

순간온도 계측 프로브를 사용한 피스톤 표면 온도측정

A Measurement of Piston Surface Temperature by Using Instantaneous Temperature Measuring Probe

이 성 열*, 이 영 조**
Songyol Lee, Young Jo Yi

ABSTRACT

In order to measure the piston surface temperature and heat flux, autors have developed the measuring system with an instantaneous temperature probe. Such the instantaneous temperature probes were embodied into the top of piston for measurement and L-link system, designed to fit the test engine, extracts the thermocouple wires from the piston outside of engine employing a mechanical linkage. Then the instantaneous surface temperature was measured to calculate the heat flux flowing into the top surface of piston in a spark ignition engine.

As a result, the following phenomena have been obtained through the study.

- 1) It is found that the time response and durability of temperature probe with a thin film thickness 10um and mechanical linkage with thermocouple wire extraction is sufficient at this experiment.
- 2) For the quantitative effect of variation in engine speed, the temperature swing and heat flux on the top of piston increase with increasing the engine speed.
- 3) It is proved that the temperature swing and heat flux decrease with distance from spark plug.

1. 서 론

현재의 기관 설계 경향은 고속 운전 기관을 추구하고 있다. 고속 기관은 소형 경량화를 통해서 실현되며, 단위 시간당 연소열이 증가하므로 기관 각 부위에 열적 부재를 야기하게 된다. 그러므로 연소실 밖으로 열전달이 원활히 되어야 하며, 특히 피스톤에서 열전달

이 원활치 못하면 피스톤이 열팽창하여 실린더 벽과의 마찰이 크게 되고 이상 마모를 가져온다. 이상 마모가 되면 연소 가스가 크랭크실 안으로 누출되거나 심하면 피스톤이 움직일 수도 있으므로 피스톤에서의 열전달은 상당히 중요하며, 이 현상을 연구하여 피스톤에서의 열전달 특성을 밝힐 필요가 있다.^{1,2)}

이를 위하여 순간 온도를 측정할 수 있는

* 정회원, 성균관대학교

** 정회원, 성균관대학교 대학원

프로브를 제작하고, 온도 측정 시스템을 확립하였다. 한편 피스틴에 온도 측정 프로브를 삽입해야 하기 때문에 피스틴 운동에 의해 프로브 도선이 끊어지기 쉬우므로 도선을 기관 밖으로 안전하게 유도하기 위한 기계 장치가 필요한 바, L-링크를 제작 사용하였다. 이것으로 피스틴 표면의 순간 온도를 측정하여 일련의 지리 과정을 거쳐 일유속을 계산하였다.

2. 순간 온도 측정 프로브

기관 운전 중 한 사이클 동안의 각 크랭크각에서의 순간 연유속을 계산하기 위해서는 피스틴 표면의 순간 온도 변동과 표면에서 임의 깊이 만큼 떨어진 곳에서의 온도를 동시에 측정하여야 한다. 피스틴 표면의 온도는 잘라내 변동하므로 이를 측정하기 위한 집점 A는 고응답성을 가져야 하는데, 이는 열전대 소신의 지압이 피도록 작은 것을 선택하고 두 소신의 집점이 되는 피막의 두께를 얇게 함으로써 얻을 수 있다. 피스틴 표면에서 임의 깊이의 온도를 측정하기 위한 B집점은 한 사이클 동안 온도 변동이 거의 없는 내부 온도를 측정하므로 응답성이 크게 문제되지 않는다.

프로브의 어댑터는 피스틴과 비슷한 재질인 알루미늄으로 제작하였고, 굵기가 0.32mm인 두 소선은 각각 K형 열전대인 알루미늄과 크로멜이다. 두 소선을 점 용접으로 붙여 B집점을 만든다. A집점은 이온 스포터링 증착기를 사용하여 금을 0.1 μ m 두께로 입혀 두 소선을 전기기가 통할 수 있도록 하고 그 위에 부전에 니켈도금법으로 10 μ m의 니켈 피막을 입힌다. 피막 두께 10 μ m는 피스틴 표면의 온도를 큰 오차없이 측정할 수 있는 두께이다.⁴⁾ 이와 같이 만들어진 프로브를 Fig.1에 나타낸다.

제작한 프로브의 기전력을 온도로 환산하기 위하여 프로브와 표준 온도계를 같이 전기로에 넣어 검정을 실시한 결과, 집점 A와 B의 기전력 대 온도의 환산계수는 각각 28.8과 27.6 $^{\circ}$ C/mV이다.

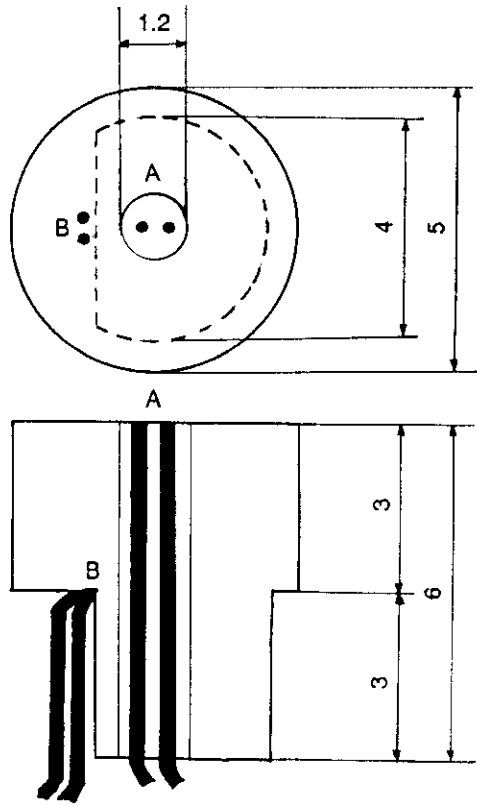


Fig.1 Surface temperature probe

3. 도선을 인출하기 위한 L-링크

피스틴은 기관 운전 중 왕복 운동을 하므로 피스틴에 삽입 프로브의 도선도 같이 운동을 하게 된다. 도선이 움직이면 파단되기 쉬우므로 도선을 안전하게 유도하기 위하여 L-링크를 제작하여 사용하였다.⁴⁾ 링크 기구의 재료로는 왕복운동에 따른 관성력을 줄이기 위해 가벼우면서도 강도가 큰 알루미늄 합금인 두랄루민을 사용하였다. 링크 기구는 브래킷, 링크 본체, 스윙 링크와 지지대의 네 부분으로 구성된다.⁵⁾

Fig.2는 피스틴 정면에 삽입 프로브의 도선이 링크 기구를 통하여 인출되는 모습을 나타낸 것으로 피스틴 회전 방향에서 분리된 것이다. 브래킷이 피스틴 회전 모스에 볼트로 고정되

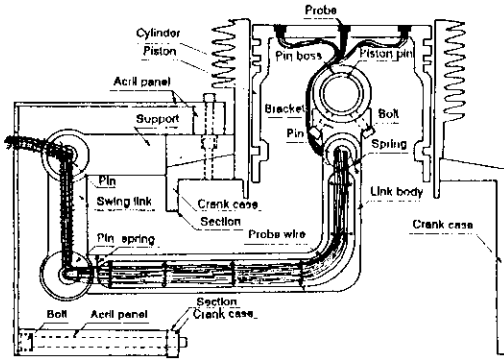


Fig. 2 Combination diagram of L-link system

고, 링크 본체가 연결 핀으로 브래킷에 결합된다. 다시 스윙 링크는 링크 본체를 크랭크 실 벽에 부착한 지지대에 결합시킨다. 링크 본체가 크랭크 실 벽에 절개되는데, 기관 운전 중 이 곳으로 윤활유가 유출되지 못하도록 링크 주위에 아크릴 판으로 덮개를 만들어 씌운다.

프로브의 도선은 기관 운전 중 진동을 일으키면 파단되게 되므로 여러 가닥을 하나로 모아 측정점에서 좀 떨어진 피스톤 곳곳에 실리곤 본드로 고정시키고, 링크 본체 홈에 삽입된 도선은 철사로 묶어 밀착되도록 한다. 또한 링크 본체 끝에 고정된 스프링은 링크 본체와 스윙 링크, 스윙 링크와 지지대를 연결하는 연결 핀 내부를 차례로 통과하고 아크릴 덮개에 난 구멍으로 빠져나와 적당한 곳에 고정시키고, 도선은 이 스프링 내부를 따라 기관 밖으로 유도된다.

프로브와 링크 기구 설치시에는 다음과 같은 사항에 주의해야 한다.

- (1) 피스톤과 프로브 사이에는 반드시 전기적인 절연이 되어야 하므로 테스터로 자주 확인한다.
- (2) 프로브 도선을 피스톤 내부에 실리곤 접착제로 고정할 때는 측정점에서 적당히 떨어진 곳에 한다.
- (3) 브래킷의 연결 핀을 통과한 도선이 커넥팅 로드와 접촉하지 않도록 연결 핀과 커넥팅 로드 측면 사이에는 공간이 있어야 한다.
- (4) 링크 본체 홈에 삽은 도선을 철사로 묶을 때 너무 세게 묶으면 눌린 부위의 도선 피

복이 벗겨지므로 알맞게 묶는다.

(5) 세 개의 연결 핀은 기관 운전 중에 빠질 수 있으므로 브래킷 연결 핀은 볼트로, 나머지는 고정쇠를 붙여 빠지지 않도록 한다.

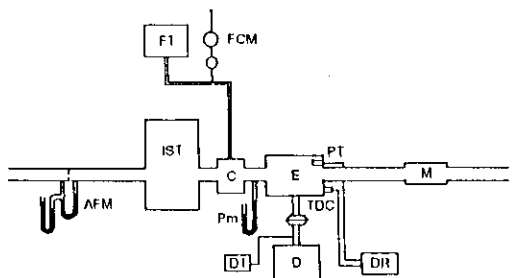
(6) 아크릴 덮개를 통과한 스프링 끝을 적당한 곳에 고정한다. 그렇게 하지 않으면 운전 중 아크릴 덮개속으로 빨려 들어가게 된다.

4. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 단기통 직립형 공랭식 가솔린 기관으로 주요 제원은 실린더 직경 90mm, 행정 길이 70mm, 행정 체적 445 cm³, 커넥팅 로드 길이 133mm이고 압축비 4.5이다.

Fig. 3은 실험 장치를 개략적으로 나타낸 것으로, 실험 기관과 직류 동력계, 흡입 계동 및 배기 계동 그리고 각 부분의 필요한 압력을 측정할 수 있도록 구성되었으며, 주변 장치로 연소 해석 장치, 데이터 기록 및 처리 장치 등이 결합된다.

그리고 연소실의 압력을 측정하기 위하여 압력 변환기(Kistler Co., 601A형)를 연소실에 삽입한다.



- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| AFM : Air flow meter | PT : Pressure transducer |
| FT : Fuel tank | TDC : TDC detector |
| FCM : Fuel consumption meter | D : DC dynamometer |
| IST : Inlet surge tank | M : Muffler |
| C : Carburetor | DR : Data recorder |
| Pm : Manifold absolute pressure | DT : Digital tachometer |
| E : Test engine | |

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

프로브에서 출력되는 전압은 밀리볼트 단위의 작은 값이므로 증폭되어야 하고, 측정시에 동반되는 고주파수의 간섭파(noise)는 데

이터를 크랭크 각 1도 마다 연속적으로 100사이클 채취하여 평균값을 취하는 평균화 작업에 커다란 장애를 주므로 제거되어야 한다. 순간 온도 측정 프로브에서 출력되는 전압은 연산 증폭기에 입력되어 데이터 기록기의 입력 전압 범위에 맞추어져 증폭됨과 동시에 간섭파가 제거되어 데이터 기록기에 입력 저장된다.

프로브에서 출력되는 전압은 cold junction unit에서 영점 보상된 후 필터와 증폭기를 거쳐 데이터 기록기에 입력된다. 이 데이터는 다시 A/D변환기에서 기관 1사이클 동안 크랭크 각 1도마다 한 개씩 총 720개가 연속적으로 100사이클 채취되어 일련의 과정을 거친 후, 그 평균값이 X-Y플로터나 프린터로 출력된다.

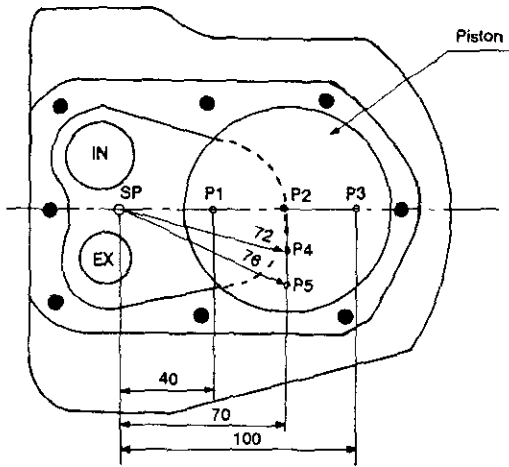


Fig. 4 Location of probes

Fig. 4는 피스톤 표면에 삽입된 다섯 개의 순간 온도 측정 프로브의 위치를 나타낸다. 프로브는 스톱스 방향으로는 스파크 플러그에서 가까운 곳부터 먼 곳으로 P1, P2와 P3가 심어지고 피스톤 핀 방향으로 P4와 P5가 심어져 있다. 피스톤 중앙에는 P2가 위치한다. 스파크 플러그로부터 프로브 P1, P2, P3까지의 거리는 각각 40, 70, 100mm이고, P4, P5까지의 거리는 각각 72, 76mm이다.

실험 조건은 동력계의 하중을 일정하게 유

지한 상태에서 스로틀 밸브의 개폐로 기관 회전속도를 1,400, 1,600, 1,800rpm으로 조정한다. 이때의 점화시기는 최적 점화 진각(MBT), 즉 1,400rpm에서는 15°bte, 1,600rpm에서는 17°bte, 1,800rpm일 때는 20°bte로 하였다. 공기 연료비는 최대 발생열을 내는 13:1로 하였다.

5. 피스톤 표면 온도 및 열유속

연소실 벽면에서 열은 벽면의 수직방향으로 흐른다고 가정하면, 일반적으로 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

여기서,

x : 내벽면의 수직 방향길이, m

α : 벽면재료의 열확산 계수, m^2/s

측정한 표면 온도와 임의 깊이의 온도를 경계조건으로 하면 다음과 같다.

$$T(0, t) = T_w(t)$$

$$T(\delta, t) = T(\delta)$$

여기서,

t : 시간, s

δ : 표면으로부터의 임의 깊이, m

T_w : 표면온도, K

이것을 연속함수로 하여 Fourier 전개하면 다음과 같다.

$$T_w(t) = T_w(0) + \sum_{n=1}^N (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

여기서,

A_n, B_n : Fourier coefficients

ω : 크랭크 축 각 속도, rad/s

N : Harmonic number

벽면의 열유동을 1차원 유동으로 가정하면 열유속($Q_w(t)$) 계산식은 다음과 같다.

$$Q_w(t) = -K_w \frac{\partial T}{\partial t}(0, t)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{K_w}{\delta} [T_w(0) - T(\delta)] \\
 &+ K_w \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{n\omega}{2\alpha}} [A_n(\cos n\omega t - \sin n\omega t) \\
 &+ B_n(\sin n\omega t + \cos n\omega t)]
 \end{aligned}$$

여기서,

K_w : 벽면재료의 열전도 계수, $W/m^2 K$

이 경우 $x = \delta$ 이며, $\delta = 3mm$ 를 취하였다.

또한 Frequency에 따라 Harmonic number를 조절해야 하는데 Harmonic number를 크게 취하면 좋겠지만 계산처리 시간이 Harmonic number의 자승으로 계산 처리 시간이 길어지므로 적당하게 취할 필요가 생기며, 본 계산 처리에 있어서는 최소 30을 취하여도 무난하였다.

Fig.5는 기관 회전 속도를 변화시킨 경우의 1번 프로브에서 계측된 피스톤 표면 온도를 크랭크 각에 따라 나타낸 것으로, 기관 회전 속도가 증가함에 따라 온도가 증가함을 보여 준다. 이는 스로틀 밸브를 열어줌에 따라 혼합기 흡입량이 증가하고, 연소실 내 가스 온도 및 속도의 증가에 의한 대류 열전달량의 증가에 기인한다.

또한 기관 회전 속도 1,800 rpm인 경우 A/D converter의 데이터 채취속도는 27 KHz로서 데이터를 크랭크각 1° 마다 데이터를 채취할 수 있으며, Fig.5에서와 같이 온도진폭

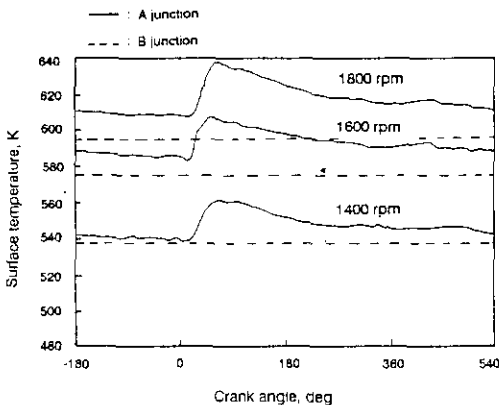


Fig.5 Effect of engine speed on surface temperature at probe 1

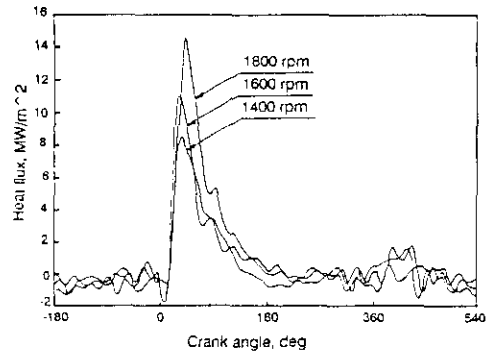


Fig.6 Effect of engine speed on heat flux at probe 1

(Temperature swing)이 나오는 것을 보아 순간 온도 측정 프로브의 응답성에는 문제가 없음을 알았다.

Fig.6은 1번 프로브의 열유속을 크랭크 각에 따라 나타낸 것이다. 열유속은 기관 회전 속도가 증가함에 따라 증가하는데, 이는 A와 B 점심의 온도 차가 증가하고, 또 A 점심의 온도진폭이 증가하기 때문이다.

Fig.7은 1,400 rpm에서 스러스트 방향으로 스파크 플러그로부터의 거리에 따른 프로브 1, 2와 3번의 표면 온도를 크랭크 각에 따라 나타낸 것이다. 스파크 플러그에서 가장 가까운 1번 프로브의 온도가 가장 높고, 가장 먼 3번 프로브의 온도가 가장 낮다. 이것은 연소가스 온도 구배에 지배되기 때문이다. Fig.8은 이 경우의 열 유속을 나타낸 것이며 스파크 플

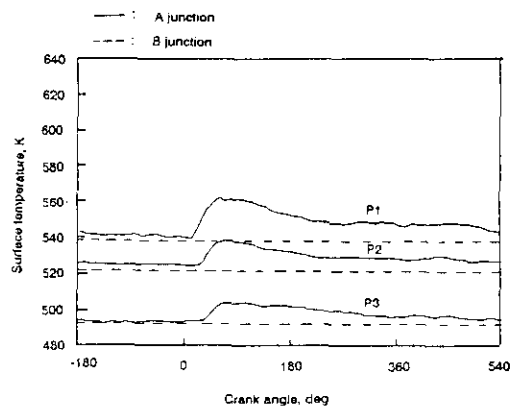


Fig.7 Effect of distance from spark plug on surface temperature at each probe of thrust axis

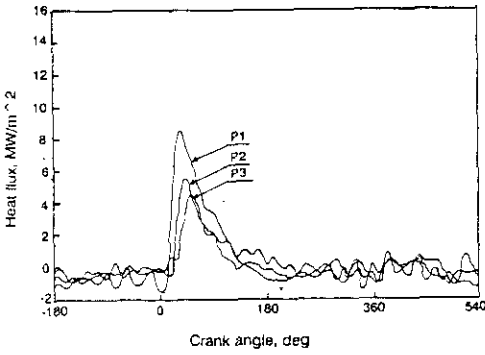


Fig. 8 Effect of distance from spark plug on heat flux at each probe of thrust axis

러그로부터 멀어짐에 따라 A와 B 접점의 온도차와 A 접점의 온도 진폭이 작아지는 영향으로 되기 때문에 스파크 플러그로부터 멀어질수록 열유속이 작아지는 것을 보여준다. 이상과 같이 피스톤 표면의 온도와 열유속은 스파크 플러그로부터 멀어질수록 감소됨을 알 수 있다.

다음에는 스파크 플러그로부터 거의 같은 거리에 있는 프로브 2, 4와 5번을 고찰한다. Fig. 9는 기관 회전 속도 1,400rpm에서의 각 프로브의 A 접점과 B 접점의 온도를 나타낸 것으로 프로브 간의 온도 차가 크지 않음을 보여준다. 그 중에서도 실린더 벽에 가장 가까운 프로브 5의 온도가 가장 낮은 것은 소염층(quench layer)의 영향 때문으로 판단된다.

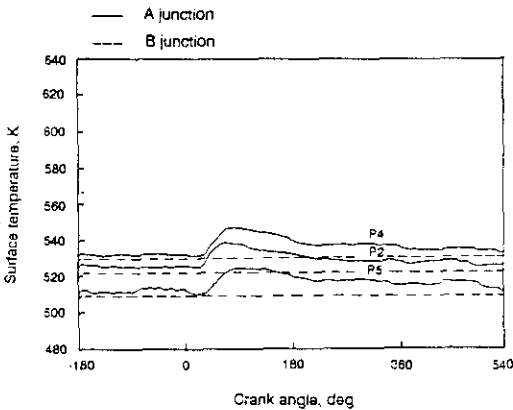


Fig. 9 Effect of distance from spark plug on surface temperature at each probe of piston pin axis

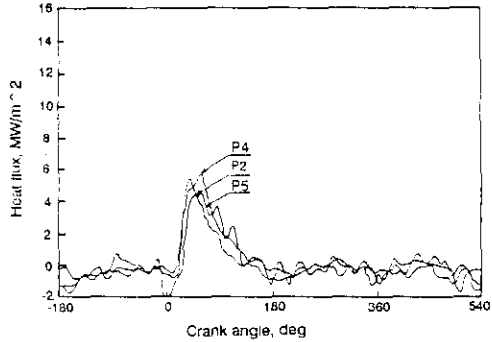


Fig. 10 Effect of distance from spark plug on heat flux at each probe of thrust axis

Fig. 10은 이 경우의 열유속의 선도로 열유속 값이 거의 같음을 보여준다.

이상의 내용으로 미루어 피스톤에서의 온도와 열유속은 스파크 플러그로부터의 거리에 따라 영향을 받는데, 거리가 멀수록 표면 온도와 임의 깊이 온도와의 차가 감소하고, 또한 온도 진폭도 감소한다. 이에 따라 열유속이 작아짐을 알 수 있다.

6. 결 론

피스톤 표면에서의 순간 온도를 측정할 수 있는 프로브와 프로브의 도선을 기관 밖으로 안전하게 인출하기 위한 L-링크를 제작하여 기관 회전 속도에 따른 순간 온도를 계속할 수 있었고, 이를 사용하여 순간 열유속을 구할 수 있었다.

이것으로부터 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 제작한 피막 두께 10 μm의 순간 온도 측정 프로브의 응답성이나 내구성은 충분함을 확인할 수 있었다. 그리고 프로브의 도선을 기관 밖으로 인출하기 위하여 제작한 L-링크의 기능과 내구성도 충분함을 확인할 수 있었다.

(2) 피스톤 표면의 사이클 당 온도 경과 및 표면으로부터 3mm 깊이의 온도를 구할 수 있었고, 이것으로부터 각 순간의 열유속을 결정할 수 있었으며, 사이클당 열유속 경과 곡선을 작성할 수 있다.

또한 피스톤 표면의 사이클당 온도 경과 곡

선으로부터 피스톤 표면 측정점의 평균 온도를 결정할 수 있었다.

(3) 기관 회전 속도를 변수로 한 경우, 기관 회전 속도 증가에 따라 피스톤 표면 온도는 증가한다. 또한 온도 진폭도 증가한다. 그리고 표면 온도와 표면으로부터 임의 깊이 온도와의 온도차도 기관 회전 속도 증가에 따라 증가한다. 따라서 기관 회전 속도 증가에 따라 온도 진폭과 표면과 임의 깊이의 온도차가 증가하므로 열유속이 증가하게 된다.

(4) 스파크 플러그로부터 거리가 멀어짐에 따라 표면 온도는 점차 감소하며, 또한 온도 진폭 및 표면과 임의 깊이와의 온도차가 감소함을 알았고, 이것은 열유속이 감소됨을 뜻하며 이것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. V.D. Overbye and J.E. Bennethum; Unsteady Heat Transfer in Engines; SAE Transaction Vol. 69, No. 461, pp. 461-494, 1961.
2. Gunter F. Hohenberg; Advanced Approaches for Heat Transfer Calculations; SAE Transaction 790825, pp. 2788-2806, 1979.
3. Yoshiteru Enomoto and Shoichi Furuham; Study on Thin Film Thermocouple Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber wall in Internal Combustion Engine; JSME No. 461, pp. 353-136, 2, 1984.
4. Shoichi Furuham and Yoshiteru Enomoto; Piston Temperature of Automobile Gasoline in Driving on the Road; Bulletin of JSME Vol. 16, No. 99, Sep., 1973.
5. 이영조; 스파크 점화 기관의 피스톤 표면 온도 및 열유속에 관한 연구, 성균관대학교 석사학위 논문, 1988.
6. A.C. Alkidas; Heat Transfer Characteristics of a Spark Ignition Engine; ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 189-193, 1980.