

엔진 실린더내 유동 LDV측정

강건용 · 정동수

LDV Measurement of Turbulent Flow Inside the Cylinder in an Engine

Kern-Yong Kang, Dong-Soo Jeong



- 강건용 (한국기계연구원 동력기계실)
- 1960년생
- 내연기관의 유체역학, 연소전공으로 실린더 내부 LDV측정 분야와 난류 특성규명, 전자조절장치개발에 관심이 있다.



- 정동수 (한국기계연구원 동력기계실)
- 1952년생
- 내연기관의 연소, 열전달전공으로 연소실의 열부하해석 및 형상 최적화와 천연가스엔진 개발에 관심이 있다.

1. 머리말

왕 복식엔진에서 연소과정은 실린더내 유체유동에 지배되므로 최적조건인 엔진 설계를 위해서는 실린더내 유체유동을 효과적으로 이용하는 것이 필요하다. 연소과정에 중요한 영향을 미치는 압축말기 연소실내 난류강도는 흡입과정시 생성된 유동의 에너지가 압축과정을 거치면서 작은 스케일의 에디(eddy)로 깨지면서 발생된다. 연소과정시 이러한 에디들은 초기화염생성을 촉진시키고 화염전파속도를 증진시키는 역할을 함으로써 실린더내 유체유동에 대한 이해증진을 위해 실린더내 평균속도 및 난류유동을 측정하는 연구들이 많이 진행되고 있다. 엔진유동은 매사이클의 유동이 엄밀히 주기적인 운동을 하지 않고, 각 사이클의 유동이 비정상 유동을 하며, 유동의 생성 및 소멸이 매우 짧은 특성을 가진다. 따라서 산란입자가 측정체적을 통과할 때 속도데이터가 발생하는

LDV (laser Doppler velocimetry) 측정에 있어서 레이저빔의 산란광노이즈 감소와 산란입자의 효율적인 공급으로 데이터 발생률을 높이는 것이 어려운 점이다.

이 글에서는 엔진유동의 LDV측정시 고려해야 할 문제점들, 실험장치구성, 그리고 데이터처리 방법과 주요측정 결과에 대해 본 연구팀에서 지금까지 수행한 연구결과를 토대로 하여 기술하고자 한다.

2. LDV엔진적용시 고려해야 할 것들

실린더내 유체유동은 초기에는 열선유속계(HWA)를 이용한 측정연구 결과들이 많이 발표되어 왔으나, 1979년 Rask⁽¹⁾ 이래 LDV를 이용한 엔진유동 측정기술은 가장보편적으로 사용되는 방법이다. 일반적으로 HWA에 비교하면 LDV는 다음의 세 가지 기본적인 장점을 가진다.⁽²⁾ 첫째, LDV는 광학측정 장비라는 것이다. 그것은 측정되는 유동장과 간섭하지 않고 험악한 실험조건에 따라 파괴되

기 쉬운 프로우브를 사용하지 않게 한다. 둘째는 직접적으로(보정없이) 속도측정값을 얻게 해준다. 속도는 정해진 거리(플린지)를 횡단하는 유체입자의 통과시간으로 나뉘므로써 직접 구해지기 때문이다. 이것은 열선의 열전달량을 그 입사속도와 관련시켜야 하는 경험적인 교정을 요구하는 HWA와 대조를 이룬다. 셋째로 LDV는 속도의 방향성을 제공한다. 이것은 엔진과 같은 복잡한 유동특성을 갖는 속도측정에 매우 유용하다.

그러나 LDV를 이용해 엔진유동 측정시 몇 가지 어려운 점들이 존재한다. 가장 어려운 문제는 연소실내로 광학창을 설치하는 문제이다. 전방산란방식에 대해서는 실린더를 가로지르는 일직선상의 광학경로가 필요하다. 반면 후방산란방식에서는 레이저빔이 연소실내로 들어오고 산란된 빛이 같은 창을 통해 빠져나오기 때문에 한 개의 창만이 필요하다. 그러나 한 개의 광학창 설치의 간편함이 후방산란방식을 사용할 때 나타나는 여러가지 어려운 점들과 상쇄될 수 있다. 전방산란방식은 후방산란방식보다 신호비(S/N)가 증가하기 때문이다. 두번째 어려운 점은 산란입자를 효율적으로 공급해야 한다는 것이다. 측정된 속도는 실제적으로 유체내에 부유한 입자들의 속도이다. 따라서 산란입자는 유체를 충분히 추종할 수 있도록 크기가 작아야 하며, 또한 산란광이 세기가 강하기 위해서는 입자가 충분히 커야 한다.

LDV장치와 함께 생각하여야 할 또 다른 어려운 점은 데이터처리 문제이다. 많은 양의 데이터가 신속히 얻어져야 하며, 후에 데이터처리를 위해서 저장되어야 한다. 데이터처리는 엔진내 유동이 비정상유동이기에 때문에 더욱 어려워진다. 주지하듯이 정상유동을 해석하는 것보다 시간에 따라 변하는 유동을 특성화하는 데는 보다 많은 양의 데이터가 필요하다. 측정된 속도는 유동변수, 즉 평균 속도와 난류강도로서 정량화되어야 한다.

3. 실험장치의 구성

LDV를 이용하여 엔진내부유동장을 측정할 경우 2절에서 언급한 문제점들을 고려하여 실험장치를 구성하여야 한다. 엔진 연소실내로의 레이저빔 접근을 위한 가시화용 엔진이 필요하고, 연속적인 산란입자공급이 가능한 산란입자공급장치, 그리고 엔진의 구동을 위한 모터링장치 등이 필요하다. 대부분의 LDV측정을 위한 실험장치들이 이와 같은 원리로 구성되기 때문에 현재까지 본연구실에서 완성되어진 실험장치를 예로 들면서 그 구성요소와 고려사항에 대하여 언급하면 다음과 같다.

단기통 가시화엔진 모터링실험을 위한 실험장치는 그림 1과 같이 LDV시스템과 가시화엔진으로 크게 구성된다. 단기통 가시화엔진을 원하는 회전수로 빠르게 구동되게 하는 것은 광학창의 산란입자부착 가능성을 줄이는데 효과적이므로, 구동모터의 선택이 매우 중요하다. 단기통 가시화엔진은 10마력의

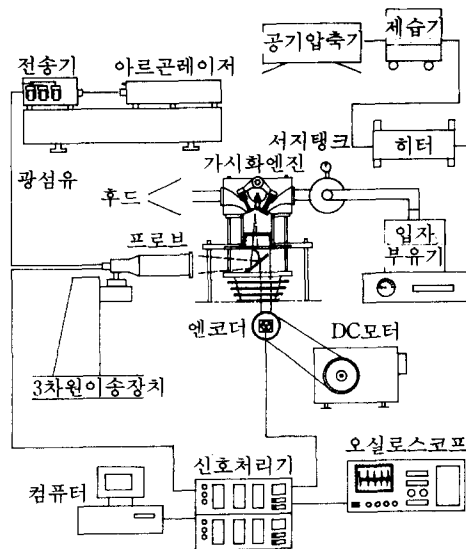


그림 1 엔진-LDV모터링 실험장치

DC모터로 벨트구동되며, 속도변동은 2 rpm 이내로 조절된다. 엔진크랭크축에 회전당 720개 펄스가 발생하는 엔코더를 설치하여, 크랭크각도 0.5도 해상도가 된다. 전자회로 모듈을 제작하여 1사이클 1번씩 흡입 TDC 신호를 발생시키고 LDV데이터가 필요한 크랭크각도 범위를 선택할 수 있도록 한다. LDV시스템은 5와트의 아르곤-이온 레이저와 광섬유전송 트랜스미터, 3차원 이송장치, 그리고 신호처리기로 구성된다. 속도의 방향성감지와 페데스트랄 노이즈제거를 위해 블락셀을 사용하여 주파수편이를 하였으며, 1차원 속도측정을 위해 파장 512 nm의 초록색 레이저를 사용한다. 전방산란모드시 전송 푸르브렌즈의 초점길이는 310 mm, 수광렌즈의 초점길이는 600 mm, 후방산란모드시는 310 mm 초점렌즈를 사용하였고, 측정체적내의 플린지 간격은 2.12 μm 이다.

가시화엔진은 소형 가솔린엔진으로서 흡기 밸브와 배기밸브가 각각 2개씩인 팬트-루프 형태의 연소실을 갖고 있다. LDV측정을 위해 피스톤을 연장하여 표면에 코팅된 반사거울을 설치할 수 있도록 하였고 피스톤 윗면은 두께 12 mm의 석영유리를 장착하여 레이저광선이 연소실내로 들어올 수 있도록 하였다. 또한 피스톤의 기밀과 윤활을 위해 바이톤링과 테프론-카본링을 중첩하여 사용한다. LDV측정을 위한 산란입자공급은 공기를 건조시킨 후, 입자부유기에서 산란입자를 부유시켜 서지탱크를 통하여 엔진에 효율적으로 공급한다. 흡입공기를 건조시키는 것은 산란입자의 관측창 부착방지에 효과적이므로, 송풍기를 통해 나온 공기를 냉동형제습기를 통과시켜 2°C 이슬점을 갖는 건조한 공기로 만든 후, 전기히터를 통해 50도까지 가열하여 건조공기의 질을 높여 공급한다. 실험에 사용한 산란입자는 평균입경이 1 μm 의 산화알루미늄 분말이다.

LDV실험은 그림 2와 같이 후방산란모드와 전방산란모드로 수행한다. 텀블 등의 거

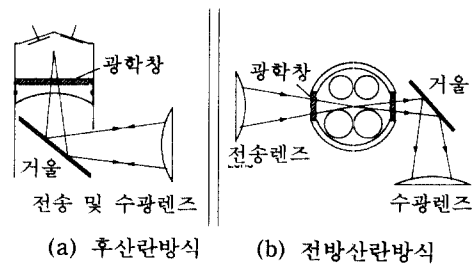


그림 2 LDV 광학배치도

동파악을 위해 많은 측정점에서의 실험이 필요한 경우에는 후방산란모드를 사용하고, 틸새체적 내에서의 사이클리컬브된 난류측정을 위해서는 전방산란모드를 사용한다. 전방산란모드 사용시 관측창, 초점렌즈, 반사거울의 레이저빔의 통과매체의 진동분리가 필수적이다. 최근 전방산란모드시 측정체적의 길이를 줄이기 위해서 편축 전방산란모드(off-axis forward scattering mode)를 이용한다.

4. 측정된 데이터 해석방법

4.1 데이터해석 필요성

엔진내 측정으로부터 데이터를 해석하는데 근본적인 문제는 실린더내 유동이 시간에 따라 변하는 특성을 갖는다는데에서부터 야기된다. 전형적인 정상유동상태 흐름에서, 순간속도는 평균속도와 난류변동으로 분리된다. 정상유동에서 평균은 단순히 시간평균이라는 것이 분명하며, 그것은 물리적으로 의미가 있다. 그러나 엔진실린더내 유체유동은 엔진자체의 사이클특성 때문에 시간에 따라 변하는 특성을 갖으므로, 순간속도를 평균속도와 난류성분으로 나눌 때 어려움이 따른다. 통상적으로 엔진의 각사이클간 변동이 없다는 가정하에서 좁은 크랭크각도 폭에서 앙상블평균에 의해 평균속도를 계산하는 앙상블평균 방법과 매사이클별로 평균속도와 난류성분을 따로 분리하는 사이클리컬브된

속도해석 방법이 있다. 앙상블평균해석시는 사이클에 무관하게 데이터를 얻기 때문에 데이터발생률이 큰 문제가 되지 않으나, 사이클리졸브드 해석시 나이키스트이론을 만족하려면 난류주파수의 2배 이상의 데이터발생률이 얻어져야 함으로 10 KHz 이상의 데이터발생이 요구된다.⁽³⁾ 그러나 엔진에서 이 정도의 고속측정이 쉽지 않으므로 LDV측정에 어려움이 따른다. 일반적으로 텀블, 스웰유동 등의 전체적인 거동을 파악할 때는 앙상블평균방법을 사용하고, 난류의 정확한 특성을 파악하기 위해서는 사이클리졸브된 속도해석이 사용되어지고 있다. 각 속도 해석의 방법들을 간략히 설명하면 다음과 같다.

4.2 앙상블 평균해석

앙상블평균해석에서는 사이클변동을 무시하므로 순간속도 U , 앙상블평균속도 U_{EA} 와 변동속도 u_F 의 합으로 표시된다.

$$U(\theta, \Delta\theta, i) = U_{EA}(\theta, \Delta\theta) + u_F(\theta, \Delta\theta, i) \quad (1)$$

여기서, θ 는 크랭크각도, $\Delta\theta$ 는 θ 에 대한 크랭크각도폭, 그리고 i 는 i 번째 사이클을 의미한다. LDV측정값이 산란입자가 측정체를 통과할 때마다 시간에 대해 불규칙하게 발생하기 때문에, 폭 $\theta \pm \Delta\theta/2$ 내에서 측정된 속도값을 크랭크각도 θ 의 값으로 인정하는 것이 필요하다.

4.3 사이클 리졸브해석

사이클 리졸브해석은 각사이클 내에서 평균속도인 벌크속도의 계산이 요구된다. 앙상블평균속도와 다르게 벌크속도는 사이클마다 변할 수 있다. 크랭크각도에 대한 속도데이터로부터 각 사이클에서의 벌크속도를 결정하는데 사용될 수 있는 몇 가지 방법들이 있다. 짧은 시간간격에서의 시간평균을 수행하는 시간평균방법, 다항식을 이용한 커브피팅방법, 그리고 디지털 저역역통과 필터링의 3

가지 방법들이 그것이다. 결국 위 3개의 모든 방법들은 순간속도 데이터를 저역역필터링하는 기능을 한다.

5. 엔진유동 측정 주요결과

그림 3은 4밸브 엔진내의 텀블유동 속도측정결과를 흡입 및 압축과정 동안 보여주고 있다. 이 그림은 1000 rpm일 때 31개 측정점에서 후방산란방식으로 측정된 것이다. 그림에서 흡입유동특성에 따라 텀블유동의 생성과정을 볼 수 있으며, 단면속도분포에 따라 텀블속도의 크기와 텀블중심의 변화가 보인다.⁽⁴⁾ 그림 4는 서로 다른 두 포트내 크랭크각도 330도, 360도에서의 시간 자체상관계수를 나타낸다. 정확하게 Y축을 중심으로 대칭이 아닌 것은 엔진유동의 비정체유동가정에 의한 것이고, X값이 커질수록 음의 값으로 변동하는 것은 엔진유동의 평균속도(저주파 성분)가 난류감쇄기간 동안 심하게 나타나기 때문이다. 시간 자체상관계수 곡선은 초기에 급속히 감쇄되며, 그뒤에 변동하면서 점차적으로 감쇄되는 특성을 보인다.⁽⁵⁾

적분시간 스케일은 Taylor 정의에 의한 시간 자체상관계수 곡선 밑에 있는 면적에 해당하는 시간간격이며, 이것은 속도가 그 자체와 상관되어질 수 있는 시간의 척도이다. 평균운동이 없는 유동에 대해서는 적분시간 스케일은 큰 에디의 대략적인 존재시간을 나타내는 척도이지만, 평균운동이 있는 유동에 대해서는 이것은 단지 에디 통과시간의 척도를 나타낸다. 엔진난류의 시간자체상관계수 곡선이 음의 값으로 변동하는 특성을 갖기 때문에, Taylor의 정의에 따라 적분시간 스케일을 계산할 수 없다. 따라서 엔진난류의 적분시간 스케일의 산출을 위한 몇 가지 알고리즘이 제안되고 있지만, 크기에 있어서 약간 차이를 보일 뿐 같은 경향을 가진다.

엔진실린더내 난류에너지의 생성 및 소멸을 심도있게 분석하고자 할 경우에는 엔진크

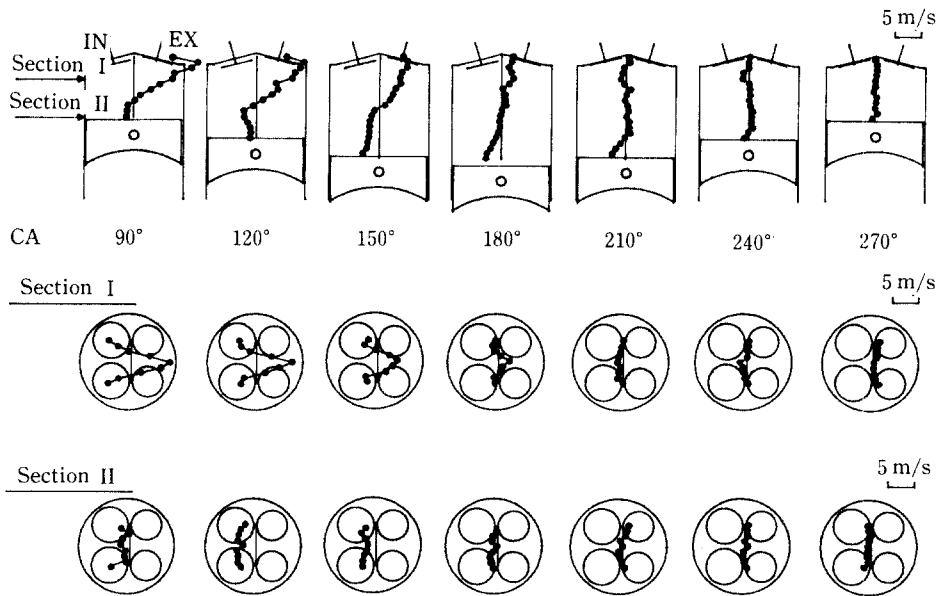


그림 3 흡입 및 압축과정시 측정된 텀블속도 성분변화

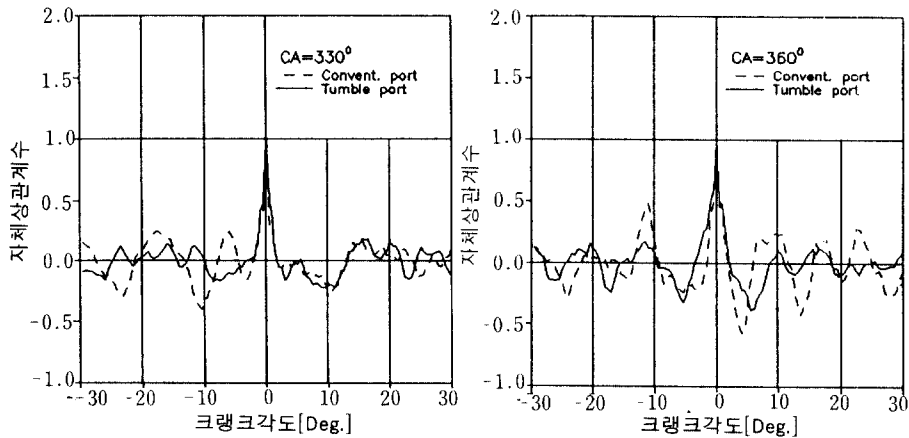


그림 4 압축말기 자체상관계수 변화

랭크각도에서 주파수의 함수로서 난류운동에 에너지를 산출하는 것이 매우 유용하며, 주파수에 대한 난류운동에너지를 분포는 파워스펙트럼 밀도함수, $E(\kappa)$ 로 표시된다. 유동이 비정상체흐름일 때 파워스펙트럼은 시간 자체상관계수 R 의 Fourier변환으로부터 얻을 수 있다. Kolmogorov⁽⁶⁾는 국소등방성 개념을

이용해 파워스펙트럼에 대한 이론적인 식을 유도하였으며, 거기서 작은 에디들은 국소조건에서 대략 평형상태에 있다. Kolmogorov의 파워스펙트럼 이론식은 아래와 같다.

$$E(\kappa) = \alpha \epsilon^{2/3} \kappa^{-5/3} \quad (2)$$

그림 5는 두 개의 서로 다른 흡기포트엔진에

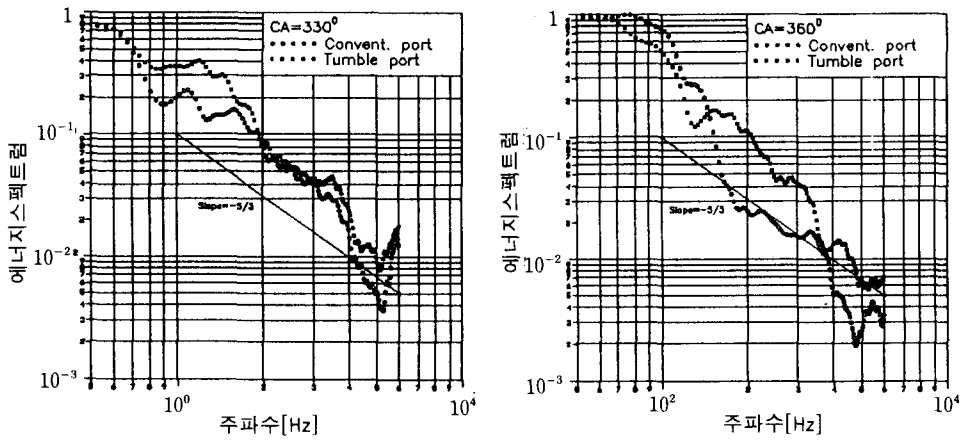


그림 5 압축말기 난류에너지 스펙트럼 변화

서의 압축말기 난류에너지의 파워스펙트럼과 Kolmogorov의 이론식의 기울기 $-5/3$ 의 직선을 나타낸다.

정데이터 이용없이 희박연소엔진을 개발한다는 것은 상상도 할 수 없는 일이기 때문이다.

6. 맺음말

엔진실린더내 유동을 LDV로 측정하는 것은 더 이상 앞선기술이 아니다. 최근 상용 LDV는 광섬유 프로브와 신호처리가 개선되면서, 점차 다루기 쉽고 S/N비도 향상되고 있다. 가시화엔진을 잘 만들고, 산란입자를 효과적으로 공급하면 엔진으로부터 속도데이터를 얻어내는 일은 그렇게 어렵지 않을 것이다. 고속측정기술과 데이터해석기술에서 조금 고생한다면 말이다. 지금 선진국에서는 두점 동시측정법을 시도해 난류의 특성길이를 산출하고 있지만, 속도성분을 동시에 2차원이상 측정하는 곳은 거의 없다. 속도신호의 동시발생과 난류정량화에 어려움이 많기 때문이다. 국내연구수준으로 볼 때 한동안 1차원 LDV이면 충분하고, 레이저발생장치도 굳이 큰것을 사용하지 않아도 된다고 생각한다. 아무쪼록 국내에서도 LDV가 보편적으로 사용되어 엔진유동해석에 보다 효과적으로 이용되고, 엔진최적설계에 필수적인 장비가 되기를 바라는 마음이다. LDV측

참고문헌

- (1) Rask, R. B., 1979, "Laser Doppler Anemometer Measurements in an Internal Combustion Engine," SAE Paper 790094.
- (2) Witze, P. O., 1980, "A Critical Comparison of Hot-Wire Anemometry and Laser Doppler Velocimetry for I. C. Engine Applications," SAE Paper 800131.
- (3) Liou, T. M., Santavicca, D. A., 1985, "Cycle Resolved LDV Measurements in a Motored IC Engine," Trans. of ASME, JFE Vol. 107.
- (4) 강건용, 이진욱, 정동수, 정석용, 1993, "가시화 모터링엔진의 흡기포트형상에 따른 텀블유동 LDV측정," 자동차공학회 춘계학술대회, 아시아자동차.
- (5) 강건용, 이진욱, 정동수, 정석용, 백재현, 1993, "엔진난류의 주파수해석," 자동차공학회 추계학술대회, 서울대.
- (6) Hinze, J. O., 1975, Turbulence, McGraw-Hill.