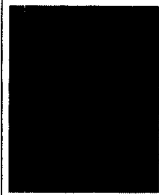


엔진 내의 유동장해석을 위한 최근의 광응용 계측 기술


이기형 · 이창식

Recent Progresses of Optical Diagnostics for Analyzing Engine Flow Field

Ki-Hyung Lee and Chang-Sik Lee



- 이기형(한양대 기계공학과)
- 1960년생
- 엔진 내의 가스유동해석을 전공하였으며, 희박연소와 저공해(LEV) 엔진에 최적한 연소시스템 개발 및 광응용 연소계측에 관심을 가지고 있다.



- 이창식(한양대 기계공학과)
- 1946년생
- 열공학을 전공하였으며, 연소열역학, 연료의 중발 및 연소특성, 연소기관 내의 디젤기관의 연소, 과급기관의 연소 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

지구상의 환경문제 해결의 일환으로, 최근 자동차용 엔진에서는 열효율이 높은 희박연소(lean burn)기술과 EGR(exhaust gas recirculation)기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구를 수행함에 있어서 혼합기 형성과 화염의 전파속도에 결정적인 영향을 미치는 가스유동장의 제어 기술이 중요한 과제로 부각되고 있다. 이와 같은 과제를 해결하기 위하여는 연료와 공기의 혼합 및 연소에 기여하는 평균유속과 난류강도, 난류의 생성 및 붕괴 과정의 해명 등 엔진 내의 가스유동에 대한 해석기술이 절실히 요구되고 있다.

지금까지 가스유동에 관한 연구는 여러 연구자에 의하여 많이 수행되어 왔으나, 엔진 내의 유동은 측정대상이 극히 복잡한 유동장일 뿐만 아니라, 현상이 고속이기 때문에 불

꽃방전법, 열선유속계 등 종래의 측정방법^(1,2)으로는 현상규명이 어려운 특징을 가지고 있었다. 1970년대 중반, 시간과 공간적인 분해능이 높고, 비접촉 계측법인 LDV(laser Doppler velocimeter)가 처음으로 엔진 내의 가스유동 측정에 적용된 이래, 각 연구소와 대학, 자동차회사 등에서 많은 연구가 진행되어 왔으며,^(3~7) 현재는 범용적으로 사용되고 있다. 그러나 유속과 가스의 유동특성이 급속히 변화하는 연소실 내에 LDV를 적용하기 위하여는 엔진 특유의 제약이 있으며 원리상 피할 수 없는 산란입자의 공급과 레이저 빔(laser beam) 도입용 관측창의 설치 등 많은 문제점들을 안고 있으므로, 이러한 문제점들을 해결하기 위한 노력 또한 필요하다고 하겠다. 최근에는 LDV에 의한 점계측수법 이외에도 다양한 용도의 레이저와 CCD카메라 등 각종 광학측정 장치의 진보와 이들을 이용한 데이터 처리장치의 비약적인 발전에 힘입어 엔진 내의 유동장이 다차

원적인 공간개념으로 해석되어지고 있다.

엔진 내의 유속측정은 최종적으로는 연소실 내의 연소현상을 해석하고, 나아가서는 가스유동의 제어에 의한 연소 그 자체를 제어하는 것에 목적이 있다. 이와 같은 목적을 달성하기 위하여는 측정대상과 용도에 적합한 광응용 계측법의 개발과 실제 엔진에 적용될 수 있는 기술이 확립되어야 할 것이며, 이러한 계측법에 의하여 측정된 유동장과 연소와의 상관관계에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

이글에서는 유속측정법으로서 널리 사용되고 있는 LDV를 엔진에 도입할 경우 발생하는 문제점의 해결책에 대하여 다루고, 엔진 내의 난류해석을 위하여 필자가 소속하였던 연구실에서 개발한 새로운 형태의 LDV와 측정장소의 제약과 문제점을 개선하기 위하여 개발한 광파이버식 LDV (FLDV)에 대한 소개 및 공간스케일의 해석을 가능하게 한 다점 동시측정 LDV의 기본적인 광학계에 대하여 설명하고자 한다. 이외에도 유동장의 해석기술로서 최근 각광을 받기 시작한 가시화 기술과 PIV법 (partle imaging velocimetry)에 대하여도 소개하고자 한다.

여기서 소개하고자 하는 광응용 계측기술들은 완성된 단계가 아니고, 아직도 개발 중이며 또한 개선하여야 할 부분도 많이 있으므로 연구과제로는 충분히 흥미가 있는 분야라고 생각된다. 따라서 이글에 소개되는 내용이 엔진 유동장계측에 관한 연구를 수행하고자 하는 분들에게 조금이라도 참고가 되었으면 하는 바이다.

2. 유속 측정 시스템의 확립

2.1 산란입자의 선택

LDV계측은 유체에 추종되어 움직이는 입자에 의한 산란광으로부터 유체속도를 추정하는 계측법이므로 산란입자(tracer)의 존재는 원리상 불가피하다. 또한 양호한 도플러

신호를 얻기 위하여는 산란입자의 입경 (particle diameter)과 형상이 중요하며, 흐름에 대한 충분한 추종성도 요구되므로 본 실험에서는 재질과 입경이 서로 다른 7종류의 산란입자를 구입하여, 엔진 내의 유속측정에 적합한 산란입자를 선택하였다. 이 경우 각 입자의 추종성, 형상, 선명도(visibility) 등을 선택의 기준으로 하였다.

그림 1은 전자현미경에 의하여 분석된 7종류의 산란입자에 대한 형상사진과 광투과법에 의한 입경분포를 나타내며, 대표입경은 SAE Fine Dust가 가장 작은 값을 보여주고 있다.

각 입자의 대표입경을 이용하여 구형입자의 속도가 변동하는 1차원 점성유동장에 대한 추종성을 계산한 결과 얻어진 응답진폭과 위상차를 그림 2에 나타낸다.

이 결과에 의하면 입경이 작고 가벼운 입자일수록 응답성이 좋으며, SAE Fine은 10 KHz의 변동유속에 대하여도 90% 이상의 추종성을 보여주고 있다. 그림 3은 LDV에

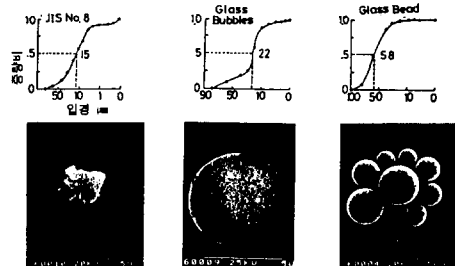
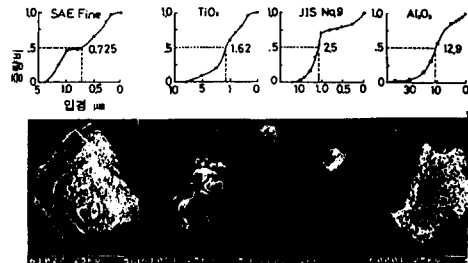


그림 1 각종 산란입자의 형상 및 분포

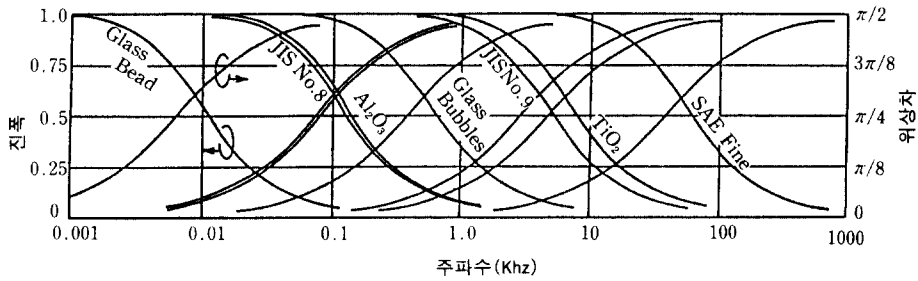


그림 2 각종 산란입자의 응답성

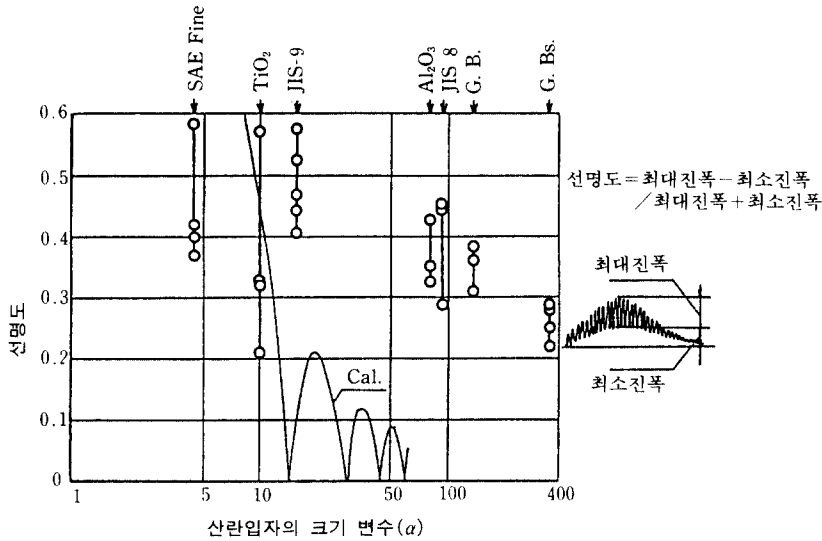


그림 3 각종 산란입자의 선명도

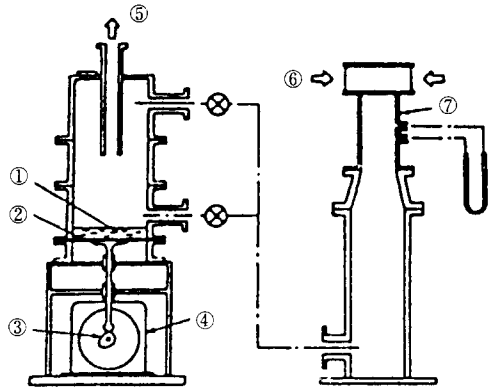
의한 산란입자의 도플러신호로부터 구해진 각 산란입자의 선명도(visibility)를 나타낸다.

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 입자들 사이에는 입경분포가 존재하기 때문에 선명도에도 차가 발생되고 있으며, 입경이 클수록 선명도는 악화되는 경향을 보이고 있다. 이상과 같은 결과에 의하여 LDV용 산란입자로서 SAE fine dust를 선택하였다.

2.2 산란입자의 공급법

엔진을 대상으로 한 산란입자의 공급방식

으로서는 입자를 연속적이며, 또한 입경을 균일하게 공급하는 것이 바람직하다. 필자가 사용한 산란입자의 공급장치는 가진기(vibrator)와 사이클론을 이용하여 산란입자의 선택공급이 가능한 구조로 되어 있다. 또한 하부에는 다이어프램(diaphragm)을 설치하여 여기에 부착된 밸브가 회전수제어 가능한 모터에 의하여 상하운동함으로써 산란입자를 공기흐름에 편승시키도록 그림 4와 같은 방식을 채용하였다. 그리고 산란입자가 수분에 의하여 응축되지 않도록 흡기상류에는 습도 조절기를 설치하였다.



* ① 산란입자, ② 다이어프램, ③ 캠, ④ 진동모터, ⑤ 연소실, ⑥ 공기, ⑦ 증류유량계.

그림 4 산란입자의 공급장치

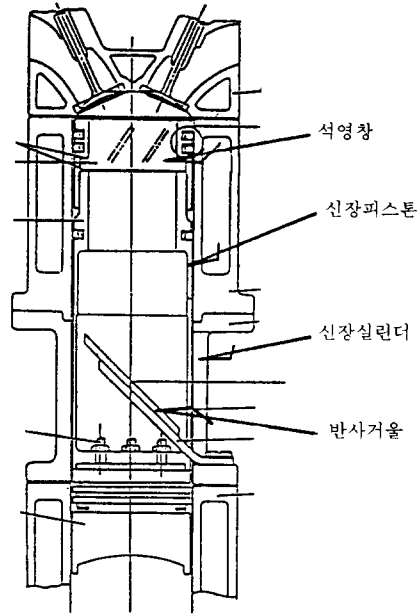


그림 5 하방 측정시스템

2.3 관측창의 설치방법

레이저 빔을 도입하기 위한 관측창(optical window)은 측정대상의 형상을 변화시키지 않아야 되며, 계산모델의 검증과 유동장 전체를 파악하기 위하여는 충분한 측정영역이 확보되어야 한다는 요구조건들을 만족시켜야 한다. 이를 위하여 아래와 같은 측정방법들이 주로 적용되고 있다. 특히 엔진에 관측창을 설치할 경우, 오일에 의한 창이 오손이 염려되므로 무윤활 피스톤링을 사용함으로써 오일을 공급하지 않고도 운전이 가능한 시스템을 채택하고 있다.

2.3.1 하방입사에 의한 측정법

연소실 형상의 변화를 초래하지 않는 실제 엔진 내의 유속측정을 위하여는 그림 5와 같이 석영제의 투명한 피스톤을 통하여 아래로부터 레이저 빔을 입사하는 후방 산란방식의 유속측정이 적합하다. 이 방법을 사용할 경우 해결되어야 할 문제점들로는 충분한 산란광 강도를 얻기가 힘들다는 점과 연소실벽으로부터의 반사광의 영향, 또는 측정영역의 제약 등을 들 수 있다. 필자는 후술하는 새

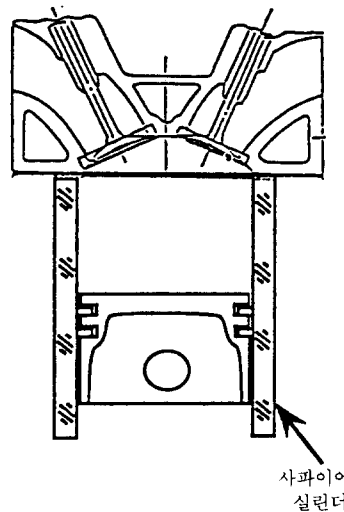


그림 6 측방 측정시스템

로운 광학계를 이용한 LDV의 개발과 반사거울의 각도조절 등을 통하여 이러한 문제점들을 극복할 수가 있었고, 이 방법을 이용하

여 각 사이클당의 난류강도 측정을 시도하였다.

2.3.2 측방입사에 의한 측정법

연소실 내의 가스유동을 3차원으로 해석하기 위하여 실린더 혹은 실린더일부를 석영제로 한 후, 측방으로부터 레이저 빔을 도입하여 다수점에서의 스월방향과 측방향의 유속 분포를 측정한 예는 많이 보고되고 있다. 최근에는 발화운전이 가능한 두께 5mm의 사파이어로 만든 실린더를 사용하여 가스유속의 측정과 화염전파의 사진촬영이 시도되고 있으며,⁽⁸⁾ 이와 같은 시스템은 그림 6과 같다.

3. 엔진 내의 유속측정 기술

머리말에서 언급한 바와 같이 엔진 내의 가스유동은 온도와 압력이 급격히 변화하는 상태이므로 온도변화에 따른 교정이 필요한 열선유속계의 적용은 매우 어려운 실정이다. 따라서 유속산출시 교정이 필요하지 않고, 비접촉식 계측법인 LDV가 엔진 내의 유속 측정 기술의 주류를 이루고 있다. 이러한 LDV에 의한 유속측정 결과는 연소실 내의 유동특성(swirl과 tumble)을 명백히 할 뿐만 아니라 전산유체역학(CFD)을 이용한 계산 모델의 검증에도 널리 사용되고 있다.^(9,10)

한편 LDV계측은 기본적으로 산란입자로부터의 간헐적인 신호밖에 얻을 수가 없으므로 난류강도(turbulence intensity)의 계측에는 적합하지 않다고 여겨져 왔다. 그러나 엔진연소에 관여하는 난류의 주파수 성분은 저주파 영역이라는 사실이 보고되고 있으므로 LDV에 의한 각 사이클당의 난류강도 계측도 중요한 의미를 갖는 유용한 데이터라고 생각된다. 따라서 최근에는 엔진 내의 난류에 대한 정확한 해석을 위하여 광학계, 데이터 처리장치의 개량에 의한 SN비(signal noise ratio) 향상에 관한 연구가 활발히 진

행되고 있다. 필자가 소속되었던 연구실에서 수행되고 있는 계측기술을 중심으로 각종 LDV의 개발동향에 관하여 소개하고자 한다.

3.1 고성능 데이터 레이트화

사이클변동과 분리된 각 사이클당의 난류를 해석하기 위하여는 크랭크각도 1°당 1개 이상의 데이터를 측정하지 않으면 안되므로 LDV의 데이터 레이트를 향상시켜야 하는 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 시판되고 있는 LDV의 광학계 일부를 개량하여 후방 산란방식으로 1사이클의 평균 데이터 레이트를 20KHz 이상 실현시킨 예도 보고되고⁽¹¹⁾ 있으나, 시판의 제품을 사용하는 한 어떤 한계점을 능가하지 못하는 경험을 자주 하였으므로, 필자는 브래그셀(bragg cell)에 의한 변위(shift)방식 대신 회절격자(grating disk)에 의한 변위방식을 이용한 LDV 광학계를 제작하였다.⁽¹²⁾

이러한 광학계를 채용함에 따라 주파수변위에 기인하는 전기적노이즈가 제거됨은 물론이고, 빔분리기(beam splitter)가 불필요하게 되므로, 광학계의 조정이 용이하게 되었다. 또한 고배율의 빔팽창장치(beam expander)를 사용함으로써 공간분해능의 향상과 산란강도의 향상을 도모하였다. 이외에도 산란광의 수광입체각을 크게 함에 따른

표 1 LDV의 주요제원

항 목	시판 LDV (DANTEC)	제작 LDV
초점 거리	750 mm	100 mm
팽창비	3.75	4.5
빔 교차각	5.18°	4.85°
플린지 간격	2.85 μ m	3.04 μ m
측정체적	$\phi 0.10 \times 1.12$ mm	$\phi 0.05 \times 0.59$ mm
에너지 밀도	1	4.08
수광 F값	F5.1	F3

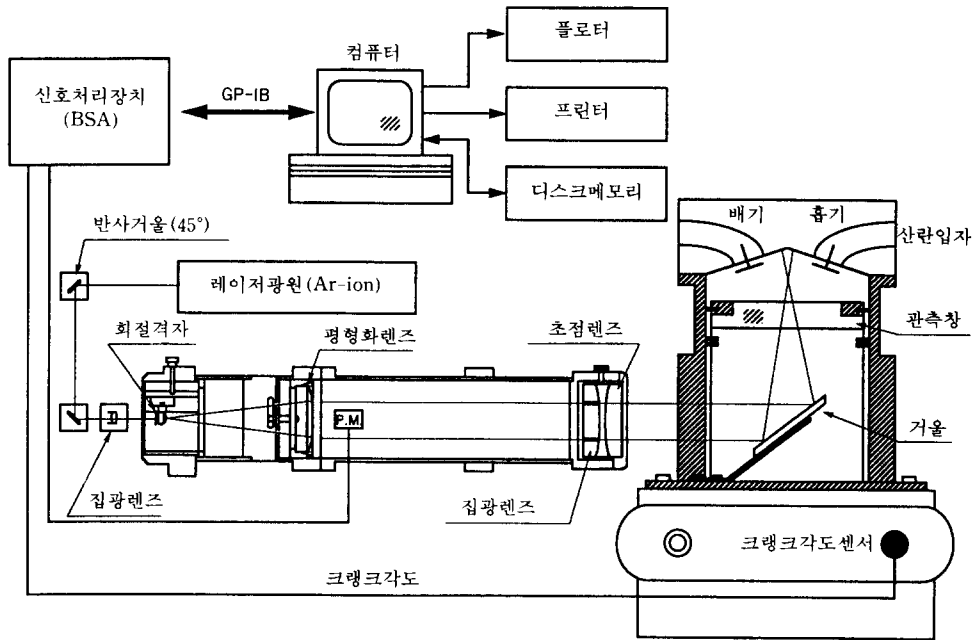


그림 7 회전격자식 LDV의 광학계 및 유속측정 시스템

SN비의 향상도 얻을 수가 있었다. 이와 같은 특징을 갖도록 만든 필자가 제작한 LDV와 기존LDV의 제원비교를 표 1에 나타낸다. 이 표에서 알 수 있는 바와 같이 제작한 LDV의 경우, 측정 체적 내의 에너지밀도가 4배 정도 강하며, 수광부의 밝기를 나타내는 F값도 약 40% 정도 향상되고 있다.

본 실험에서 사용한 LDV의 광학계 및 유속측정 시스템은 그림 7과 같다. 신호처리장치로서는 비교적 저 SN비에 강한 BSA (burst spectrum analyzer, DANTEC사 제품)를 사용하였고, 새로운 광학계의 LDV와의 조화에 의하여 후방측정 방식임에도 불구하고 측정전구 간의 유효데이터 레이트가 20 KHz 이상 확보됨에 따라, 크랭크각도 1°당 1개 이상의 유속데이터가 얻어지게 되었다. 이와 같은 유속측정 시스템을 이용하여 연소실 내의 난류특성을 측정한 결과를 그림 8에 나타낸다. 이 경우의 데이터 처리방법은 이동평균법(moving averaged method)을 사용

하였으며, 저주파성분과 고주파성분을 분리하기 위한 이동평균화 구간은 10°크랭크각으로 하였다. 또한 그림 8에 나타난 기호 Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ는 서로 다른 유동장의 특성으로 각각 스월류(swirl, Ⅱ), 경사스월류(inclined swirl, Ⅲ), 제어되지 않은 일반류(Ⅳ), 텀블류(tumble, Ⅴ)의 특징을 나타내고 있다. 이 결과로부터 연소실 내에 텀블류를 형성시키는 것이 점화시기에 상응하는

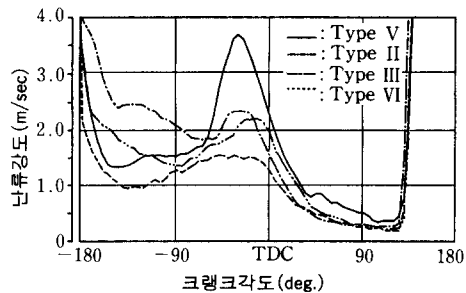
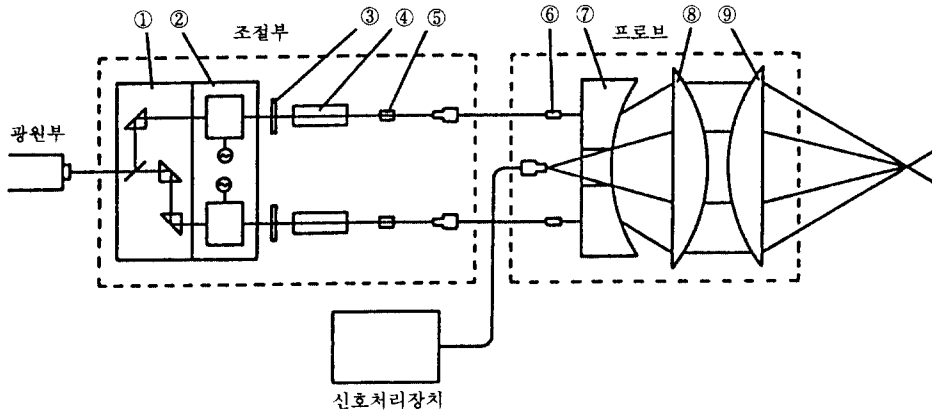


그림 8 난류강도의 측정결과 비교



- * ① 빔분리기, ② 이중 브래그셀, ③ 1/2 파장판, ④ 로드렌즈, ⑤ 집광렌즈,
- ⑥ 평형화정밀렌즈, ⑦ 구멍, ⑧ 뚫린팽창렌즈, ⑨ 초점렌즈.

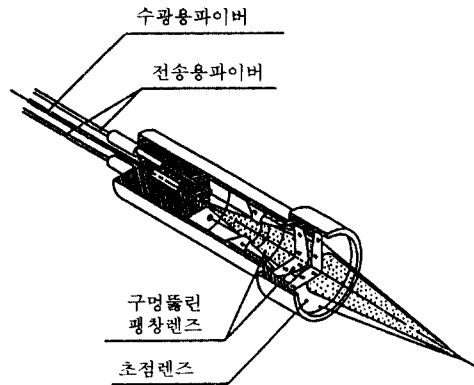
그림 9 광파이버 LDV의 광학계

TDC 전의 난류강도 증가에 효과적이란 사실이 판명되었다. 이와 같이 LDV에 의하여 연소실 내의 난류강도가 정확하게 측정되어 짐에 따라 연소에 유효한 가스유동장의 조건을 파악할 수 있게 되었으며, 유동장의 최적 제어를 위한 중요한 정보를 얻을 수 있게 되었다.

3.2 소형화

앞에서 다룬 바와 같이 LDV의 진보에 의하여 엔진 내의 유동상태가 정확하게 측정되고 있지만, 레이저 광원부를 포함한 LDV의 광학계가 대형이고, 렌즈의 초점거리 또한 제한되어 있기 때문에 측정장소의 선정에 많은 어려움이 따르고 있다. 따라서 최근에는 광파이버(optical fiber)를 이용하여 광학계를 소형화한 광파이버식 LDV 시스템(FLDV)이 개발되고 있으며,⁽¹³⁾ 일부 광학메이커에서 시판하고 있다. 이와 같은 FLDV는 측정체적이 종래의 LDV에 비하여 크다는 이유와 광파이버를 통한 레이저의 전송시 발생하는 전송손실(transmission efficiency) 등의 이유로 SN비가 저하된다는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점들을 해결

하기 위하여 필자가 사용한 FLDV⁽¹⁴⁾의 광학계와 프로브(probe)의 형상을 그림 9와 10에 나타내고 있다. 이 프로브는 구멍을 뚫은 렌즈를 이용한 팽창기구(expanding lens)에 의하여 초점렌즈(front lens)에 입사하는 빔직경을 확대시킴으로써 측정체적을 작게 하였



- * 프로브 직경: $\phi 18$, 초점거리: 50 mm, 측정 체적 폭: $71.2 \mu\text{m}$, 높이: $71.7 \mu\text{m}$, 길이: 0.62 mm, 플린지 간격: $2.77 \mu\text{m}$, 플린지 수: 25개, SNR 계수: 6.32×10^{-6}

그림 10 광파이버 LDV의 프로브형상

표 2 측정체적의 크기

	제작 FLDV	시판 LDV (DANTEC)	시판 LDV (DANTEC)	FLDV (DANTEC)	FLDV (TSI)	FLDV (KANOMAX)
과장 (nm)	632.8	632.8	488.0	632.8	632.8	632.8
초점거리 (mm)	50	310	310	50	60	60
프로브 직경 (mm)	φ18	φ120	φ120	φ14	φ14.22	φ12
측정체적 직경 (μm)	71.2	227	79.5	149	140	130
측정체적 길이 (mm)	0.62	2.36	0.83	1.87	2.4	2.89
플린지 간격 (μm)	2.77	3.28	2.53	3.97	3.87	7.1
플린지 수	25	69	31	30	37	18
SNR계수 (×10 ⁻⁶)	6.32	0.47	2.29	0.61	0.72	0.29

*SNR계수 = $(D_a \cdot d_{in} / r_a \cdot f)^2$ 여기서, D_a 는 수광부 직경, d_{in} 는 초점렌즈에서의 빔 직경, f 는 수광부 초점거리, r_a 는 초점거리를 나타낸다.

다. 이 결과 측정체적에서의 산란광강도가 향상되었으며 렌즈의 구멍에 의하여 산란광의 수평시 공간필터의 역할도 겸하게 되어 SN비가 한층 더 향상되었다. SN비를 평가하는 지표(SNR)를 이용하여 다른 FLDV와 성능을 비교한 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 FLDV는 종래의 LDV와 시판되는 FLDV에 비하여 훨씬 높은 SN비를 보여주고 있다.

본 FLDV를 이용하여 2행정 엔진의 소기공(scavenging port) 내 유속을 측정하기 위한 프로브의 위치는 그림 11과 같으며, 이 결과 구해진 소기공 내의 평균 유속을 그림 12에 나타내었다. 소기공이 열림(SO)과 동시에 연소실의 가스유입에 의한 속도의 급격한 상승이 나타난 후, 크랭크 각 145° 지점에서 최대유속에 달한다. 그 후 상승속도와 비슷한 정도로 유속이 하강한 다음 피스톤이 BDC를 지나면 배기관으로부터의 반사압력파의 영향으로 여겨지는 제2의 속도상승이 나타난 후 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다.

LDV의 또 다른 소형화기술로서 현재 활발히 연구가 진행 중인 분야는 반도체레이저를 이용한 LDV의 개발이라고 할 수 있다.

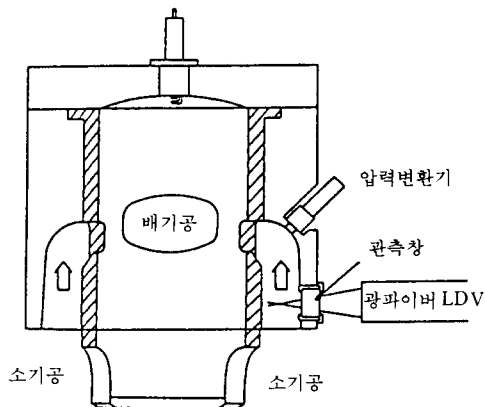


그림 11 FLDV 프로브의 위치 및 유속 측정법

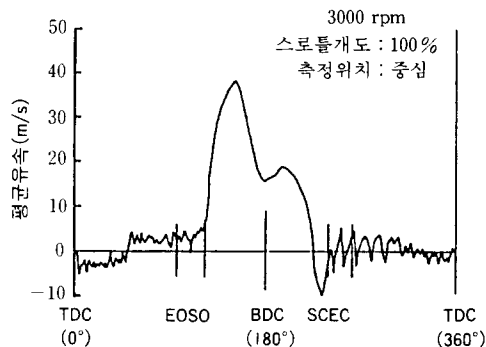


그림 12 소기공내의 평균유속 측정결과

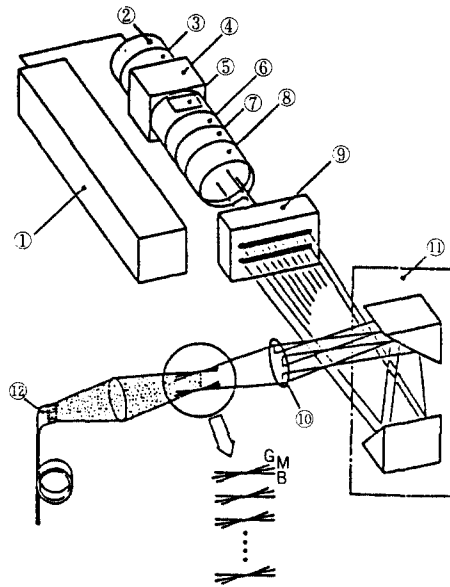
독일 알렉산더 대학의 Durst 등은 고출력 반도체레이저를 사용하여 한층 더 소형화된 DFLDV (diode laser fiber-optic LDV)를 개발하고 있다.⁽¹⁵⁾ 후방 산란 방식인 이 LDV는 100 mW 출력의 적외 반도체레이저와 평형화렌즈(collimator)와 브래그셀 등의 광학계, 그리고 검출부를 하나의 케이스로 일체화하였으며 광파이버를 이용한 $\phi 30$ mm의 프로브(probe)로 구성되어 있다. 이 DFLDV는 엔진 내의 유동계측에도 적용되고 있으므로 가까운 시일 내에는 휴대용 FLDV의 실현 또한 기대되고 있다.

3.3 다점 동시 계측법

난류특성치의 중요한 인자 중의 하나가 공간스케일(vortex의 크기를 나타냄)이며, 기본적으로 2점 이상의 동시측정이 필요시 되고 있다. 난류강도에 비하여 평균유속이 충분히 큰 경우에는 평균유속과 시간스케일의 곱이 공간스케일과 유사성을 가진다는 Taylor의 가설에 의거하여 한 점의 계측결과로도 난류의 해석이 가능하지만, 엔진과 같은 난류강도가 큰 유동장의 난류해석에는 한 점만으로는 부족하다고 여겨진다.

현재 시도되고 있는 다점 동시측정법의 몇 가지 예를 소개하자면 우선 Kobe 대학의 Ikeda 등이 개발한 방법⁽¹⁶⁾인 그림 13과 같다.

Ar-ion 레이저를 광원으로 하고 빔분리기(beam splitter)에 의하여 빔을 2개로 나누고 2중 브래그셀을 이용하여 주파수변위를 실시한다. 그 후 색분리를 시행하여, 빔 팽창장치를 통과시킨 다음 출사된 3개의 빔을 6종류의 분리기(splitter)에 의하여 30개의 빔으로 분리한 후 집광렌즈를 통하여 10점의 2차원 측정체적을 형성하도록 광학계를 구성하고 있다. 30개의 빔으로 분리할 때 빔의 강도가 저하되지 않도록 각별히 노력하여 종래의 LDV와 동등한 정도의 빔 강도분포를 얻고 있다. 이와 같은 방법을 사용할 경우



* ① 아르곤-이온 레이저, ② 빔분리기, ③ 빔이송기, ④ 이중 브래그셀, ⑤ 컬러빔 집광기, ⑥ 컬러빔 분리기, ⑦ 빔전송기, ⑧ 빔팽창기, ⑨ 복수 분리기, ⑩ 초점렌즈, ⑪ 이동장치, ⑫ 수광용 파이버.

그림 13 다점 동시측정 LDV시스템의 광학계

광학계의 조정에 많은 노력을 필요로하므로 영국의 Ricardo 연구소에서는 그림 14에서 나타내는 장치를 사용하여 간단한 방법으로 다점 동시측정을 하고 있다.⁽¹⁷⁾ 이 방법은 거울을 회전시킴에 따라 레이저 빔을 소인(scanning)함으로써 공간 내의 다점을 동시에 측정하는 원리이다.

다음으로 Princeton 대학의 Bracco 등에 의한 계측⁽¹⁸⁾은 그림 15와 같은 타원형의 길쭉한 하나의 측정체적 내의 2점으로부터 동시에 유속측정을 실시하여, 상호 상관계수를 이용하여 난류의 적분공간 스케일을 산출하고 있다. 한번에 2점의 순간유속을 측정하기 위하여 레이저빔의 교차각 α 를 상당히 좁은 1.25° 로 하고, 측정점간(AB간)의 거리를 최대 5.5 mm까지 이동시킬 수 있도록 하고 있

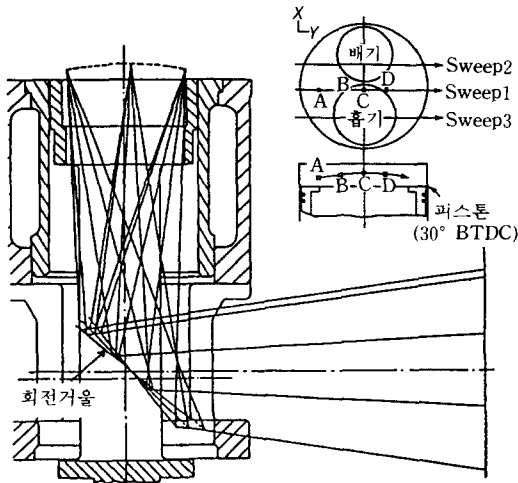


그림 14 소인식(Scanning) LDV시스템

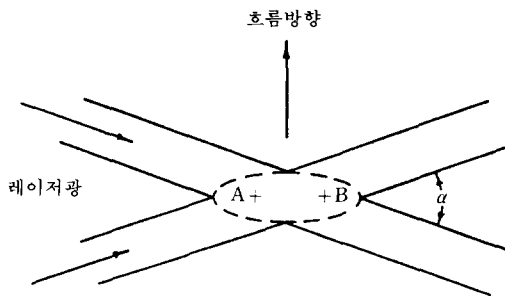


그림 15 두 측정점 LDV시스템

다. 이와 같이 한 점은 고정하고 다른 한 점은 이동이 가능하도록 한 구성에 의하여 양 신호의 상호상관을 구하여 와(vortex)의 크기가 판정되어지고 있다.

4. 엔진 내의 유동장 가시화 기술

LDV의 점계측이라는 결점을 보완하기 위하여 2차원적으로 유동장을 관측할 수 있는 레이저 시트법(laser sheet)에 의한 가시화 기술이 활발하게 사용되어지고 있으며, 정성적인 정보뿐만 아니라 정량적인 유속관측도 가능한 입자화상 계측법(PIV; particle imaging velocimetry)이 약 6년 전부터 각광을

받기 시작하고 있다. 엔진 내와 같은 고속이며 유속의 방향이 급변하는 유동장을 가시화 하기 위하여는 고출력의 레이저가 필요한 것은 물론 가스의 흐름에 추종성이 좋은 산란입자의 선택과 밝은 촬영계가 필요하다. 현재 난류를 가시화함에 있어서는 $1\mu\text{m}$ 이하의 미립자가 사용되고 있으며, 광증폭에는 화상증폭기(image intensifier)가 사용되어지고 있다.

4.1 레이저 시트법

레이저 시트법은 산란입자를 흡입공기에 흡입시킨 후 원통형렌즈(cylindrical lens)에 의하여 시트형상으로 된 레이저 빔을 주사하여 입자의 궤적을 관찰하는 수법이며, 사용하는 산란입자와 관측하는 카메라 및 광학기기에 따라서 장단점이 존재한다.

여기서 소개하고자 하는 방법은 산란 입자로서 형광물질인 유화아연(ZnS)의 분말을 이용하였고, 광학장치로는 펄스레이저(pulse laser)를 주사하는 방법을 사용하였으며, 이러한 수법의 광학계와 이 광학계에 의하여 가시화한 결과의 한 예를 그림 16과 17에 나타낸다. 촬영에는 화상증폭기를 부착한 35mm카메라를 이용하였다. 이 수법의 특징은 주기적으로 발광되고 있는 형광이 관찰기간 중 점차로 감쇠하기 때문에 궤적의 방향, 즉 유동의 방향을 추정할 수 있다는 점이다. 또한 입자 자신이 3차원적에 수반되어 이동하기 때문에 3차원적인 궤적도 얻을 수가 있으므로 이용가치가 높은 수법이라고 여겨진다.

레이저 시트법에 의한 가시화기술을 사용함에 있어서 문제점 중의 하나가 유속의 방향결정에 있다고 하겠다. 위에서 소개한 형광의 감쇠현상을 이용하는 방법 외에도 서로 다른 발광간격으로 3회의 발광을 실시하는 방법과 편광을 이용하여 한 쪽 입자의 상을 발광기간 중 조금 이동시키는 방법 등이 제안되고 있으나, 계측의 공간분해능이 한정된다는 제약이 따르고 있다. 이러한 문제점을

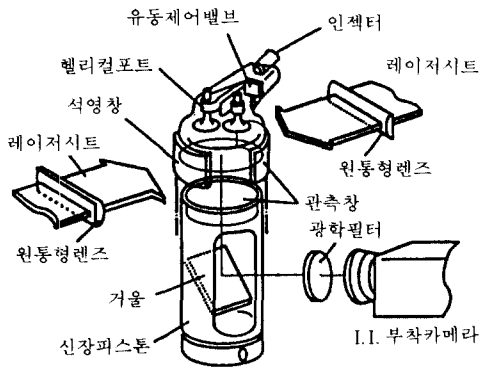


그림 16 레이저 시트법의 광학구성

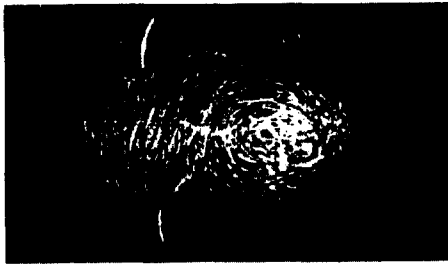


그림 17 레이저 시트법에 의한 가시화결과

해결하기 위하여 Mitsubishi 자동차의 Ando 등은 레이저 시트를 서로 다른 색의 순서로 발광시킴에 의하여 색의 정보를 포함한 입자 궤적을 얻도록 하는 레이저 컬러시트법을 개발하여, 엔진 내의 유동장 가시화방법으로 적용하고 있다.⁽¹⁹⁾ 이 방법에 의하면 얻어진 입자궤적이 일정한 색의 배열로 나타나 있으므로, 이 배열을 분석함에 따라 불량입자의 궤적을 분리할 수 있고, 방향도 명백한 속도 벡터를 구할 수 있다.

4.2 PIV법

입자화상에 의한 유속측정법인 PIV법은 크랭크각도에 따른 연소실 내의 유속과 난류의 거동을 공간적인 개념으로 구할 수 있으므로 최근 많은 연구가 수행되고 있다. PIV 법에는 다양한 수법이 있으나, 엔진 내의 유동장해석에 주로 이용되고 있는 것은 다중 노출(multiple exposure)에 의한 유적측정법과 화상상관법이다. 유적측정법이란 노출시

	135°BTDC	120°BTDC	105°BTDC	90°BTDC
새로운 회박연소포트				
중래의 회박연소포트				
헬리컬 포트				

그림 18 PIV에 의한 연소실 내의 유동장 비교

간 중에 입자운동이 유적선(stream line)으로 촬영되어, 그것의 길이로부터 유속을 구하는 방법이며, 그림 18에 회박연소 엔진에서의 응용 예를 나타낸다.⁽²⁰⁾ 이 결과는 Ar-ion 레이저 시트와 고속셔터 카메라에 의하여 산란 입자의 궤적을 포착하여 유적선으로 나타낸 것이다. 하나의 유적선은 3중노출에 의한 파선을 원호로 가정하여 연결한 것이며, 또한 2번째와 3번째의 노출간격을 길게 하여 흐름의 방향을 구하고 있다. 각 유동장중의 기호는 모든 속도벡터로부터 구해진 최소 2승법으로 정의된 스칼라 중심을 나타내며, 새로운 회박엔진의 경우 압축 행정이 진행됨에 따라 스칼라 중심이 이동하고 있는 사실이 명백하게 보여진다.

화상상관법은 고농도 입자분포의 시간 변화를 상관함수에 의하여 통계처리하는 수법이며 엔진 내의 순간유속, 평균유속, 공간스케일 등을 구할 수 있다. Nissan 자동화의 Urushihara와 일리노이 대학의 Adrian 등은 엔진 내의 가스유동 해석에 화상상관법에 의한 PIV를 응용하고 있다.^(21,22) YAG 레이저로부터의 펄스레이저시트를 가시화용 엔진에 입사하여, 20~40 ns의 간격으로 2회 발광시킨 후, 균일하게 혼합된 TiO₂ 입자로부터의 산란광을 1장의 필름에 2중으로 기록한다. 그림 19와 같이 이 필름에 He-Ne 레이저 빔을 주사하여 확대한 뒤, CCD 카메라에 의하여 컴퓨터에 전송한 후 공간 자기상관계수를 구한다. 이와 같이 구한 자기상관계수의 극대치의 위치로부터 측정영역 내의 평균 속도벡터가 결정된다. 그림 20은 원통 내의 유동장을 PIV에 의하여 측정하기 위한 광학계를 보여주며, 그 결과의 한 예를 그림 21에 나타낸다. 그림 중의 벡터의 간격은 0.16 mm이며, 실질적인 공간분해능은 0.33 mm로서 PIV의 공간 분해능으로서는 최고의 수준이라고 할 수 있다. 이와 같이 화상상관법에 의한 PIV 수법은 엔진 내의 2차원 난류 계측에도 충분히 대응할 수 있는 잠재력을

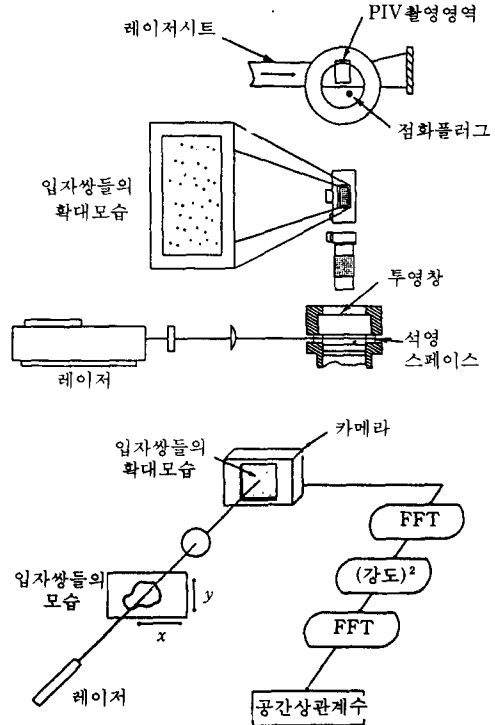


그림 19 PIV상관법에 의한 사진으로부터의 속도벡터 산출법

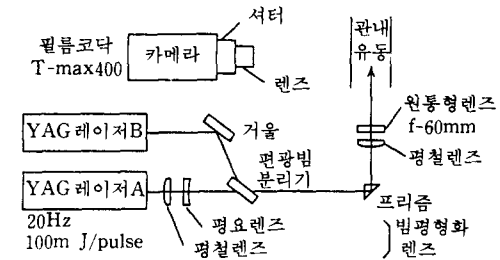


그림 20 PIV 사진촬영을 위한 광학시스템

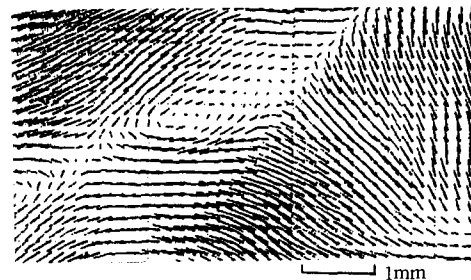


그림 21 PIV에 의한 원통 내의 속도벡터장

가지고 있으나, 공간분해능을 높이기 위하여 촬영영역이 좁아진다는 점과 속도 벡터를 구하기 위한 계산에 많은 노력을 필요로 한다는 점 등의 과제를 남기고 있다.

5. 맺음말

엔진의 연소에 중요한 영향을 미치는 가스 유동장의 해석을 위하여 현재 주로 사용되고 있는 광응용 계측기술에 대하여 소개하였다. 소개한 예에서 알 수 있는 바와 같이 점계측을 기초로 하는 정량계측만으로는 유동장전체를 파악하기엔 부족한 감이 있으며, 정성적일 뿐만 아니라 또한 정량적인 해석까지도 가능하게 하는 가시화수법을 추구하게 되는 일련의 움직임이 보여지고 있다. 여기서 소개한 예 이외에도 엔진 내의 유동장해석에는 많은 다른 방법들이 적용되고 있으며, 지금이 순간에도 보다 더 차원성이 높고 시간과 공간분해능이 우수한 새로운 광응용 계측기술들이 개발 중에 있다고 하겠다. 이와 같은 광응용 계측기술의 진보야말로 차세대 엔진 개발을 위한 중요한 역할을 담당하게 되리라는 확신과 기대를 가져도 좋을리라 여겨진다.

참고문헌

- (1) Rancaster, D. R., 1976, "Effects of Engine Variables on Turbulence in a Spark-Ignition Engine," SAE Paper No. 760159.
- (2) Ohigashi, S., Hamamoto, Y. and Tanabe, S., 1969, "A New Digital Method for Measuring Gas Flow Velocity by Electric Discharge," SAE Paper No. 690180.
- (3) Furuno, S., Iguchi, K., Oishi, K. and Inoue, T., 1990, "The Effects of Inclination Angle of Swirl Axis on Turbulence Characteristics in a 4-Valve Lean-Burn Engine with SCV," *International Symposium COMODIA 90*, pp. 437~442.
- (4) Lee, K. H., Ohira, T., Nakajima, T. and Matsumoto, R., 1990, "Measurement of Gas Velocity in the Combustion Chamber of a Two-Stroke Engine by a LDV," *JSME International Journal*, Vol. 33, No.1, pp. 163~170.
- (5) Max, E., 1983, "Measurement of Turbulent Flow in Engines Using a Laser Doppler Anemometer," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol.4, No.2, pp. 221~225.
- (6) Cole, J. B. and Swords, M. D., 1981, "On the Correlation between Gas Velocity and Combustion Pressure Fluctuations in a S.I. Engine," *Eighteenth Symposium on Combustion*, pp. 1837~1846.
- (7) Arcoumanis, C., Bicen, A. F. and Whitelaw, J. H., 1982, "Effect of Inlet Parameters on the Flow Characteristics in a Four-Stroke Model Engine," SAE Paper, No. 820750.
- (8) Bates, S. C., 1989, "A Transparent Engine for Flow and Combustion Visualization Studies," SAE Paper No.890154.
- (9) Itoh, T., Takagi, Y., Ishida, T., Ishizawa, S. and Ishikawa, T., 1985, "Analysis of In-Cylinder Air Motion with LDV Measurement and Multi-Dimensional Modeling," *International Symposium COMODIA 85*, pp. 185~192.
- (10) Henriot, S., Lecoz, J. F. and Pinchon, P., 1989, "Three Dimensional Modeling of Flow and Turbulence in a Four-Valve Spark Ignition Engine-Comparison with LDV Measurements," SAE Paper No. 890843.
- (11) Ando, H., Sanbayasi, D., Kuwahara, K. and Iwachido, K., 1990, "Characteristics of

- Turbulence Generated by Tumble and Its Effect on Combustion," *International Symposium COMODIA 90*, pp. 443~338.
- (12) 李, 漆原, 木村, 伊東, 高木, 1992, "スワール コントロール バルブ(SCV)によるスワール 生成とその 流動特性解析," 第10回内燃機聯合シンポジウム講演論文集, pp. 85~90.
- (13) Janes, J. D. C., 1987, "In-Cylinder Velocity Measurements with a Mobile Fiber Optic LDA System," *Int. Conf. on Laser Anemometry Advances and Application*, Paper 24, pp. 375~381.
- (14) 李, 池田, 大平, 中島, 松本, 1990, "光ファイバー-LDVによる 2ストロークエンジンの 吸入流れ 特性に 關する 研究," 日本機械學會論文集(B), Vol. 56, No. 521, pp. 247~252.
- (15) Durst, F., Naqui, A. and Tropea, C., 1990, "Development and Applications of LDA System in IC-Engine Research," *International Symposium COMODIA 90*, pp. 21~30.
- (16) Ikeda, Y., Kurihara, N., Nakajima, T. and Matsumoto, R., 1989, "Multipoint Simultaneous LDV Optics," Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, pp. 361~377.
- (17) Glover, A. R., Hundleby, G. E. and Hadded, O., 1988, "The Development of Scanning LDV for the Measurement of Turbulence in Engines," SAE Paper No. 880378.
- (18) Fraser, R. A. and Bracco, F. V., 1988, "Cycle-Resolved LDV Integral Length Scale Measurements in an I. C. Engine," SAE Paper No. 880381.
- (19) 三林, 渡邊, 安東, 日本自動車技術, 1991, "レーザシート法の 最近の 展開," Vol. 45, No. 11, pp. 64~69.
- (20) Inoue, T., Furuno, S., Shimizu, R. and Akihama, K., 1988, "In-Cylinder Gas Motion, Mixture Formation and Combustion of 4 Valve Lean Burn Engine, 9th Int. Vienna Motor Symposium.
- (21) 漆原, 高木, Adrian, 1992, "PIVによる 微細亂流場の 定量的 可視化," 第10回内燃機聯合シンポジウム, pp. 91~96.
- (22) David, L. R., Adrian, R. J., Christopher, C. L. and French, D. T., 1989, "Instantaneous Planer Measurements of Velocity and Large-Scale Vorticity and Strain Rate in an Engine Using Particle Image Velocimetry," SAE Paper No. 890616. 