 화상



불필요한 명암 제거된 화상

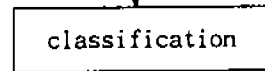
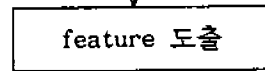
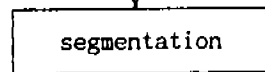


그림 11 화상처리 루틴

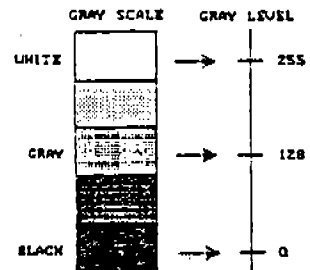


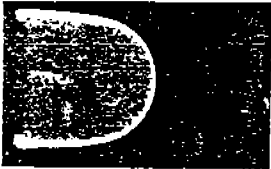
그림 12 화상의 gray level과 gray scale

image 을 얻는다. 이때 threshold 값이 너무 높으면 상당히 많은 대상물체가 background 로 구분되고 너무 낮으면 반대 현상이 일어난다. 특정한 그레이레벨을 선정하기 위해 통상 histogram 분석법이나 local thresholding 법 등이 택해지고 있으나 어느 방법이 최적의 것인지는 화상의 특성에 따라 결정해야 한다.

화염전면의 거동을 해석하는 경우에는 이와 같은 단계를 거쳐 얻는 이원화화상으로 부터 직접 필요한 특성치를 계산해 내면 된다.

그러나 입경측정과 같이 개개의 입자에 관심이 주어지는 경우에는 이원화화상과 gray level 화상을 동시에 이용하여 화상의 본질적인 특성을 구하고 이것으로부터 edge gradient, diffraction ring frequency 및 interior gray level statistics 등의 기법을 사용하여 in-focus 및 out-focus 물체를 구별(classification)한 후 최종적으로 필요한 특성치를 계산해 낸다.

그림 13 과 그림 14 는 화상처리결과의 예들



a : laminar flame



b : turbulent flame

그림 13 정적연소실내 화염전면

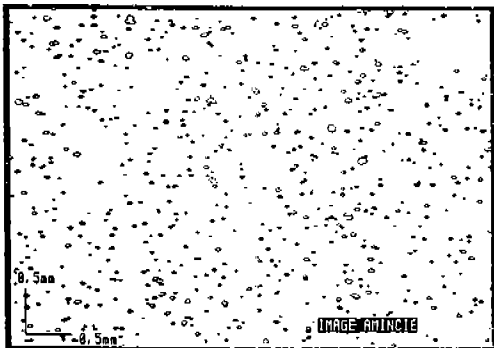


그림 14 흡기매니홀드내의 가솔린입자

로서 전자는 정적연소실내에서 스파크 점화후 전파되어가는 화염전면 화상이고¹⁴⁾, 후자는 흡기매니홀드내를 유동해가는 가솔린 입자의 형상을 morphology operation으로 구한 것이다.’

5. laser tomography의 장점 및 문제점

5.1 장 점

레이저토모그래피방법은 2차원적 가시화 방법이기 때문에 해석대상 현상을 직접 관찰할 수 있게 하여 좁으로서 여러가지 정량적인 분석을 위한 이해를 보다 확실하게 해 줄 수 있다. 더욱이 레이저토모그래피방법은 레이저광의 산란을 그대로 가시화하는 방법이므로, 쉘리렌가시화방법과 같이 정량적인 해석이 거의 불가능한 문제점이나, Xe 광원 등과 같은 다파장 광원을 사용한 토모그래피방법과 같이 각 입자에서의 광산란 양상이 서로 겹쳐져 정확한 해석이 어려운 문제점은 없다. 즉 레이저토모그래피방법은 상대적으로 정량적인 측정이 가능하며, calibration을 하는 경우에는 정량적인 절대값 측정도 가능하다. 물론 광을 이용한 가시화방법이므로 기계적인 probe 삽입 등과 같은 측정체적내의 교란현상 또한 있을 수 없다.

5.2 문 제 점

화염전면 거동분석시 혼입시키는 산란광 입자가 측정체적내에서 유체흐름을 잘 따르며, 바탕 화상의 gray level 을 보다 균일하게 하기 위해서는 입자의 크기가 작고 균일하며 모양이 가능한 비슷한 것을 사용하여야 하는데, 전술한 혼입입자생성기의 경우 완전히 균일한 입자를 얻기가 어렵다. 실험조건에 따라 변하는 혼입 산란광입자 량의 결정, 잦은 청소도 문제다.

이외에 레이저 순시삽사광이 그림15에서 보듯이 가우스분포곡선의 형태를 띄고 있어 입자 하나 하나의 윤곽이 중요한 경우(즉 입자 크기를 측정하는 경우)에 얇은 sheet 광폭을

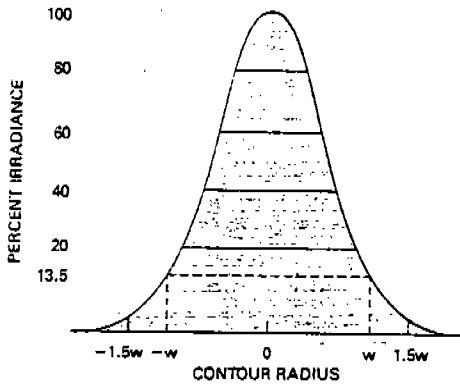


그림 15 TEM₀₀ 모드 레이저 irradiance profile¹⁵⁾ (광반경 w 는 레이저강도가 최고값의 $1/e^2$ 에 해당되는 곳으로 정의)

따라 레이저광 강도를 상대적으로 일정하게 만드는 것도 어렵다.

6. 맺 음 말

국내에서는 차세대 승용차량 개발 관련기술의 일환으로 가시화기법에 의한 광계측의 중요성을 인식하기 시작하고 '93년부터 G7프로젝트 중과제(가시화기법에 의한 연소실내 제특성치 측정 및 현상 분석연구)를 실시할 계획으로 있다. 이와같은 연구에는 분석목적에 따라 여러 가시화 방법이 적용될 수 있지만 특히 레이저토모그래피 방법의 응용이 요망되며, 효율적인 추진을 위해서는 산학연의 관련 인원들간의 적극적인 합동연구가 요망된다.

가시화엔진도 관련 업체 및 연구소간에 협의하여 국내에서 사용할 수 있는 표준 모델을 설계하여 공동으로 사용하는 경우 개별적으로 개발하는 경우 필요한 시간 및 경비를 줄일 수 있고 이를 이용한 관련 제연구간에 유기적인 데이터 교환도 가능하리라 본다.

참 고 문 헌

1. Franz Durst, "Optical techniques for fluid and heat transfer", *Experimental heat transfer, Fluid mechanics and thermodynamics*, pp.32-

- 49, 1988.
2. F.V. Bracco, "Structure of flames in premixed charge I.C. engines", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.58, pp.209-230, 1988.
3. T.A. Baritaud, R.M. Green, "A 2-D flame visualisation technique applied to the I.C. engine", SAE paper 860025, 1986.
4. G. Mie, "Beitrage zur optik truber medien, speziell kellodialer metallosungen", *Ann. der Physik. Folge 4*, 37, pp.377-452, 1908.
5. Kerker Milton, "The scattering of light and other electromagnetic radiation", Academic press, New York, 1969.
6. Born Max, Wolf Emil, "Principle of optics-Electromagnetic theory of propagation interference and diffraction of light", 6th edition, Pergamon press, Oxford, 1988.
7. Franz Durst, "Review-Combined measurement of particle velocities, size distributions and concentration", *Transactions of the ASME*, Vol.104, September, pp.284-296.
8. J. Lescure, "Tomographie laser et mesure de concentration : Application à un mélange gazeux", Thèse de université Paris VI, 1990.
9. 권철홍 등, "레이저토모그래피 방법을 이용한 연료공기 혼합기의 특성치 측정 방법", 한국자동차공학회 추계학술대회, pp.120-129, 1991.
10. H. Kogelnik, T. Li, "Laser beams and resonators", *Applied optics*, Vol.5, No.10, pp.1550-1555, 1966.
11. 권철홍, Développement d'une méthode de mesure de concentration des gouttelettes du mélange carburé par tomographie laser associé à un système de traitement d'image", Thèse de université Paris VI, 1991.
12. "Flame-transfer, X/Y and interline image sensors, how do they compare ? ", Philips technical publication 170, 1985.
13. 권철홍 등, "Etude par visualisation tomographique de fronts de flamme dans une chambre de combustion de volume constant", Colloque de L'ARC, "Modelisation de la combus-

tion dans les moteurs à piston", 1989, PARIS.
14. 권철홍 등, "Flame propagation behavior in a variable hydrodynamic constant volume combustion chamber", in "Dynamics of deflag-

rations and reactive systems : Flames", edited by A.L.Kuhl et al., Prog. in Astronautics and Aeronautics, Vol.131, pp.335-377, 1991.
15. "Optics guides 5", melles griot, p.20-12, 1991.