

스파아크 점화기관의 흡기습도에 대한 화염속도 및 연소의 변화

Change in Flame Velocity and Combustion with Inlet Air Humidity on the Spark Ignition Engine

金文憲* · 李成烈**
(M. H. Kim · S. Y. Lee)

Abstract

The influence of inlet air humidity on the flame velocity and combustion of the spark ignition engine were described experimentally by means of the flame velocity measuring apparatus using ion-current. The flame velocity are greatly influenced air fuel ratio and engine speed, and linearly decrease according to the increasing of inlet air humidity.

The flame travell curve is very similar to the rate of mass burned and combustion progressive is estimated mostly by only the rate of mass burned curve.

The decreasing of the mean flame velocity is about 0.4m/s for increasing of 0.001 specific humidity and we think the reason is mainly decreasing of thermal conductivity.

1. 서론

기관에 흡입되는 흡기는 습공기이며, 이 흡기의 습도는 대기조건에 따라 달라진다. 흡기습도는 기관출력에 영향을 주며⁽¹⁾ 이것의 원인은 기관의 연소변화에 기인되는 것으로 알려져 있다.

저자들은 흡기습도를 변화시킨 실제기관의 운전에서 얻은 지압선도의 해석으로부터 흡기습도가 연소과정에 미치는 영향, 즉 흡기습도의 증가에 따라 연소의 지연이 생기며 또한 기관출력이 저하한다는 것을 보고한 바 있다.⁽²⁾

그러나 화염속도를 아울러 측정하여 더욱 본질적인 해석이 요망되고 있다. 화염속도의 측정방법은 여러가지가 있겠으나 그중 한 방법으로 화염면의 현저한 도전성을 이용하여 직류전압 및 직렬저항을 가한 전극, 즉 이온 프로우브(ioni-

sation probe)를 연소실내에 삽입하여 화염면이 그곳을 통과할 때 생기는 전류를 기록하는 방법은 화염전파를 측정하는 간단하고도 확실한 방법으로 생각되며 오래전의 것으로는 Schnauffer,⁽³⁾ Rabezzana,⁽⁴⁾ Zinner⁽⁵⁾의 보고를 볼 수 있다.

본 논문은 이온 전류를 이용한 화염전파 측정장치를 구성하여 이 장치로부터 흡기습도 변화에 대한 화염속도를 측정하고 아울러 지압선도를 얻어 그 해석장치로부터 압력상승율, 열발생율, 질량연소율 등을 구하여 흡기습도 변화에 대한 연소과정의 해석을 구체화 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

(1) 기관운전조건 및 흡기습도의 조절방법
실험용 기관은 Table 1에 나타낸 바와 같이 공

* : 숭전대학교 공과대학
** : 성균관대학교 공과대학

Table 1. Specification of test engine.

| | |
|--------------------------|--|
| Engine Type | Four stroke cycle engine, Air cooling vertical type, L-Head type |
| Bore × Stroke | 90 × 70mm |
| Stroke volume | 445 cm ³ |
| Compression ratio | 4.5 |
| Number of cylinder | 1 |
| Length of connecting rod | 133mm |
| Method of ignition | battery ignition |

병식, 직립 단기통기관이며 이 기관을 직류동력제 (input 7.5 kW)에 직결하고, 드로틀밸브 전개 상태에서 동력계의 저항조정으로 기관운전 상태를 조정한다. 사용연료는 비중 0.745인 가솔린을 사용하였다.

기관운전은 이 기관의 최대 토크를 발생하는 회전수인 $N=1600\text{rpm}$ 으로 고정하고 점화진각은 20°btc , 공기연료비는 최대 화염속도를 발생하는 공기연료비인 $A/F=13$ 으로 일정하게 하였다.

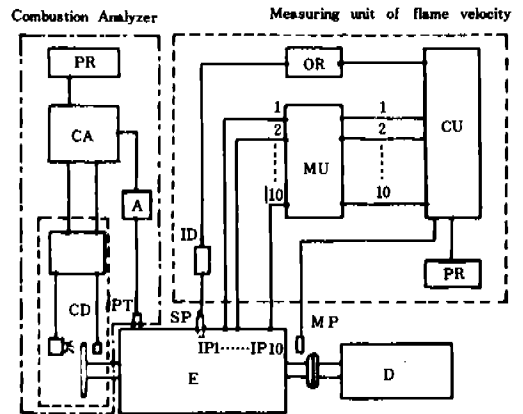
흡기습도의 변화는 흡기관 입구에 있는 공기실을 가변 가습기를 사용하여 가습함으로써 변화시켰으며 흡입서지탱크 내의 공기습도를 흡기습도로 하였다.

(2) 측정장치의 개요

Fig. 1은 측정부의 개략도이며, 화염속도 측정 장치와 연소해석장치의 두 부분으로 된다.

연소해석장치에서는 압력-크랭크각선도, 압력-체적선도, 압력상승율 ($dp/d\theta$)선도, 열발생율 등을 구하였다.

화염속도 측정장치는 10개의 이온 프로우브를 사용할 수 있는 회로로 구성되며 따라서 Fig. 2 (a)와 같이 10개의 프로우브를 주어진 간격으로 삽입하였다. 화염이 프로우브에 도달하면 회로에 이온전류가 흐르므로 점화시작으로부터 화염이 프로우브에 도달할 때까지의 시간을 측정부 (measuring unit)에서 측정하고, 프로우브의 거리와 측정된 시간으로부터 그 구간의 평균화염속도를 산출한다. 이 화염신호의 입력 회로에는 50~100V의 직류전압을 가하고, 직렬 저항치로



- E : test engine
- D : DC dynamometer
- CU : control unit
- MU : measuring unit
- IP : ionisation probe
- SP : spark plug
- ID : ignition detector
- OR : optical receiver
- MP : magnetic pick up (BDC detector)
- CA : combustion analyzer
- CD : TDC and crank angle detector
- PT : pressure transducer
- A : charge amplifier
- PR : printer

Fig. 1. Schematic diagram of measuring system.

써 0.3~1 MΩ 정도를 사용하였다. 또한 측정치의 신뢰도를 높이기 위하여 최대 100회까지 측정할 수 있도록 하였으며 측정회수는 제어부 (control unit)에서 조정할 수 있고, 제어부에는 컴퓨터가 내장되어 있어 평균치 및 표준 편차를 구할 수 있도록 되어있다.

Fig. 2(b)는 연소시작부터 연소끝까지의 화염의 진행과정을 좀더 세밀히 관찰하기 위해 연소끝 부분으로 예상되는 곳에 프로우브를 삽입한 모양을 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

(1) 이온 프로우브 삽입위치 및 공기 연료비가 화염속도에 미치는 영향

Fig. 3은 이온 프로우브의 삽입 위치에 대한 화염속도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기연소 (프로우브 1, 2, 3, 4, 5)에 있어서는 약간의 속도의 차가 있지만 그밖의 것은 큰 차이가 없었다. 초기연소에 비하여 중반이후의 화염속도가 증가되는 것은 가스운동의 영향을 받기

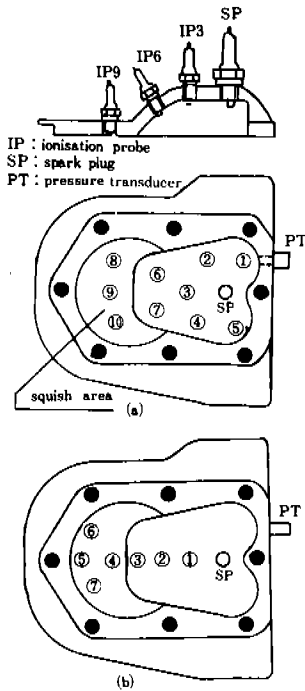


Fig. 2. Location of the ionisation probes.

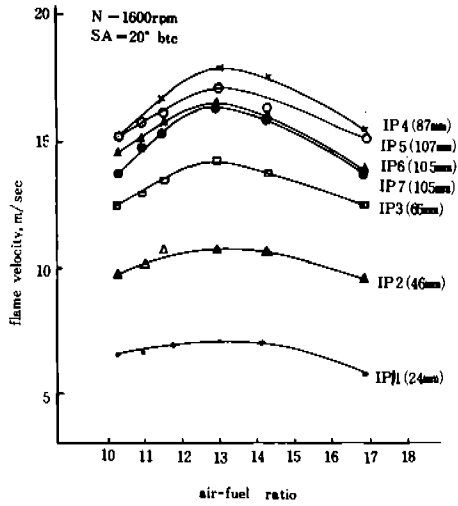


Fig. 4. Flame velocity on air-fuel ratio

낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 스파이크 플러그로부터 멀어질수록 화염속도는 증가하지만 연소의 끝에서는 오히려 화염속도가 떨어짐을 알 수 있다. 이것 또한 벽 가까운 쪽의 연소이므로 가스운동의 영향이 약해지는 탓으로 생각한다. 어느 위치에 있어서나 가솔린 연료에 있어서는 공기연료비 A/F=13에서 화염 속도는 최대가 되고 이것보다 희박하거나 농후해도 화염속도는 저하한다.

점화시기에 대한 화염속도는 큰 변화가 없으며, 또한 기관회전수에 대해서는 기관 회전수의 증가에 따라 거의 직선적으로 화염속도는 증가한다.⁽⁹⁾ 이것은 회전수 증가에 따른 피스톤 속도의 증가에 의하여 실린더내 가스의 운동이 더욱 활발해지기 때문인 것으로 생각된다. 그러므로 본 실험의 기관운전조건으로서 공기연료비는 최대화염속도를 발생하는 공기연료비인 A/F = 13, 점화시기 및 기관회전수는 최대 토크를 발생하는 20° b/c, N=1600rpm인 상태에서 실험하였다.

(2) 흡기습도가 화염속도에 미치는 영향

흡기습도 변화에 대한 화염속도를 측정된 것이 Fig. 5이다. 그림에서 보는 바와 같이 연소실 내 각 위치에 있어서의 화염속도는 각각 다르지

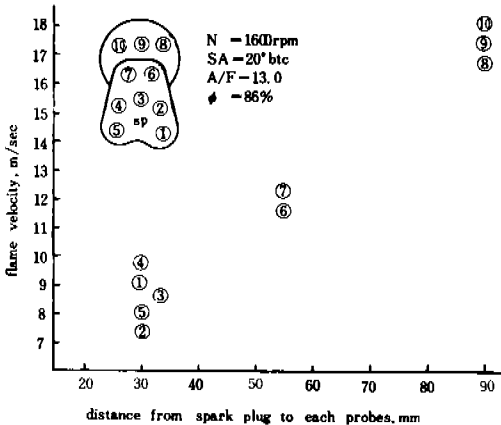


Fig. 3. Flame velocity for location of the probes.

때문인 것으로 생각하며 초기연소는 가스압력 및 온도가 비교적 낮고 또한 벽 가까운 부분에서의 연소이므로 가스운동의 영향을 거의 받지 못하는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 Fig. 2(b)의 실린더 헤드를 사용한 경우의 공기연료비 변화에 대한 화염속도를 나타

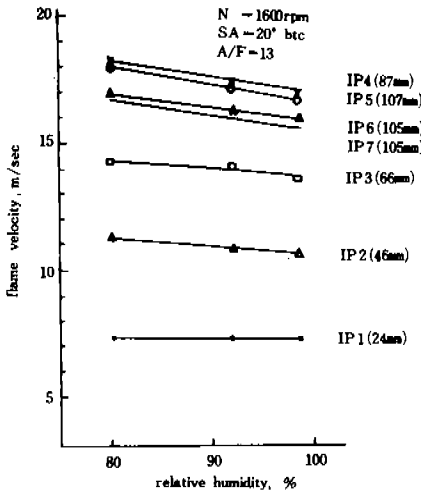


Fig. 5. Flame velocity for the inlet air humidity.

만 어느 경우에 있어서나 습도증가에 따라 화염 속도는 직선적으로 감소한다. 즉, 흡기속도의 증가는 느린 연소가 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 흡기습도 변화에 따른 열역학적 성질의 변화를 나타낸 것이다.⁽⁷⁾ 그림에서 보는 바와 같이 표준공기를 전구온도 $T_{id}=20^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $\phi=60\%$ 를 기준으로 할 때 정적비열 C_v 와 정압비열 C_p 는 흡기습도 증가에 따라 선형적으로 증가하고 있다.⁽⁸⁾ 또 비열비 k 는 정적비열의 증가율이 정압비열의 증가율보다 크게 됨으로써 흡기 습도 증가에 따라 약간 감소되고 있다. 한편 열

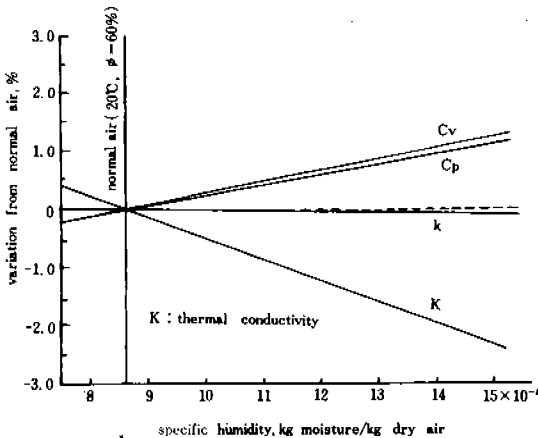


Fig. 6. Effect of humidity on properties of air.

전도율 (thermal conductivity) $k^{(9)}$ 는 흡기습도 증가에 따라 선형적으로 감소되고 있음을 알 수 있다. 비열의 증가는 실린더내의 가스온도를 낮게 할 것이며, 열전도율의 감소는 연소반응에 영향을 미칠 것으로 생각하며 비열증가에 의한 연소 온도 저하와 더불어 화염속도를 저하시키는 원인이 될 것으로 생각된다.

다음에 연소진행 과정을 파악하기 위해서는 화염진행시간 대 화염도달거리와의 관계, 즉 화염경과곡선을 작성하면 화염경과를 쉽게 이해할 수 있다. 이것을 나타낸 것이 Fig. 7이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기연소는 느리고 중간 연소에 있어서는 급속하며 다시 후기연소에 있어서는 느리게 된다.

흡기습도의 영향으로는 흡기습도의 증가에 따라 화염속도가 저하되므로 화염경과 곡선으로는 그 화염진행의 경과가 지연되고 있으며 이것은 곧 이미 보고한 바와 같은⁽²⁾ 질량 연소율로서 연소진행경과를 평가할 때의 연소지연의 원인이 되는 것이다.

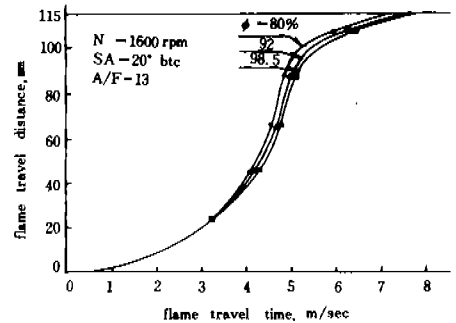


Fig. 7. Flame progressive process.

스파이크 점화기관의 연소과정을 이해하기 위해서는 Fig. 8과 같이 화염경과곡선을 몇 단계로 구분하는 것이 편리하다. 그림의 a는 견보기 점화지연시간 (apparent delay time)이며, 즉 시간 a는 스파이크에 의하여 생성된 화염핵이 직각열염 (hot flame)으로서 전파를 시작하는 것이 아니고 단시간이지만 지연되어 전파를 시작하며 이 기간을 화염전파 지연 기간이라고도 할 수 있다. 이 기간의 장단에 따라 착화성의 양부류 평가

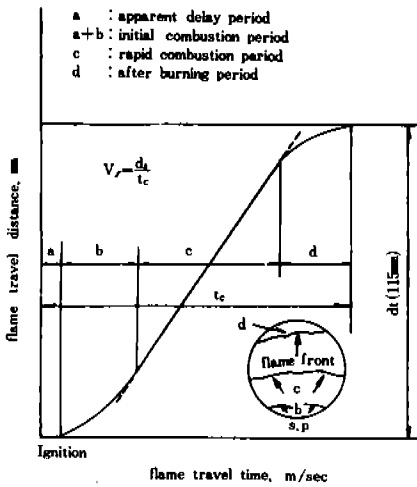


Fig. 8. Flame progressive process.

할 수 있고, b는 화염전파의 가속기간이며, (a+b)에 해당하는 기간을 초기연소기간으로 볼 수 있다. c는 급속연소기간이며 대략 일정의 최고화염속도에 도달한다. 질량연소를 곡선으로 판단할 때 대부분의 질량은 이 기간동안에 연소되는 것으로 판단된다. 또한 d는 후기연소기간이며 연소실벽에 화염이 근접함에 따라 다시 감속된다. 질량연소를 곡선으로 보아서 10%미만의 질량이 느린연소를 하는 구간이 되는 것으로 판단된다.

보통 말하는 화염속도란 연소시작부터 연소끝까지의 평균속도를 말하는데 Fig. 8과 같은 화염경과곡선을 얻으면 연소 소요시간(t_c)은 $t_c = a + b + c + d$ 이고 화염이 도달하는 최대거리를 dt 라 하면 평균화염속도 V_f 는 $V_f = dt/t_c$ 로서 구할 수 있다.

Fig. 9는 흡기습도 변화에 대한 평균 화염속도의 변화를 나타낸 것이다. 흡기습도 증가에 따라 평균화염속도는 직선적으로 감소되고 있으며, 흡입혼합기중의 절대습도가 0.001 증가에 따른 평균화염속도의 감소는 약 0.4 m/sec 정도이며 이것은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 주로 열전도율의 감소에 기인하는 것으로 생각한다.

Fig. 10은 실제 기관운전에서 채취한 압력경과곡선(지압선도)이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡기습도 증가에 따라 사이클의 최고압력은 낮아지고 있으며, 또한 최고압력이 놓이는 위치는

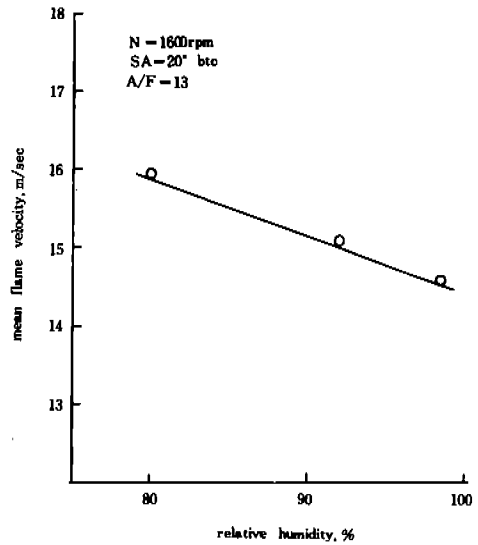


Fig. 9. Relation between mean flame velocity and relative humidity.

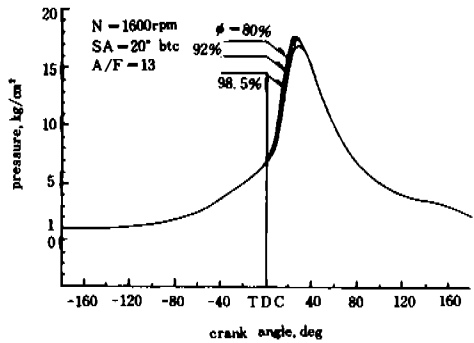


Fig. 10. P-θ diagram.

상사점으로부터 약간씩 멀어지고 있다.

이 압력경과 곡선으로부터 열발생율을 구하여 이것으로부터 얻은 질량연소율곡선을 Fig. 11에 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 흡기습도 증가에 따라 질량연소의 지연을 볼 수 있으며, 화염경과곡선과 매우 상사함을 알 수 있고 이것은 화염속도에 지배됨을 알 수 있다.

4. 결론

이상과 같은 결과로부터 다음과 같은 결론 사

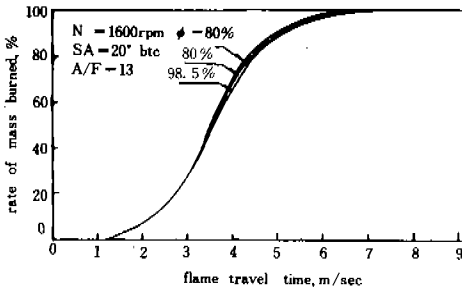


Fig. 11. Rate of mass burned vs flame travel time.

향을 열거할 수 있다.

- (1) 이온전류를 이용한 화염속도 측정장치로부터 만족스러운 화염속도를 측정할 수 있었으며 기관변수, 즉 공기연료비, 점화진각 및 기관회전수의 변화에 있어서는 점화진각의 영향은 매우 적고, 공기연료비에 대해서는 최대 화염속도를 발생하는 공기연료비가 존재하며 이것보다 희박하거나 농후해도 화염속도는 저하한다. 기관회전수의 영향은 화염속도를 거의 선형적으로 변화시키며 이것의 영향은 매우 크다.
- (2) 흡기압도의 증가에 따라 화염속도는 선형적으로 감소하며 이것이 연소지연의 원인이 될 수 있다.
- (3) 흡기의 절대습도 0.001 증가에 따른 평균 화염속도의 감소는 약 0.4 m/sec 정도이며 이것은 주로 열전도율의 감소에 기인하는 것으로 생각한다.
- (4) 연소실내에 많은 이온 프로우브를 삽입함으로써 화염경과곡선을 얻을 수 있었으며 이것

으로부터 연소진행에 대한 평가를 할 수 있다. 화염경과곡선은 질량연소율곡선과 상사하며 질량연소율곡선만으로 연소진행에 대한 평가를 대체로 할 수 있음을 제언한다.

또한 화염경과곡선으로부터는 비교적 정확한 평균화염속도를 구할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 梁瑞允, 金文憲, 李成烈; 기관성능에 미치는 흡입공기습도의 영향, 대한기계학회 1982년도 추계학술대회초록집, pp. 212~216, 1982.
- (2) 金文憲, 李成烈; 흡입습도가 스파아크 점화기관의 연소과정에 미치는 영향, 한국자동차공학회지, Vol. 5, No. 2, pp. 41~47, 1983.
- (3) K. Schnauffer, Z. VDI 75 p. 455 1931, SAE Trans., 29, p. 17, 1934.
- (4) H. Rabezzana, S. Kalmer, Auto. Ind., 72, 1935.
- (5) K. Zimmer, ATZ42, p. 251, 1939.
- (6) 全泰熙, 金文憲, 李成烈; 스파아크 점화기관의 화염속도측정에 의한 연소해석, 대한기계학회, 1983년도 추계학술대회 초록집, pp. 229~233, 1983.
- (7) C. F. Taylor; The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, Vol. 1, pp. 41~42, MIT Press, 1979.
- (8) 日本機械學會 編, 傳熱工學資料, p. 230, 1966.
- (9) A. L. Lindsay & L. A. Bromley; Thermal Conductivity of Gas Mixtures. Ind. Eng. Chem., 42 p. 1508, 1950.