

가시화엔진을 이용한 내연기관내 유동 및 연소의 연구

The Researches on In-Cylinder Flow and Combustion in Internal Combustion Engines with Optical Access

배 충 식
C. Bae



배 충 식
· 1963년생
· 충남대학교 항공우주공학과
· 내연기관연소, 추진

1. 머릿 말

초기의 내연기관의 발달에 있어서 엔진 연소기 내부의 유동 및 연소 현상에 대한 실험적 연구는 연소기 입, 출력의 측정을 통해 추정하는 것이 주된 방법이었다. 특히, 왕복기관의 경우 연소기에 해당하는 엔진 실린더 내부는 구조의 복잡성과 밀폐성으로 인하여 유동 측정 및 연소 현상 관찰에 어려운 점이 많이 있었다. 그래서 흡기부의 유동성능을 측정하고 배기가스를 분석하는 한편 엔진 출력성능을 측정하여 실린더 내부의 유동과 연소의 관계를 추측하였던 것이다. 그러나 고성능 고효율 엔진에 대한 연구는 실린더 내부유동 및 연소장에 대한 측정을 요구하게 되었다. 이에 따라 엔진 실린더 내에 열선유속계(Hot-wire anemometer)를 삽입하여 국부적 유동속도를 측정하였지만^{(1),(2)}, 이 경우 실린더내의 유동장이 급격한 온도, 압력

의 변화를 수반하는 심한 섭동을 가짐에 따라 열선유속계의 보정이 어려워 오차가 많이 발생하는 문제를 갖는다⁽³⁾. 실린더 내 연소 현상에 대해서는 측정된 압력에 열방출해석법(heat release analysis)을 적용하여 연소 과정을 해석하는 방법이 많이 이용되어 왔고⁽⁴⁾, 연소실 벽면에 이온 갭 프로브(ion gap probe)를 설치하여 화염면 도달을 감지하는 방법등으로 화염전파의 양상을 연구하기도 하였다.

저렴하고 간편하게 엔진내 유동장을 모사하기 위하여 소형풍동 형식의 정상유동장치를 이용해 유동장 측정을 하는 방식도 널리 사용되어 왔고^{(5)~(7)} 엔진을 수동형식으로 만들어 물을 이용한 유동의 가시화⁽⁸⁾방법도 이용되고 있으나 정상유동장치에서는 실엔진 왕복운동의 동력학을 정확히 모사하는 데 한계가 있어서 정확한 엔진내 유동의 측정과는 오차가 있다.

한편 엔진내부의 연소현상을 모사하기 위하여 정적연소실(constant-volume combustion chamber)을 이용하여 연소실험을 수행하기도 하는데^{(9),(10)}, 정적연소실을 이용하면 연소과정에 영향을 미치는 인자들을 독립적으로 분리하여 연구할 수 있도록 유동 및 열

역학적 상태량의 제어가 쉽고, 가시화가 용이하다는 장점이 있어서 화염전파과정을 측정하고, 특히 초기 화염핵의 성장과정을 관찰하는데 유용하게 쓰인다. 그러나, 정적연소실의 경우 역시 복잡한 엔진 연소실 내부의 상황을 재현하는 데는 한계가 있다.

최근의 엔진개발에 있어서 연료경제성을 증진하고 공해배출물을 줄이기 위한 노력이 중심주체가 되면서 실린더 내의 유동 및 연소과정을 관찰하여 최적 설계조건을 찾는 작업이 요구되고 있다. 특히 레이저를 이용한 유동 및 연소진단기술의 발달 및 카메라 기술의 발달로 엔진에 광학적인 접근이 가능한 창(window)을 만들 수 있으면 유동 및 연소의 관찰이 용이하다. 예를 들어 흡기에 산란 입자만 균일하게 넣어주면 레이저 도플러 유속계(LDV : Laser Doppler Velocimeter)를 이용하여 실린더내의 유동장을 잴 수 있어서 유동에 방해를 주고 엔진내의 열악한 측정환경에 적용이 어려운 열선유속계의 단점을 극복할 수 있다. 아울러 Rayleigh 산란, Mie 산란, 레이저 유도 형광법(LIF : Laser-Induced Fluorescence) 등을 이용하여 실린더 내 연료분포, 화학종 분포, 화염전파 형태 등을 계측함으로써 엔진내 열유체 현상에 대한 연구에 획기적인 계기가 마련되고 있는 것이다⁽¹¹⁾.

본 고에서는 광학적 접근이 가능한 가시화 엔진을 이용하여 내연기관내의 유동 및 연소현상을 실험적으로 연구하는 방법에 대하여 논하고, 각종의 가시화 엔진의 예를 들어 세계적 연구동향을 소개하고자 한다.

내용의 상당 부분을 필자가 Imperial College에서 연구한 내용에 할애하였으나 세계 각국의 관련되는 문헌자료들을 소개하여 균형을 이루도록 하였다.

2. 가시화 엔진의 구성

가시화 엔진은 실엔진의 실린더 내부를 광

학적으로 관찰하기 위하여 광학창을 부착한 것으로 고전적인 가시화 엔진의 예를 Fig.1에 보이고 있다⁽¹²⁾. 이 엔진은 실린더 헤드 하부와 피스톤이 평면형으로 되어 있는 경우이다.

보통 가시화 엔진은 연구용으로 사용하기 위해 단기통으로 특수하게 제작한다. 실린더 내 연소실을 전체적으로 관찰하기 위해 피스톤 크라운(piston crown)에 광학창을 삽입한다. 피스톤창을 이용한 광학적 관찰을 위해서는 확장된 크랭크 케이스를 제작하고 피스톤을 길게 확장하는 것이 일반적인 단기통 엔진의 가장 큰 특성이다. 그리고, 45° 거울을 확장된 피스톤 중앙부의 하단에 장착한다. 이렇듯 실린더 헤드와 본래의 사이에 확장 피스톤이 삽입되므로 엔진의 높이가 커지게 된다.

한편 실린더 라이너 측면에서 연소실 내부로의 광학적 접근을 위해 측면창을 삽입한

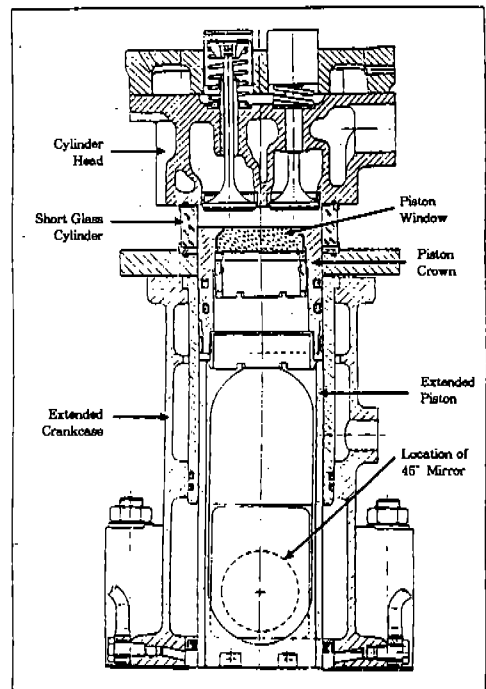


Fig.1 The Optically Accessed Engine⁽¹²⁾

다. 실린더 라이너 전체를 모두 광학창으로 구성할 수도 있는데 그 예가 Fig.2에 도시되어 있다⁽¹³⁾. 이 경우는 지붕형 연소실(pentroof combustion chamber)에 4밸브 형상을 가진 GM의 엔진이다. 피스톤 창과 측면창을 통해 연소실 내부의 유동과 연소에 대한 평면적 현상과 측면 현상을 파악함으로써 전체적인 실린더 내 열유체 현상의 연구에 이용할 수 있다.

이밖에 엔진의 기하학적 모양에 따라 광학창의 구성을 다양하게 할 수 있는데, 창을 만들 수 있는 가능성과 연구목적에 부합하게 설계 제작된다. 가시화 엔진의 다양성은 무궁무진하나 대표적인 몇가지 예를 Fig.3에 도시하였다⁽¹⁴⁾. Fig.3에서 볼 수 있듯이 실린더 헤드와 밸브의 위치, 피스톤 크라운의 형상에 따라 광학창의 위치 및 모양이 특징지어진다.

Ricardo의 Hydra형 크랭크 케이스에 Jaguar의 실린더 헤드를 얹은 단기통 전기점화 엔진의 경우 점화 플러그 자리에 원뿔형의

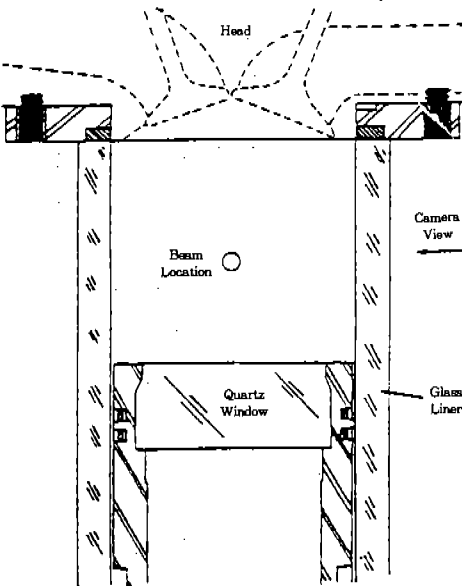


Fig.2 GM Transparent SI Engine⁽¹³⁾

소형 광학창을 삽입하여 연소가 없는 상태의 유동 측정에 유용하게 쓰기도 한다^{(15), (17)}. (Fig.4 참조)

최근의 가솔린 엔진의 경우 지붕형상 연소실을 갖는 DOHC 엔진을 많이 사용하면서 앞에 보인 모양만으로는 지붕부분의 현상을 측면에서 관찰할 수 없고, 특히 초기 화염핵의 성장을 볼 광로가 피스톤 창에 국한되게 되었다. 이러한 점을 보완하기 위하여 실린더 헤드 옆면을 지붕형상에 맞추어 삼각형으로 잘라낸 후 광학유리를 연소실 모양으로 가공하여 삽입하기도 한다. 이러한 광학창은 가공이 용이하지 않지만 성공적으로 제작, 응용될 경우 DOHC 엔진의 초기화염 관찰에

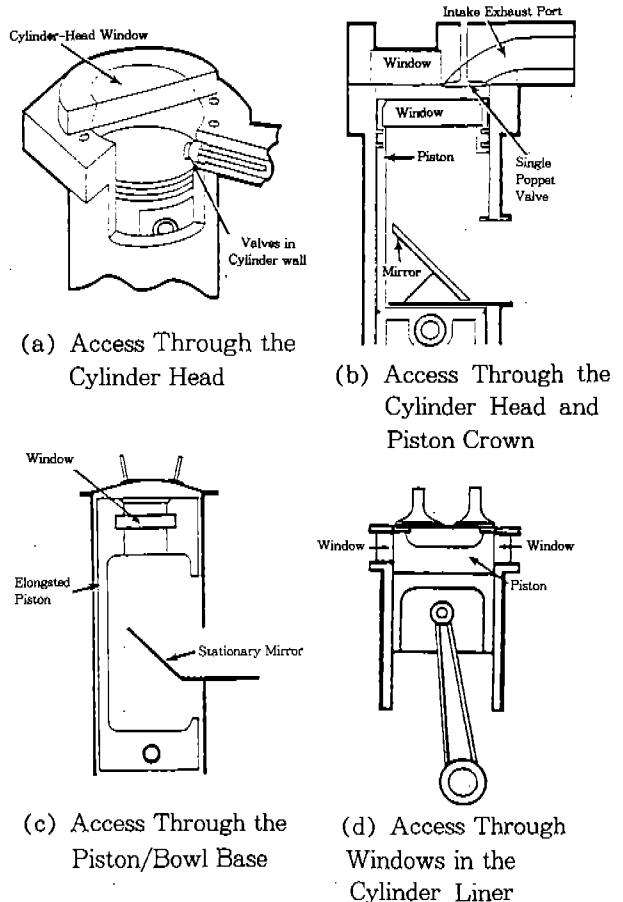


Fig.3 Schematic Diagrams of Optical Engines⁽¹⁴⁾

유용하게 쓰인다.

광학창으로 이용하는 유리의 재료는 우선 투명해야 하며 최근 레이저의 사용에 따라 보통 레이저 파장의 1/4에 해당하는 조도를 갖도록 가공되어야 한다. 또한 기계적으로 충분히 강해야 하며 특히 충분한 인장강도를 유지하여야 한다. 이외에 고온의 조건에 견딜 수 있어야 하며 열응력을 충분히 견디는 한편 요구되는 현상으로 가공이 용이해야 한다⁽¹⁸⁾. 이러한 조건을 만족하는 광학창의 재료로는 Plexiglass, Quartz, Sapphire 등이 쓰인다.

Table 1은 흔히 쓰이는 광학창의 특성을 비교해 놓은 것이다.

실린더내에 연소현상 없이 공기류의 유동만을 관찰할 때에는 플라스틱 계열의 재

료 Plexiglass, lexan을 이용할 수 있으며 4000rpm에 달하는 고속 조건에는 Quartz를 사용한다. 연소실험을 할 때는 Quartz나 Sapphire를 사용하며 엔진동작 조건 즉, 부하 및 운전 시간에 따라 재질을 선택한다.

상용의 단기통 가시화 엔진은 영국의 Ricardo, 오스트리아의 AVL 등이 제작하여 판매하며, 각 자동차 회사도 자체 연구용으로 제작하여 사용하는데 특히 근자에 일본 혼다의 단기통 가시화 엔진이 구조의 단순성, 사용의 용이성 등에서 우수한 것으로 정평이 나있다. 실제 엔진에서의 현상을 최대한 근사하게 묘사하기 위하여 다기통 가시화 엔진을 제작하기도 하는데 주로 실제 엔진의 실린더 블록과 실린더 헤드 사이에 확장 피스톤 블록을 만들어 광학창을 갖는 피스톤 및 45° 거울, 측면창 등을 삽입한다(독일 Volkswagen의 경우)⁽¹⁹⁾.

실엔진의 모양의 변화없이 광학창만을 만들어 가시화 엔진으로 활용할 수도 있는데 실린더 헤드, 실린더 블록 등에 구멍을 내어 광학창을 만들 수도 있고 실린더 블록의 상부를 깎아낸 후 같은 크기의 실험용 블록을 만들고 이 곳에 광학창을 설치할 수도 있다(프랑스의 Peugeot의 경우).

특이한 인공용 단기통 가시화 엔진으로서 사각형 엔진을 들 수 있는데 미국의 MIT, Berkely⁽²⁰⁾, 독일의 Daimler Benz 및 Stutt-

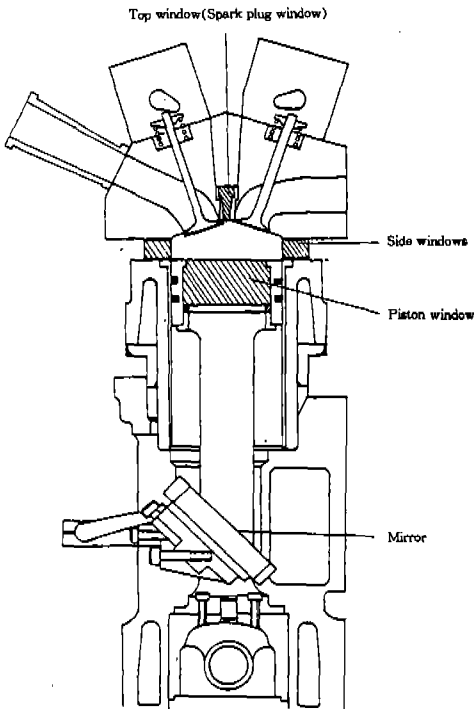


Fig.4 Schematic of Jaguar-Hydra Single Cylinder Engine with the Details of Optical Windows⁽¹⁵⁾

Table 1 Materials of Optical Window⁽¹⁴⁾

| Property | Cast iron | Sapphire | Quartz | Plexiglass |
|--|-----------|----------|--------|------------|
| Tensile strength ($\text{lb}/\text{in}^2 \times 10^3$) | 60 | 40-58 | 7 | 10(20°C) |
| Coeff. thermal expansion ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$) | 12 | 8 | 0.6 | 0.7 |
| Melting point (°C) | 1,200 | 2,040 | 1,700 | 80 |
| Thermal conductivity ($\text{Btu}/\text{h}\cdot\text{ft}\cdot\text{F}$) | 26 | 14.5 | 0.8 | 1.3 |

gart 대학⁽²¹⁾ 등의 엔진이 그 예이다. 실린더 단면이 사각일 경우에는 화염전파의 양상이 실제 엔진과는 차이가 있으나 광학측정용 실린더 라이너 제작이 용이하고 원통형 유리에 의한 굴절왜곡을 피하여 광학적 관찰을 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. Fig.5에서 사각형 단기통 가시화 엔진의 예를 보인다.

3. 가시화엔진 사용상의 주의사항

가시화 엔진의 가장 큰 특징은 광학창을 부착하고 있다는 점이다. 이런 점에서 사용상의 성공여부는 광학창의 올바른 설계 및 운용에 있다 하겠다. 광학창의 재질은 앞절에서 설명한 바있다. 광학창은 기계적으로 견고할 뿐아니라 밀봉이 잘 되도록 부착되어야 하며 탈착이 자유로와야 한다. 밀봉을 위하여 연성이 높은 금속박판이나 내열 viton ring, 테프론 등을 사용한다. 연소실에 노출되게 되는 광학창의 경우 축정을 위하여 공급되는 산란입자나 연소과정에서 생성되는 매연입자가 달라붙어서 수시로 세척해 주어

야 하는 번거로움이 있으므로 용이한 세척이 가능하도록 위치하는 것이 무엇보다도 중요하다.

피스톤 창 의 경우 탈착을 자유롭게 할 경우 세척은 용이하나 창틀과 창간의 접합부분의 간극이 작은 이유로 재조립과정에서 파손되는 경우가 많아서 밀봉용 접착제 등으로 반영구적으로 부착하거나 기계적으로 고정하는 방법을 쓰기도 한다. 피스톤창을 고정하게 되면 연소실과 접촉하는 유리면을 닦기 위하여 실린더 헤드를 실린더 블록으로부터 분해해야 하는 번거로움이 있다. 이를 최소화 하기 위해 탈착가능한 측면창이나 점화 플러그, 입력센서공 등을 통해 세척용 막대를 넣어 간이 세척을 하는 방법도 유용하다. 피스톤 창이 깨끗한 상태를 유지할 수 있도록 하기 위해 확장피스톤의 윤활은 엔진용 윤활유를 사용하지 않는다. 흔히 쓰이는 방법으로는 확장 피스톤을 제작할 때 피스톤링 홈을 넓게 제작하여 철재 피스톤링 대신 베이클라이트, 테프론, 탄소 그래파이트 등의 재료로 피스톤링을 만들어 왕복운동 중에 피스톤링

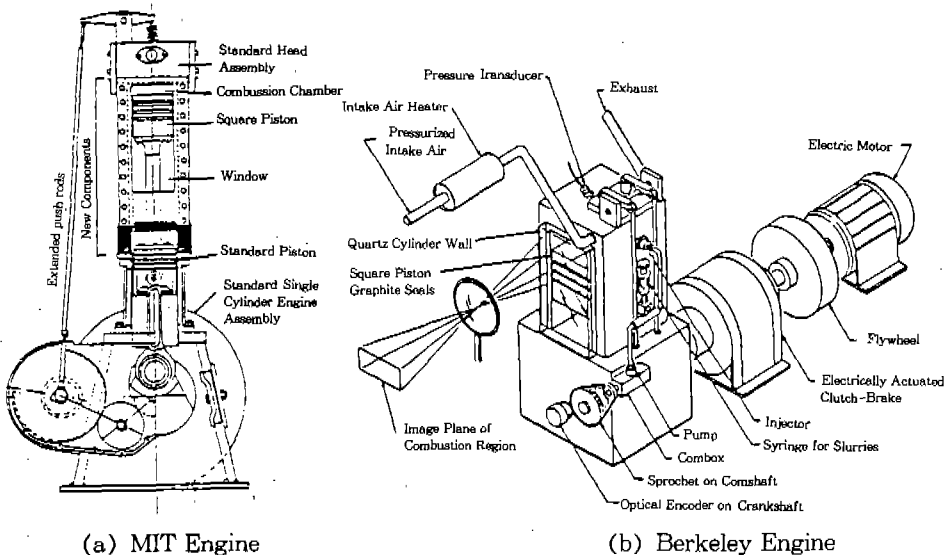


Fig.5 Transparent Square Engines

이 밀봉과 윤활의 역할을 동시에 할 수 있도록 하는 것이다. 단, 이 경우 왕복운동의 결과 확장 피스톤이 국부적으로 과열되는 것을 막기 위하여 장시간 운전은 피하는 것이 좋다.

측면창을 설계할 때에는 측면창의 모양이 실린더 라이너의 구조에서 이탈하는 경우가 있어 엔진의 압축비를 심하게 변화시키지 않도록 유의하여야 한다. 실린더 라이너에 사각단면을 갖는 소형 측면창을 삽입하면 연소실 내부에 추가의 공간이 생겨 연소실 체적을 증가시키는 요인이 되고, 각진 틈새에 산란 입자들이 축적되어 이상연소의 발화원이 되거나 광학적 측정에 장애요인을 만들기도 한다. 측면창은 비교적 소형이기 때문에 세척의 빈도가 높은 편이다. 따라서 측면창을 만들 때에는 창틀을 만들어 엔진에 끼워 넣는 형식으로 만드는 것이 좋다. 이 때에 창틀과 창사이에는 모든 접촉면이 직접 집중하중을 받지 않도록 완충가스킷이나 젤 종류의 입자를 발라주어야 한다. 그렇게 함으로써 기계적 안전과 밀봉을 기하도록 한다. Fig.4에 보이는 단기통 가시화 엔진에서는 측면창 모듈을 따로 만들어 실린더 헤드와 실린더 블록 사이에 독립된 부품으로 끼워들어가게 제작하였는데 이 경우 조립과정에서 단면끼리의 평행이 이루어지지 않을 경우 쉽게 부서지거나 밀봉이 쉽지 않게 된다.

레이저를 응용한 연소진단 기술을 가시화 엔진에 적용할 경우 입자 산란을 위해 입자를 흡기중에 부유시켜 주게 되는데 이때 지나치게 크고 강도가 큰 입자를 넣어주면 운전중에 광학창에 흡이 생길 수 있으며, 이러한 입자를 세척할 때 심하게 문지르지 않도록 한다.

실엔진에 광학창을 만들어 개조한 경우를 제외하고는 가시화 엔진에는 확장 피스톤 블록이 삽입됨으로 해서 실린더 헤드와 본래 실린더 블록 사이에 윤활유 및 냉각수 흐름

에 단전이 생길 수 있다. 이 경우 확장 피스톤 블록에 윤활유나 냉각수 자켓을 만들어 유동을 연결하여 주도록 만들어 주는 것이 좋으나 확장피스톤 블록의 체적이 작아서 흐름을 원활히 할수 없을 수도 있으므로 별도의 유로를 만들고 각 유로에 펌프를 설치하여 냉각수 및 윤활유의 공급을 원활히 하도록 한다. 단기통 가시화 엔진을 사용할 경우 엔진의 구조가 실엔진과 다르고 장시간 연속운전을 하지 않으므로 엔진온도를 유지하기가 쉽지 않으므로 윤활유와 냉각수의 온도를 히터 및 열교환기를 이용하여 일정하게 유지하여야 한다. 보통 유동측정을 위한 운전시 (motoring) 50°C, 연소실험을 위한 운전시 (firing) 80°C를 유지해 준다⁽¹⁷⁾.

단기통 가시화 엔진을 사용할 경우 왕복운동 부위가 단체이고 엔진의 높이가 커져서 특정 엔진 속도에서 엔진의 진동이 커지는 경우가 있는데 이를 막기 위해 대형 플라이휠을 제작하여 진동을 최소화하는 한편, 단기통 엔진을 동력계에 엮을 때에 견고하고 정하고 완충제나 스프링, 댐퍼 등을 적절히 사용하여 진동의 피해를 막도록 한다.

4. 가시화 엔진의 응용

2절에서 살펴 보았듯이 가시화 엔진은 사용엔진의 모양에 따라 구성이 달라지고 이에 맞추어 응용의 범위가 결정되며, 또한 연구의 방법 및 목적에 따라 가시화 엔진의 설계가 달라진다.

가솔린 엔진의 경우 최근의 연구개발의 주체가 연료계통성을 증진하고 공해배출물을 줄이기 위한 노력의 일환으로 희박연소에 모아지게 되었다. 희박혼합기 연소방식을 채택할 경우 초기화염 형성과 화염전파속도가 감소하게 되어 연소의 사이클 변동이 커지는 한편 미연탄화수소 계열의 배출이 증가하는 단점이 있다. 희박연소 조건하에서의 엔진의

안정성을 확보하기 위하여서는 연소시간을 단축하고 연소의 사이클 변동을 감소시켜야 한다. 이를 위한 가장 현실적이고 효율적인 접근방법을 유동의 강화, 특히 난류강도의 증진을 통해 화염전파속도를 증가시킴으로써 연소시간을 단축시키는 것이다^{(22), (23)}. 이러한 목적의 희박엔진 연구를 위하여 엔진내의 유동장을 연구하는 것이 일차적인 가시화 엔진의 유용성이다. 레이저 도플러 유속계(LDV)를 이용한 실린더 내부 유동장의 측정은 가시화 엔진에서 가장 빈번한 연구주제가 되어

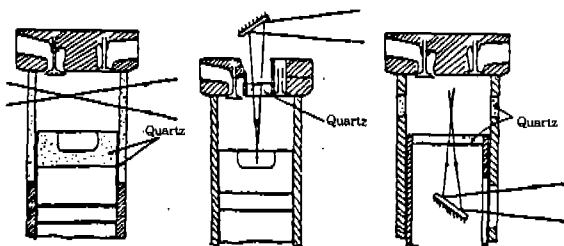


Fig.6 Various Optical Accesses for LDV Measurements⁽¹⁴⁾

왔다. LDV를 이용한 측정에서 광학창의 위치에 따라 산란광의 수광방법이 달라지고 이에 따라 전방 산란, 측방 산란, 후방 산란의 방법이 쓰이게 되는데 이 순서대로 산란광의 강도가 약해진다. Fig.6은 여러 방식의 LDV 측정 방향을 도시한 것이다⁽¹⁴⁾. Fig.7에서는 Fig.4에 보인 엔진에 대해서 motoring시에 실린더축 상의 속도 측정을 위해 점화플러그 창을 이용함으로써 전방 산란을 하는 것과 연소시에 측방산란법을 쓰는 것에 대해 보이고 있다^{(24), (25)}. 피스톤 창을 이용해 후방산란법을 쓰면서 45° 거울을 회전시켜서 연소실 내부의 유동장을 훑어나가며 관찰하는 Ricard의 Scanning LDA엔진도 시도되기도 했다⁽²⁶⁾.

이러한 LDV 측정을 통해 실린더 내의 유동장을 측정할 결과는 특히 텀블 및 스웰유통의 정량화를 위한 노력의 일환으로 최근에 많이 보고되고 있다^{(26)~(28)}. 유동장의 파악과 아울러 화염전파의 양상을 관찰할 수 있다는 것은 가시화 엔진의 가장 큰 효용가치라 할

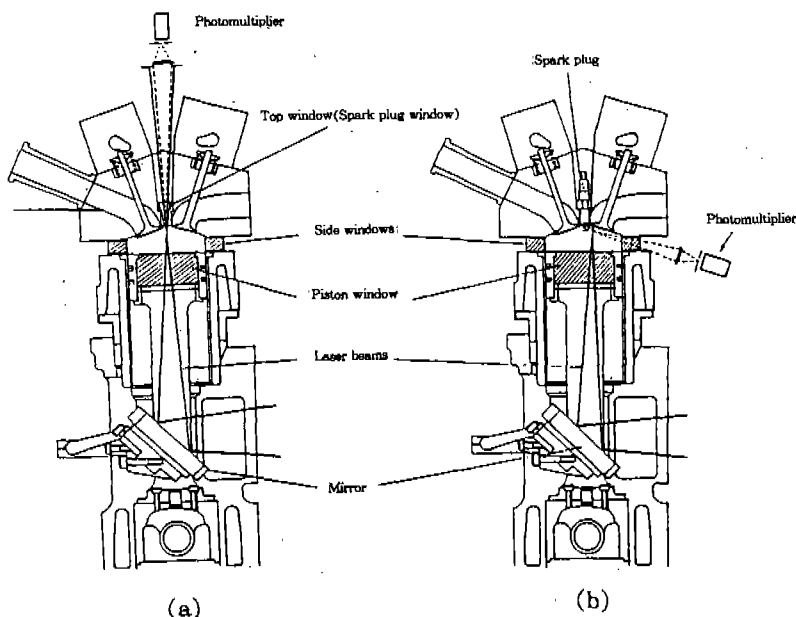


Fig.7 LDV Measurements in Jaguar-Hydra Optical Engine⁽²⁴⁾

수 있다. 가시화 엔진에서는 고전적인 방식의 사진법으로 화염전파과정을 촬영할 수 있을뿐만 아니라^{(29), (30)} image intensifier와 CCD camera 기술의 발달로 디지털 영상을 쉽게 얻을 수 있다⁽³¹⁾. Fig.8은 CCD 카메라를 이용한 2방향 화염사진의 예를 보인다⁽³²⁾. 특히 희박연소의 경우 연소에 의한 화염의 발광 파장이 자외선 영역에 많이 분포함에 따라 UV-intensifier를 이용하여 희박연소에서 중요한 역할을 하는 초기 화염을 관찰할 수 있게 되었다.

레이저를 이용한 연소진단기술은 탄성산란과 비탄성산란으로 나뉘며 탄성산란 중 산란 입자가 필요한 Mie산란을 이용한 것으로 LDV가 있으며, submicron 크기의 입자를 연소영역에 부유시켜 화염대를 구분하는 평면가시화가 이용되는데 이를 위해서는 고출력 레이저로 평면광을 만들어 줘야하므로 Fig.9(a)에 보이는 가시화 장치를 구성한다⁽³³⁾. Fig.9(b)는 이를 통해 얻은 평면화염의 사진을 예시한다⁽³⁴⁾. 이와 같은 방식으로 직분식 가솔린 엔진에서 연료의 분사구조를 살펴본 예가 Fig.10에 보인다⁽³⁵⁾. 평면가시화는 서로

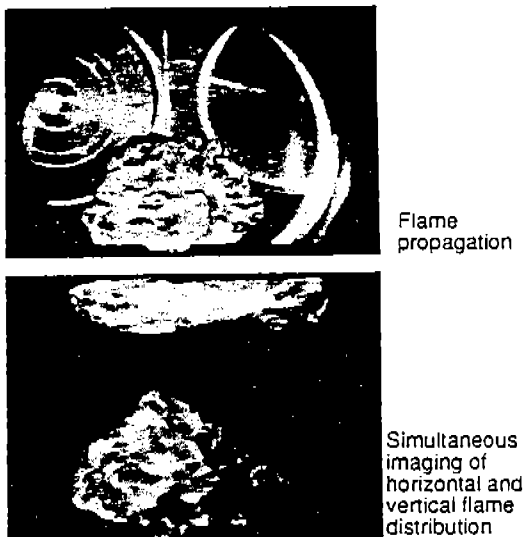


Fig.8 Flame Photography

다른 두 파장의 레이저 평면광을 측면창으로 주사하고 피스톤창 또는 실린더 헤드 창을 통해 촬영하는 방식으로 입체적 가시화로 응용될 수 있다.(Fig.11 참조)

분자의 탄성산란을 이용한 측정법으로는 Laser Rayleigh산란법을 사용하며 이를 이용해 연소실내의 연료농도 분포, 화염온도장 등을 측정한다^{(36), (37)}. Fig.12는 Rayleigh 산란법을 이용하여 연료의 혼합정도를 가시화하기 위한 가시화 엔진의 구조와 그로부터 얻은 영상자료의 예를 보인다. 연세대의 전광민 교수가 근자에 본 회지에 소개했던 가시화 엔진에서의 점온도 측정법도 동일한 원리를 이용한 것이다⁽³⁸⁾.

가장 최근에 레이저 유도 형광법(LIF : laser-induced fluorescence)이 가시화 엔진에서의 화염관찰법으로 각광을 받고 있다⁽³⁹⁾. Fig.13은 LIF 평면가시화를 위한 개략도이며 이를 통해 얻은 OH라디칼 영상자료가 Fig.14에 예시되어 있다. 이 밖에 PIV를 이용한 평면 유동장도 가시화 엔진이 제공할 수 있는 유용한 정보이다⁽¹⁰⁾.

디젤 엔진의 경우에도 연소실 특히 피스톤 보울안의 LDV 유동장 측정, 디젤분무 가시화, 온도장 측정, soot 형성과정 측정 등을 가시화 엔진을 이용하여 수행하고 있다. 가시화 디젤 엔진의 경우 soot의 발생으로 인해 가시화 엔진에서의 광학창 세척문제가 심각한데, 연료분사 장치등 엔진헤드의 구조가 복잡하여 분해하기가 쉽지않으므로 피스톤 보울 광학창등을 탈착이 쉽도록 만드는 것이 중요하다. Fig.15는 대기용 가시화 디젤 엔진의 광학창의 구성을 보이고 있다⁽¹⁹⁾. 이 엔진은 독일의 Volkswagen이 제작하여 독일의 Aachen 공대, 영국의 Imperial College 등이 유럽 공동 디젤 연구에 사용하고 있으며 샌드위치 피스톤(여러개의 단면 광학창을 피스톤에 겹쳐 놓음)을 사용한 LII(laser-induced incandescence) 측정을 수행하고 있어 귀추가 주목된다.

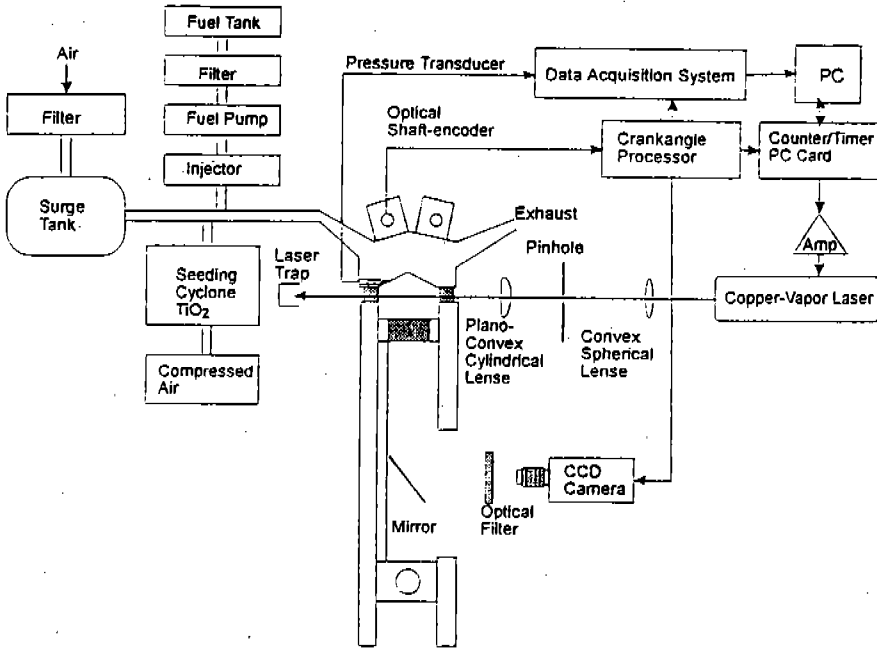


Fig.9(a) Two-Dimensional Visualization with Laser Mie Scattering⁽³³⁾
: Configuration

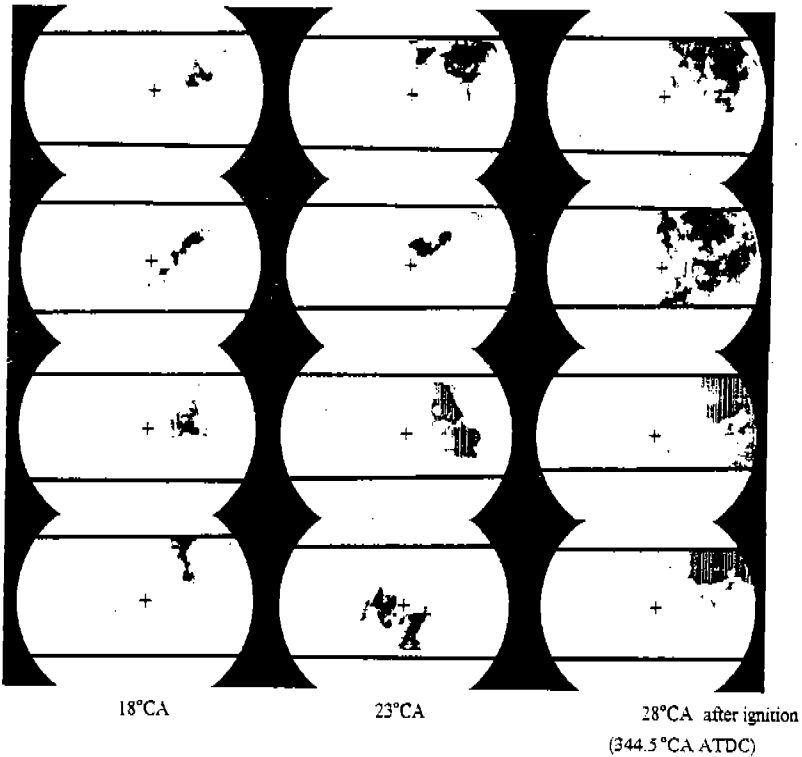


Fig.9(b) Two-Dimensional Visualization with Laser Mie Scattering⁽³³⁾
: Flame Images

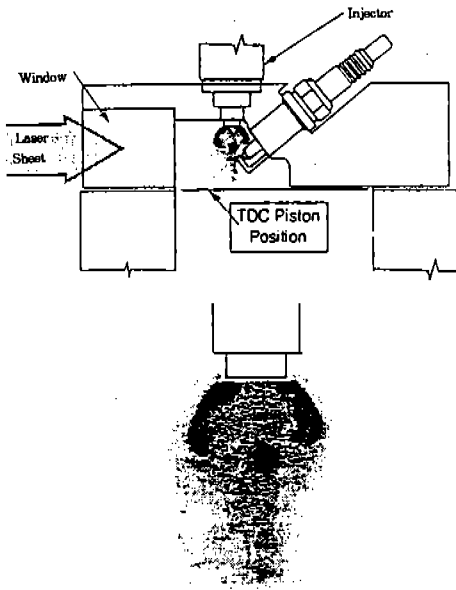
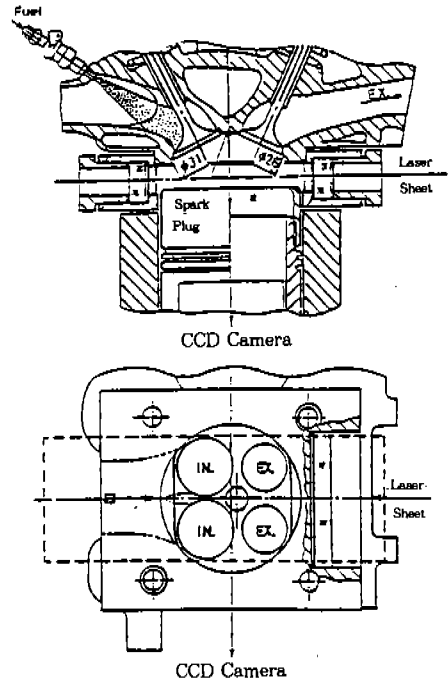


Fig.10 2-D Mie Scattering Image of the Fuel Spray in a DI SI Engine⁽³⁵⁾



(a) Optical Engine

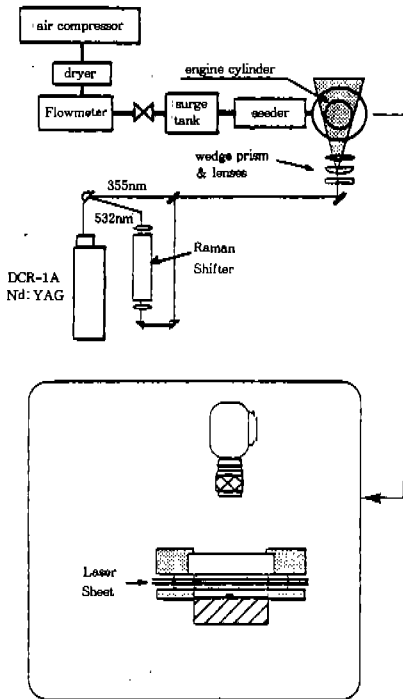
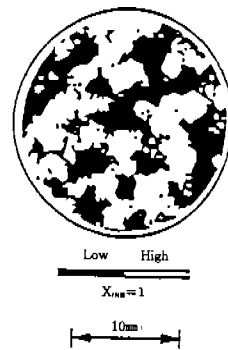


Fig.11 Multi-sheet Flame Visualization Apparatus



(b) Transient Distributions of the Mixture Concentration

Fig.12 Imaging with Laser Rayleigh Scattering⁽³⁶⁾

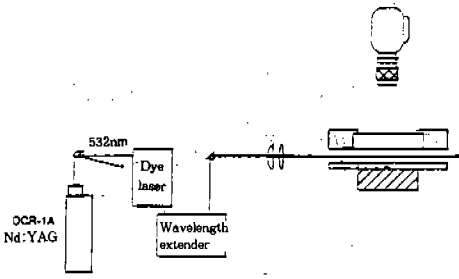


Fig.13 Experimental Setup for LIF in an Engine

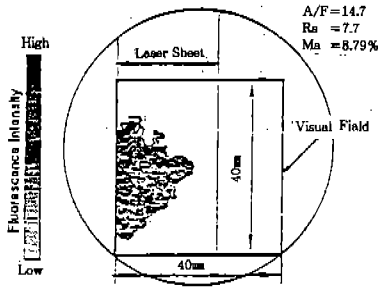


Fig.14 A Fluorescence Image of OH Radical⁽³⁹⁾

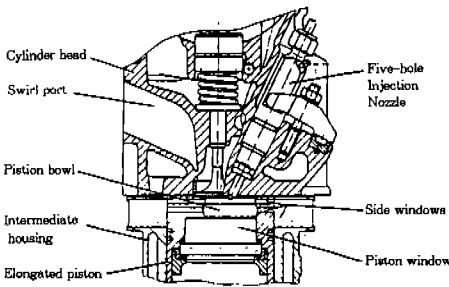


Fig.15 Cylinder Head and Piston-bowl Geometry of Transparent 1.9L VW DI Diesel Engine⁽¹⁹⁾

5. 맺는말

이상에서 내연기관내 유동 및 연소연구를

위한 좋은 도구로서의 가시화 엔진에 대해 개괄적으로 살펴보았다. 본 고에서는 내연기관 중 왕복기관의 가시화 엔진에 대해서 주로 다루었으나, 가스터빈엔진의 연소기 내부 특성을 살피기 위한 실험 방법이 이와 동일하고, 정상분무연소시 광학창에 지속적인 열부하가 가해지므로 창표면에 냉각공기막을 형성해주어야 한다는 점을 제외하면 가시화를 위한 광학창의 구성 또한 유사하므로 이에 대한 관심도 요구된다⁽⁴¹⁾. 가시화 엔진의 유용성과 다양성을 다루기에는 본 고의 부족함이 있으나 참고문헌을 통해 보완되기를 바란다. 국내에서도 비록 일천한 역사를 가지고 있지만 산, 학, 연 각계에서 가시화 엔진의 사용이 많아지고 있다^{(42), (43)}. 실제 가시화 엔진의 사용에는 여러가지 어려운 점이 있으므로 사용자간의 정보교환을 통해 Know-how를 교환함으로써 그 활용도의 극대화를 이룰 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Semenov E. S., "Device for Measuring the Turbulence in Piston Engines", Instruments and Experimental Techniques, Vol. 1, No. 1, 1958
2. Hassan, H. and Dent. J. C., "The Measurement of Air Velocity in a Motored Internal Combustion Engine Using a Hot-Wire Anemometer", Proc. I Mech E, Vol. 185, 50/71, pp. 583-591, 1971
3. Witze, P. O., "A Critical Comparison of Hot-Wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for I. C. Engine Application", SAE Paper 800132, 1980
4. Chun, K. M. and Heywood, J. B., "Estimating Heat-Release and Mass-of-

- Mixture Burned from the Spark-Ignition Engine Pressure Data,” *Combust. Sci, Technol*, Vol. 54, pp. 133-144, 1987
5. Arcoumans, C. and Whltelaw, J. H. “Are Steady Flow Inlet Boundary Conditions Valid for Engine Cylinder Caculations?”, *Proc. Congress on 'Modelling of Internal Combustion Engines, Valencia, Spain, 1987*
 6. Hu, Z., “Turbulence Enhancement in Spark Ignition Engines”, PhD Thesis, Imperial College, 1992
 7. 배충식, 정경석, “실린더헤드 형상에 따른 정상유동 특성”, SAE Paper 95-17-0086, 자동차 공학회 추계학술대회 논문집, pp. 46-53, 1995
 8. Khalighi, B., “Intake-Generated Swirl and Tumble Motions in a 4-valve Engine with Various Intake Configurations-Flow Visualization and Particle Tracking Velocimetry”, SAE Paper 900059, 1990
 9. Arcoumans, C. and Bae, C-S., “Correlation between Ignition Characteristics and Flame Propagation in a Constant Volume Combustion Chamber”, *SAE Transactions, Journal of Engines*, Vol. 101, sec. 3., pp.556-570, Paper No. 920413, 1992
 10. Arcoumans, C. and Bae, C-S., “Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant-Volume Combustion Chamber”, SAE Paper 930868, 1993
 11. Bae, C-S., “Measurement Methods of Thermofluids Phenomena in Internal Combustion Engine : Reciprocating Engines and Gas Turbines”, 20th Conference of KSEAU, pp. 112-122, Oxford, 1994
 12. Pitcher, G, and Wigley, G., “The Design and Application of a Two Component LDA System to Study Engine Flows”, 4th International Conference on Laser Anemometry, Advances and Appliations, 1991
 13. Bates, C., “A Transparent Engine for Flow and Combustion Visualization Studies”, SAE Paper 880520, 1988
 14. Arcoumanis. C., Gosman, A. D. and Whitelaw, J. H., “Post-Experience Course on;Experimental and Computational Techniques for IC Engines”, Imperial College, 1989
 15. Arcoumanis, C., Bae. C-S. and Hu, Z, “Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Opical Engine”, *SAE Transactions. Journal of Engines*, Vol. 103, sec. 4., pp. 197-211, Paper No. 940475, 1994
 16. Arcoumanis, C.. Bae. C-S., Whitelaw, J. H and Xu, H. M., “Imaging of Lean Premixed Flames in Spark-Ignition Engines”, *SAE Transactions, Journal of Engines*, Vol. 103, sec. 4., pp. 1820-1836, Paper No. 942052, 1994
 17. Bae, C., “Flow and Flame Interaction in Spark-Ignited Premixed Mixtures”, PhD thesis, Imperial College, 1993
 18. Rchman, R. M. and Reynolds, W. C., “The Development of a Transparent Cylinder Engine for Piston Engine Fluid Mechanics Research”, SAE Paper 840379, 1984
 19. Arcoumanis, C., Bae, C-S., Nagwaney. A. and Whitelaw, J. H., “Effect of EGR on Combustion Development in a

- 1.9L DI Diesel Optical Engine”, SAE Paper 950850, 1995
20. Pischinger, S. and Heywood, J. B., “How Heat Losses to the Spark Plug Electrodes Affect Flame Kernel Development in an SI Engine”, SAE Paper 900021, 1990
 21. Herweg, R., Begleris, Ph., Zetrlitz, A. and Ziegler, G. F. W., “Flow Field Effects on Flame Kernel Formation in a Spark-Ignition Engine”, SAE Paper 881639, 1988
 22. Arcoumanis, C. and Whitelaw, J. H., “Fluid Mechanics of Internal Combustion Engines : A Review”, Proc. I Mech E., 201 C1, 1987
 23. Heywood, J. B., “Fluid Motion Within the Cylinder of Internal Combustion Engines the 1986 Freeman Scholar Lecture”, J. Fluids Eng., 109, pp. 3-35, 1987
 24. Arcoumanis, C., Bae, C-S, and Barraclough, C., “Flow and Combustion Analysis in a Four-Valve Spark-Ignition Engine”, pp. 107-118, ‘Measurement and Observation Analysis of Combustion in Engines’, I Mech E, London, 1994
 25. Melling, A. and Whitelaw, J. H., “Design of Laser Doppler Anemometers for Reciprocating Engines”, Report CHT/76/6, Mech, Eng, Dept., Imperial College, 1976
 26. Hadded, O. and Denbratt, I., “Turbulence Characteristics of Tumbling Air in Four-Valve S. I. Engines and their Correlation with Combustion Parameters”, SAE Paper 910478, 1991
 27. Arcoumanis, C., Hu, Z., Vafidis, C. and Whitelaw, J. H., “Tumbling Motion : a Mechanism for Turbulence Enhancement in Spark-Ignition Engines”, SAE Paper 900060, 1990
 28. Cole, J. B. and Swords, M. D., “Laser Doppler Anemometry Measurements in an Engine”, Applied Optics, Vol. 18, 10., pp. 1539-1545, 1979
 29. Baritaud, T. A., “High Speed Schlieren Visualization of Flame Initiation in a Lean Operating SI Engine”, SAE Paper 872152, 1987
 30. Gatowski, J. A., Heywood, J. B. and Deleplace, C., “Flame Photographs in a Spark-Ignition Engine”, Combustion and Flame 56, 1984
 31. Bates, S. C., “Further Insights into SI Four-Stroke Combustion Using Flame Imaging”, Combustion and Flame, 85, 1991
 32. Winklhofer, E., Philipp, H., Fraidl, G. and Fuchs, H., “Fuel and Flame Imaging in SI Engines”, SAE Paper 930871, 1993.
 33. Arcoumanis, C. and Bae, C-S., “Flame Image Processing in a Four-Valve Spark-Ignition Engine”, I Mech E Paper C499/002/96, pp. 89-106, Proc. 3rd International Conference; Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines, London, 1996
 34. 배충식, “Mie 산란을 이용한 내연기관의 화염가시화”, 13회 KOSCO Symposium 논문집, pp. 25-34, 한국연소학회, 1995
 35. Fansler, T. D., French, D. T. and Drake, M. C., “Fuel Distributions in a Firing Direct-Injection Spark-Ignition Engine Using Laser-Induced Fluorescence Imaging”, SAE Paper 950110,

1995

36. Zhao, F. Q., Takeomi, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H. "PLIF measurements of the Cyclic Variations of Mixture Concentration in a SI Engine", SAE Paper 940988, 1994
37. Zhao, F. Q., and Hiroyasu, H. "The Applications of Leaser Rayleigh Scattering to Combustion Diagnostics", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 19., pp. 447-485, 1993
38. 전광민, "영국 Imperial College 방문연구 기록", 자동차공학회지, Vol. 17, No. 6. 1995
39. Tanaka, T. and Tabana, M., "Planar Measurements of OH Radicals in an SI Engine Based on Laser Induced Fluorescence", SAE Paper 940477, 1994
40. Nino, E. Gajdeczko, B. F. and Felton, P. G., "Two-Color Particle Image Velocimetry in an Engine with Combustion", SAE Paper 930872, 1993
41. 항공우주연구소(이대성 등), "항공기용 가스터빈 엔진/부품의 CAD/CAM 및 성능시험 기술개발(Ⅲ)", 항공우주연구소, 과학기술처 특정연구 보고서 UN94 170, 1996
42. 최명식, 이경환, "고석카메라를 이용한 SI엔진에서의 화염전파 가시화", SAE Paper 95-17-0122, 자동차공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 302-306, 1995
43. 한국기계연구원(강건용 등), "흡기포트 및 연소실 설계기술개발", 통상산업부 차세대 자동차기술 개발사업 보고서, 1995