

기관 실린더 내의 가스 유동 계측

Flow Measurement in Engine Cylinder

이 창 식*
Chang Sik Lee

1. 머리 말

왕복동 내연 기관 실린더 내의 가스 유동은 기관의 성능 향상, 연소 개선, 배기 정화 등에 직접적으로 영향을 미치는 인자로 되며, 최근 각종 유동의 측정 방법 및 측정 장치의 개발은 가스 유동 계측에 많은 발전을 가져 왔다. 특히 각종 열기관의 연소 성능 향상을 위한 노력은 기관의 성능 향상과 더불어 연소 배출물의 유해 성분 저감을 위한 연구에 더욱 박차를 가하게 되었다. 이에 따라서 기관의 최적 제어 운전, 자동 제어 연료 공급 및 분사장치 등에 이르기까지 많은 노력이 경주되어 왔다. 이러한 연구 개발에 못지 않게 중요한 것은 실린더 내의 연소 성능을 향상시키는 것이며 이를 위해서는 먼저 기관 실린더 내부의 가스 유동을 밝히고, 유동의 모델링, 유동장의 계측, 연소장의 유동 측정 등의 연구가 매우 중요한 것으로 생각된다.

실린더 내의 연소 및 유동장의 연구는 주로 연소 특성치를 관한 연구와 유동장을 중심으로 하는 흐름의 시뮬레이션을 비롯 유동장의 계측으로 크게 나눌 수 있다.

여기서는 주로 실린더 내의 가스 유동의 측정 방법과 최근의 연구 동향에 대하여 몇 가지 측정의 보기를 중심으로 다루기로 한다.

2. 실린더 내의 유동 계측법

2.1 실린더 내의 유동 계측법의 비교

실린더 내의 가스 유동의 측정법에는 열선 유속계에 의한 방법, 가시화(可視化)에 의한 방법, 방전법(放電法) 및 레이저 도플러 유속계(Laser Doppler Anemometer, LDA로 약칭하기로 한다)에 의한 방법 등이 있다.

이들 실린더 내의 유동 계측법을 간단히 비교하면 다음과 같은 특징들을 갖는다.

(1) 열선 유속계(Hot wire anemometer, HWA)

열선 유속계는 유동장에 놓여진 전기적으로 가열된 열선으로부터 가스로의 열전달량이 유속과의 상관 관계를 갖는 성질을 이용하는 것으로서 열선에 대한 열평형으로부터 열전달계수를 구하고, Nusselt 수와 Reynolds 수의 관계로부터 유속을 구하는 계기이다.

기관 실린더 내의 유동은 고온, 고압인 동시에 열선 프로우브의 진동도 심하므로 재질이나 설치 방법에도 문제점이 있으며, 또한 온도, 압력 등이 비정상적으로 변화하므로 온도, 압력 등의 보정이 필요하다.

열선의 재질로는 백금-이리듐(Ir)(지름 6.3 μm , 최고 온도 약 300 $^{\circ}\text{C}$), 백금-로듐(지름

* 정회원, 한양대학교 공과대학

6.3 μm, 최고 온도 약 750 °C) 등이 사용된다. 열선 유속계의 출력 신호는 열선 지주의 끝 온도, 가스 온도, 크랭크 각도, 상사점 및 하사점 신호 등과 함께 A/D 변환되어 컴퓨터에 집록(集錄) 처리된다.

열선 유속계는 주파수 특성이 양호하고, 아나로그의 연속 신호가 얻어지므로 가스의 난류 측정에 유용하나, 압력 및 온도의 보정과 검정이 필요하며 가스의 온도가 고온일 경우에는 측정이 곤란하며, 흐름의 압력과 유속 변동이 심한 경우에도 절손될 우려가 있다.

(2) 레이저 도플러 유속계 (LDA)

① 레이저 유속계의 특징

앞에서 간단히 다룬 바와 같이 현재 가장 일반적으로 보급되고 있는 유속계는 열선 유속계이다. 레이저 유속계와 열선 유속계의 원리는 전혀 다르나 양자의 신호 출력의 형태는 유사하다. 즉 열선 풍속계의 경우에 측정부인 열선은 레이저 유속계의 경우에는 교차하는 두 개의 비입에 상당하며 그 교차점은 측정부가 된다.

열선 유속계와 레이저 도플러 유속계의 특성을 간단히 비교하면 다음의 표 1과 같다.

② 레이저 도플러 유속계의 적용

레이저 도플러 유속계는 일정한 속도로 운동하는 물체로부터 산란광(scattering light)이 도플러 시프트하는 성질을 이용하는 것으로서 도플러 시프트 주파수를 측정하여 물체의 속도를 구하는 장치이다.

기관 내의 흐름은 그림 1에 보는 바와 같이 흡기 및 압축 행정 중의 가스 흐름은 스윙얼(swirl), 스퀴시(squish), 난류(turbulence) 등으로 나누어 생각할 수 있으며, 스퀴

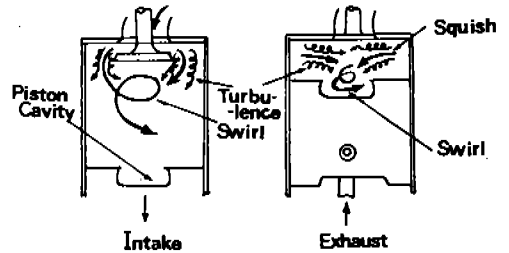


그림 1 흡기 및 압축 과정 중의 가스 흐름

표 1 레이저 도플러 유속계와 열선 유속계의 특성 비교

유속계	장점	단점
열선유속계 (HWA)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 주파수 특성이 좋고, 아나로그 연속 신호가 얻어지므로 난류의 축적된 자료가 많이 있다. 2. 비교적 사용되어온 역사가 길므로 자료가 많이 있다. 3. 가격이 LDA에 비하여 저렴하다. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 압력 및 온도의 보정 및 검정이 필요하다. 2. 흐름의 장을 교란시키기 쉽다. 3. 착화 운전이 불가능하다. 4. 흐름의 방향이 명확하지 않다. 5. 응답성이 좋지 않다.
레이저 도플러 유속계 (LDA)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 비접촉 측정이 가능하다. 2. 빛(光)의 산란 현상을 이용하므로 측정 대상의 계(系)를 교란하지 않는다. 3. 착화 운전시의 측정이 가능하다. 4. 온도 및 압력의 영향을 받지 않는다. 5. 응답성이 양호하다. 6. 원리적으로 교정이 필요없다. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 실린더 내의 유동 측정시 경험적으로 얻는 관련 기술의 축적이 필요하며, 취급이 매우 어렵다. 2. 기술의 축적 및 관련 자료가 많지 않다. 3. 반드시 측정하고자 하는 계를 가시화(可視化)하여야 한다. 4. 기관 자체를 원형대로 유지하기가 어렵다(가시화하는 관계로 기관의 형태가 수정되는 것이 불가피하다).

시는 실린더 내의 국소적인 압력차에 의하여 생기는 반지름 방향 흐름의 하나이다. 난류는 스윙얼 및 스퀴시에 걸쳐져서 발생하는 일종의 와류이며 이들은 모두 공기와 연료 입자의 혼합과 연소에 영향을 미친다. 그러므로 실린더 내의 가스 유동을 정확히 예측하고, 측정하는 것은 기관 연소실의 설계, 연소의 연구에 대단히 중요하다. 그러나 앞에서 각종 유속 측정 방식을 비교한 바와 같이 실린더 내의 유동장 측정은 기관의 형식이나 구조, 작동 원리 등을 감안할 때 다른 방식의 유속계보다 레이저 도플러 유속계가 가장 유리한 측정 장치의 하나라고 볼 수 있다. 그 이유로는 실린더 내에 어떠한 유동장의 교란도 없이 또한 고온 고압에 아무런 영향을 받지 않고 측정할 수 있기 때문이다.

진행 방향으로 산란광을 수광하는 전방 산란 방식(forward scatter type)과 비임의 진행 방향과 반대 방향으로 산란광을 받는 후방 산란 방식(back scatter type)이 있다.

전방 산란 방식의 특징은 비임의 진행 방향으로 산란광을 받으므로 광의 강도가 강하고 S/N(도플러 변조광 강도와 미광(迷光) 이나 전기적 노이즈의 비)가 양호하다. 또한 일반적으로 $1\mu\text{m}$ 의 지름을 갖는 산란 입자의 경우 산란광의 세기를 비교하면 전방 산란광의 강도가 후방 산란광에 비하여 약 100 배정도 강하다. 따라서 가능한한 전방 산란 방식을 사용하는 경우가 유리하다. 그러나 경우에 따라서 측정용 창을 만들 수 없을 때에는 사용할 수 없으며, 창은 반드시 2개이어야 한다. 이것에 비하여 후방 산란 방식에서는 투광측과 수광측이 일체로 되어 있으므로 측정용 창은 1개만으로 가능하다. 그러나 산란 강도가 약하므로 부수적인 측정상의 문제가 생긴다.

③ 산란 입자의 선택과 공급법

LDA는 유동장에 공급되는 산란 입자의 산란광으로부터 유속을 측정하는 계측 장치이므로 산란 입자의 선정과 공급 방법을 정확히 알아야 한다.

산란 입자는 가스 유동에 대한 추종성이 좋고, 산란광의 강도가 세고, 균일한 입자 크기를 가지고 있어야 하며, 인체나 장치에 무해한 것이어야 한다. 흐름의 추종성으로부터 2 kHz의 변동류에서는 입자경이 $2\mu\text{m}$ 이하, 10 kHz의 변동류에서는 $0.5\mu\text{m}$ 이하이어야 한다. 산란 입자로는 TiO_2 ($0.3\mu\text{m}$), Al_2O_3 ($0.5\mu\text{m}$), SiO_2 ($1\mu\text{m}$) 실리콘 오일, PVC 등의 여러 가지가 있으며 산란 입자의 입자 밀도는 유속 10 m/s, 변동 주파수 10 kHz의 흐름에서는 100 개/mm³ 정도가 바람직하다.

공급 방식에는 기체로 불어 보내는 경우와 가진기 등을 써서 입자를 부유시키는 방식이 있다.

④ 실린더 내의 유속 측정법

1) 실린더 내의 가시화

실린더 내의 가스 유동을 측정하기 위하여

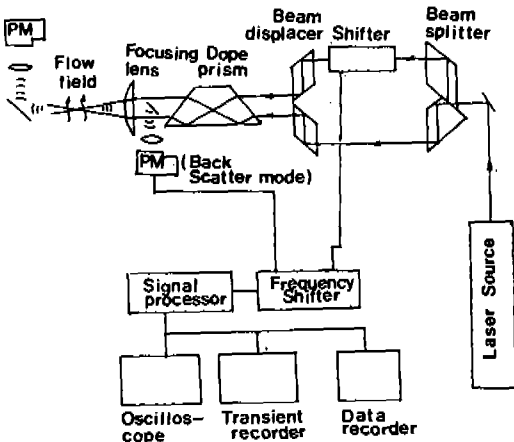


그림 2 레이저 도플러 유속계의 구성

그림 2는 레이저 도플러 유속계의 광학계의 기본 구성을 도시한 것이다. 광원으로는 알곤 이온(Ar^+) 또는 He-Ne 레이저가 사용되며, 레이저 비임은 비임 스플리터를 통하여 2개의 평행 광선으로 분리된 다음 주파수 시프터를 거쳐서 비임 디스플레이, 도우프 프리즘, 집광 렌즈를 통하여 측정 위치에서 교차되도록 한다.

수광계(受光系)는 집광 렌즈와 광전자 증배관(PM)으로 구성된다. 수광 방식에는 비임의

는 측정할 부분을 가시화하여야 한다. 이상적으로는 기관의 구조를 변경시키지 않는 광학창을 갖는 기관을 이용하여 실험하는 것이 바람직한 일이지만 이러한 기관은 고가이므로 일반적으로는 간편하고 많은 비용이 들지 않는 가시화 기술을 이용하고 있다. 측정점도 자유로이 바꿀 수 있는 구조로 측정창을 설치하는 것이 좋다.

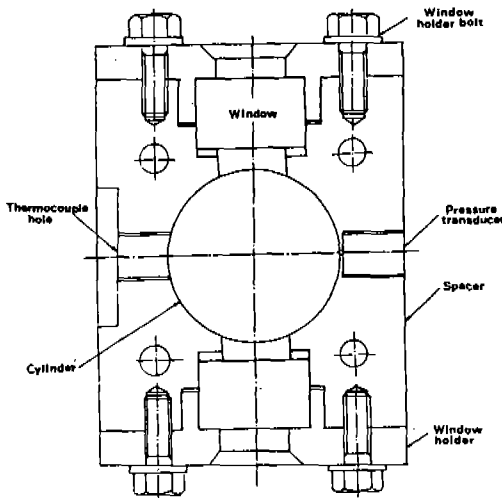


그림 3 측정창을 설치한 가시화 기관¹⁾

그림 3은 기관 실린더 및 흡배기구의 유속 측정을 위한 측정용 창을 갖는 스페이서(spacer)와 투광용관을 갖는 수정된 기관의 한 보기를 나타낸 것이다. 가시화를 위한 창은 가능한 한 기관의 구조를 바꾸지 않는 것이 이상적이거나 대부분의 경우에는 기관의 압축비나 구조를 일부 변경시킨 수정된 기관을 이용한다. 이러한 방법의 하나가 실린더 헤드와 블록 사이에 광학창을 설치한 스페이서를 넣는 방법이다. 그리고 피스톤 위에 적정 두께의 피스톤 헤드 모양과 동일한 구조의 헤드를 겹쳐서 고정하는 방법을 취한다. 이렇게 하면 압축비를 실제 기관의 경우와 거의 같게 유지하면서 소기의 측정 효과를 가질 수 있다. 이것은 시판되고 있는 기관을 개조하지 않고 사용할 수 있으므로 제작비도 저렴하고, 어떠한 기관에도 적용할 수 있어 유리하다. 또한 창의 위치

를 바꾸면 간단히 측정점의 위치도 변경할 수 있으며, 피스톤과 실린더 연소실 또는 피스톤 형상의 변화가 연소에 미치는 영향을 조사하는 경우에는 간단히 피스톤 헤드만을 가공하여 교환하는 것으로 충분하다. 이 때 가시화용창은 여러개를 만들어 두어 실험시 창의 더럽혀짐이 있을 때에는 갈아 끼워야 하며 또한 표면의 손상이 있을 경우에 유리하다. 그러나 이 측정창은 구동 운전이나 발화 운전할 때 공급되는 산란 입자의 부착으로 레이저 투과를 방해하는 일이 많으며, 이것은 측정에 대한 가장 큰 장애이며, LDA의 가장 큰 결점의 하나가 된다. 이 문제는 특히 LDA 측정에 대한 많은 경험을 요구하는 문제의 하나이기도 하다. 이와 같이 측정시 매연 및 산란 입자의 부착 방지를 위한 방법에는 여러 가지 방법들이 이용되었으나 이를 개선하는 적극적인 방법은 알려져 있지 않다. 실험에 따라서는 고온의 물을 순환시켜서 창을 가열하거나, 히터를 이용하여 가열하면 어느 정도 매연 및 산란 입자의 부착을 막을 수 있으나 긴시간의 운전에는 효과를 기대할 수 없다. 따라서 경우에 따라서는 극히 제한된 시간 내의 실험이 이루어지는 경우도 있다.

2) 기관 구동 장치

기관 및 흡입구, 배기구 주위의 유속을 측정하기 위하여 먼저 시도하는 실험은 구동 운전이다. 따라서 구동 운전을 위하여 구동용 전동기, 구동 장치를 부설하여야 하며, 구동 운전 측정 후에는 연료를 공급하여 실제 기관의 발화 운전을 하면서 실험을 진행한다.

3) 측정 결과

그림 4는 2사이클 기관의 흡기관 내의 유속 측정 결과의 한 예⁽¹⁾를 도시한 것이다. 그림에서 Ch1은 반지름 방향의 유속이고, Ch2는 흡입구의 주류 방향의 유속이다. 이들 선도에서 보는 바와 같이 흡기관 내의 유동은 상당한 맥동적인 유동을 하고 있음을 알 수 있다. 반지름 방향의 속도 성분 역시 변화가 심하게 일어나고 있는데 이것은 흡입구로부터 실린더 내로 흡입 도중 상당한 스위일에 가까운

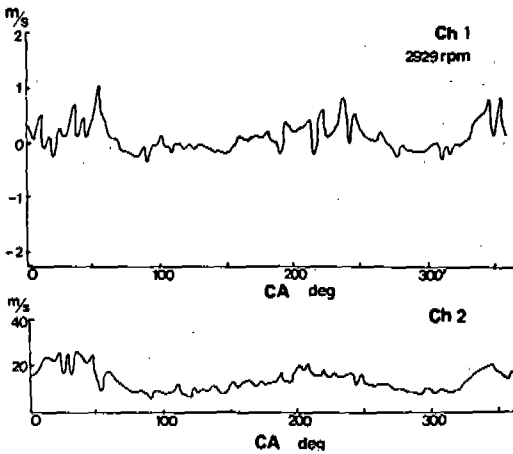


그림 4 흡입구 부근의 유속 측정예

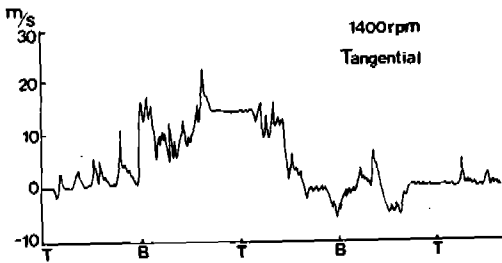


그림 5 실린더 내의 공기 유속의 측정예

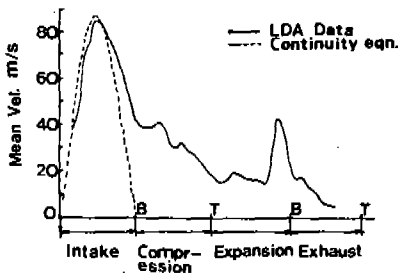


그림 6 실린더 내의 유속 측정예

유동이 이루어지고 있음을 의미하는 것으로 여겨진다.

한편 그림 5는 4행정 사이클 기관의 측정예⁽²⁾를 도시한 것이다. 이 자료는 기관 회전 속도 1400 rpm의 경우이며, 상사점 부근의 신호가 직선(수평)적으로 유지되는 구간은 피스톤이 상승하면서 측정창을 가리는 현상에 기인된 것이다. 대체로 이 자료에 의하면 상사

점 부근 약 30° 정도의 구간에서 일어나고 있다.

한편 그림 6은 P. D. Witze⁽⁹⁾의 측정 결과의 예이다. 그림에서 점선은 이론적으로 연속 방정식으로부터 구한 값으로서, LDA 측정결과와는 이론치와도 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

2.2 LDA에 의한 실린더 내의 유동 계측에 관한 동향

왕복동 기관의 가스 유동에 관한 LDA 계측의 예는 많이 있으나 이들 문헌들을 크게 기관 내의 유동에 관하여 국한시켜 나누어 보면 구동 운전시 유동장 계측과 착화 운전시의 연소 유동장의 계측으로 분류할 수 있다.

가솔린 기관에 관한 것 중에서 실린더 내의 유속 측정 자료는 신호 처리에 관한 것⁽⁴⁾, 구동 기관 실린더 내의 난류 유동 측정⁽⁵⁾, 스윙얼-스퀴시 및 스퀴시의 상호 작용에 관한 연구⁽⁶⁾, 발화 운전시의 유동 측정 및 연소 연구⁽⁷⁾, 광 파이버(optical fiber)를 이용한 내연 기관 실린더 내의 유동 측정 연구⁽⁸⁾, 4사이클 기관의 흡기 및 압축 기간 중의 평균 유속, rms 및 스윙얼 속도 등의 측정⁽⁹⁾, 피스톤-실린더 어셈블리에 대한 흡입 밸브 및 실린더 내 유동에 관한 측정⁽¹⁰⁾, 등이 있으며, 최근에는 광 파이버를 사용한 측정 연구의 예가 발표되고 있다. 기관은 진동을 수반하는 관계로 광학계와 기관을 유연성있는 광파이버를 사용함으로써 더욱 신뢰도가 높고, 실린더 내의 유속을 지금까지 주로 연소실 부근의 제한된 위치의 측정으로부터 실린더 축방향의 속도의 측정에도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 맺음말

이상은 주로 레이저 도플러 유속계를 사용하여 실린더 내의 유동 측정에 관한 사항을 주로 그 측정 방법과 측정예를 중심으로 다루어 보았다. 실린더 내의 유속 측정은 기관의 구조나 기능상의 제약으로 많은 문제점이 제기되고 있으며, 특히 산란 입자의 관측창면의

부착, 수증기의 응축 및 윤활유의 부착 등의 장애, 신호 처리의 문제점 등이 남아 있다. 그러나 다른 유속 측정 장치에 비한다면 온도, 압력 변화에 대한 의존도가 거의 없고 높은 응답성이 있으므로 실린더 내의 유동 측정에는 가장 알맞는 장치의 하나라고 생각된다.

기관을 구조를 연소 성능면에서 변경하거나 개선시킬 경우, 기관의 성능을 향상시키기 위해서는 다른 무엇보다도 기관 내의 유동장에 대한 정확한 측정이 이루어져야 하므로 앞으로 실린더 내의 유동 측정과 연소 성능과의 관계 등에 대한 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 이창식 : 연소실 흡입구 주위의 가스 유동, 미발표 자료
2. 梶山, 茂呂, 齊藤, 三浦, 村上 : 新しい燃焼計測技術, 小松技報, 第25卷, 第2號 p.118. 1979.
3. P.O. Witze: A Critical Comparison of Hot Wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for I.C. Engine Applications, SAE Technical Paper Series, 800132, 1980.
4. 小保方 : レーザ流速計による筒内ガス流動測定, 内燃機關 16-203, p. 51, 1977.
5. A.P. Morse, J.H. Whitelaw, and M. Yiannekis: Turbulent Flow Measurements by Laser - Doppler Anemometry in Motored Piston-Cylinder Assemblies, ASME Journal of Fluid Engineering, Vol. 101, p. 208, June 1979.
6. C. Arcoumains, A.F. Bicen, and J.H. Whitelaw: Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines, ASME, Journal of Fluid Engineering, Vol. 105, March 1983.
7. P.O. Witze, J.K. Martin, and C. Borgnakke: Conditionally - Sampled Velocity and Turbulence Measurements in a Spark Ignition Engine, Combustion Science and Technology, Vol. 36, pp. 301, 1984.
8. F. Durst and H. Krebs: Adaptive optics for IC-engine measurement, Experiments in Fluids, 4, p. 232, 1986.
9. A.P. Morse and J.H. Whitelaw: Measurements of the In-cylinder Flow of a Motored Four-Stroke Reciprocating Engine, Proc. R. Soc. Lond. A 377, p. 309, 1981.
10. C. Vafidis, J.H. Whitelaw: Intake Valve and In-cylinder Flow Development in a Reciprocating Model Engine, Pro. Instn. Mech. Engrs. Vol. 200, No. C2, p. 143, 1986.