

〈論 文〉

층류화염전파중의 연소실 벽면으로의 열손실

이상준* · 한동호** · 김문헌*** · 이종태*** · 이성열****
(1992년 3월 9일 접수)

Heat Loss to Combustion Chamber Wall During Laminar Flame Propagation

Sangjoon Lee, Dongho Han, Munheon Kim, Jongtai Lee and Songyol Lee

Key Words : Constant Volume Combustion Chamber (정적연소기), Laminar Flame Propagation (층류화염전파), Heat Loss (열손실), Schlieren Photograph (슐리렌 사진), Instantaneous Temperature (순간 온도)

Abstract

The prediction of heat loss during laminar flame propagation was carried out by measurement of gas pressure and visualization of flame propagation in the constant volume combustion chamber. And to validate the prediction, the instantaneous temperature at wall of combustion chamber was also measured. Consequently, it was found that heat loss was increased according to increasing of maximum flame travel distance, but rate of heat loss for heat release during laminar flame propagation was nearly constant. And heat loss depends on heat transfer area which was contacted the wall by burned gas regardless to spark plug location.

1. 서 론

내연기관의 실린더내 압력은 열발생량에 의해서 증가하지만 동시에 가스로부터 벽면으로의 열손실로 인해 감소한다. 그러므로, 주어진 연료량으로부터 효과적인 일을 얻기 위해서는 실린더 벽면으로의 열손실을 최소로 하여야 한다. 이를 위해서는 먼저 화염전파중의 열손실이 어떠한 인자에 의해 좌우되는지 밝혀져야 한다. 또한 일반적으로 열발생량, 질량연소율 및 연소속도등을 통상 실린더내

가스압력으로부터 구하고 있다. 이것은 대체적으로 통상 사용하고 있는 방법이지만 엄밀하게 보면 이 가스압력은 발생열량중 가스로부터 벽면으로의 열손실이 고려되어 있지 않은 값이므로, 상기의 값들을 엄밀히 구하기 위해서는 화염전파중 벽면으로의 열손실이 고려되어야 한다.^(1~2)

그러나 내연기관내의 열손실에 관한 많은 연구^(3~9)에도 불구하고, 화염전파중의 열손실에 대한 해석은 그리 많지 않을 뿐만 아니라, 있다고 하여도 통상 가스온도 및 벽면온도의 측정에 의존하고 있으므로 추정이 용이하지 않다.^(10~11)

본 연구에서는 정적연소기를 대상으로 하여 화염전파중의 열손실을 연소실내의 압력 및 슐리렌 촬영한 화염사진에 의해 구한 발생열로부터 추정하는 방법을 제시하고, 연소실 벽면의 순간온도를 직접

*정회원, 성균관대학교 대학원
**정회원, 현대자동차
***정회원, 숭실대학교 기계공학과
****정회원, 성균관대학교 기계공학과

측정함으로써 상기방법에 의한 열손실 추정법의 타당성을 입증하였다. 그리고 이 열손실과 기연가스가 연소실 벽면에 접하는 열전달면적과의 관계를 해석하므로써, 추후 열손실을 고려한 연소실 형상 설계에 있어서의 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 화염전파중의 열손실 추정방법

화염전파중의 열손실 Q_L 은 연소된 연료의 발생열량과 압력상승에 이용된 열량과의 차이로서 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$Q_L = Q^* - Q_P \quad (1)$$

여기서 Q^* : 연소된 연료의 발생열량

Q_P : 압력상승에 이용된 열량

식(1)에서 압력상승에 이용된 열량 Q_P 는 저압선도로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$Q_P = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dQ}{dt} dt \quad (2)$$

여기서 dQ 는 정적 연소이므로 $dQ = \{V_0 / (k - 1)\} \cdot dP$ 로 표시된다. V_0 는 정적연소기의 체적, k 는 비열비, P 는 연소실내의 압력이다.

그리고 연소된 연료의 발생열량 Q^* 는

$$Q^* = \eta_c \cdot m_{fb} \cdot h_u^* \quad (3)$$

여기서 η_c : 연소 효율

m_{fb} : 연소된 연료의 질량,

h_u^* : 열해리를 고려한 발열량

로 표시되므로, 임의 시각에 있어서의 연소된 연료의 질량 m_{fb} 를 구하면 임의 시각에 있어서의 Q^* 를 결정할 수 있다.

식(3)에서 연소된 연료의 질량을 구하기 위한 가정은 다음과 같다. (a) 연소실내의 압력과 조성은 균일하다. (b) 미연가스 및 기연가스는 얇은 화염면에 의해 구분된다. (c) 미연가스는 폴리트로픽 압축된다.

이 경우, m_{fb} 는 다음과 같이 표시된다.

$$m_{fb} = \left[m - \left\{ \rho_0 \left[\frac{P}{P_0} \right]^{1/n} (V_0 - V_b) \right\} \right] \times \left(\frac{1}{\gamma_{ar} + 1} \right) \quad (4)$$

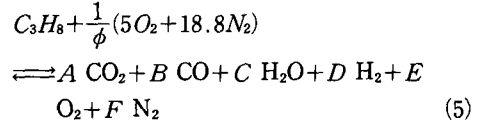
여기서 m : 혼합기의 전질량

V_b : 기연가스의 체적

ρ_0 : 초기상태의 혼합기 밀도

γ_{ar} : 공기-연료비

그리고, 열해리를 고려한 발열량 h_u^* 는 다음과 같은 반응식으로 부터 계산할 수 있다.



여기서 ϕ 는 연료공기당량비 (fuel/air equivalence ratio)이다.

따라서 연소실 벽면의 열손실은 식(2)와 식(3)으로부터 압력상승에 이용된 열량 Q_P 와 연소된 연료의 발생열량 Q^* 를 구하여 식(1)로부터 추정할 수 있다. 비열비 k 는 열해리를 고려하여 구한 연소생성물의 정압비열 C_p 와 정적비열 C_v 로부터 구한다. 식(4)에 있어서의 기연가스체적 및 폴리트로픽지수 n 은 숄리렌 화염사진으로부터 구한다.

3. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 정적연소기의 개략도이다. 연소기는 기관의 연소실 체적을 고려하여 지름 80 mm, 높이 22 mm의 원통형으로 하였으며, 재질은 S45C이다. 또한 화염전파를 숄리렌 촬영하기 위해 연소실의 양쪽면에 두께 19 mm의 경화유리를 설치하였다. 정적연소기의 외측에는 스파크플러그, 흡기 및 배기밸브와 압력변환기가 설치되어 있다. 흡기 및 배기밸브의 제작에 있어서 밸브 끝 부분의 공간이 연소실에 노출되면 연소실내 예혼합기가 그 공간에도 충전되므로 밸브 니들 선단이 밸브 끝에 위치하도록 유의하였다. 스파크플러그는 통상의 자동차용 점화플러그의 중심선주 끝에 지름 2 mm의 황동선을 길게 연장하여, 연소실내에 스파크플러그가 소정의 점화위치를 잡도록 하였다. 스파크플러그의 전극간극은 0.8 mm, 전극선단의 방전면은 평면으로 하였다. 연소실벽 초기온도를 일정하게 유지하기 위하여 판히터 (200W×2개)를 연소기 외측벽에 설치하였다. 이때 연소실내의 초기온도는 연소실 내벽면으로부터 3 mm 떨어진 위치에 열전대를 삽입하여 확인하고, 자동온도조절장치를 이용하여 연소실벽의 초기온도를 일정하게 유지시켰다.

Fig. 2는 실험장치의 전체적인 구성도이다. 실험장치는 정적연소기, 숄리렌장치, 예혼합기 제조장치, 점화장치, 순간온도 측정장치, 데이터 측정장

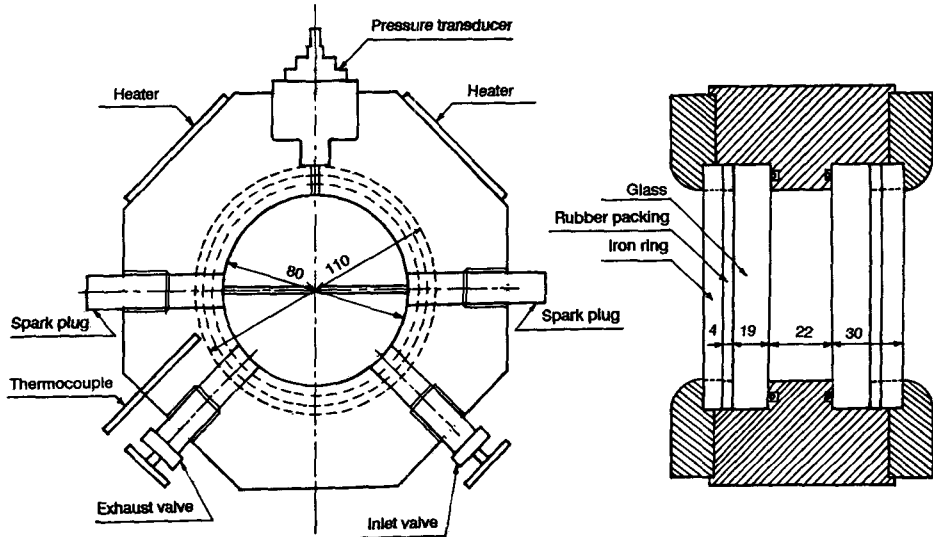


Fig. 1 Schematic drawing of constant volume combustion chamber

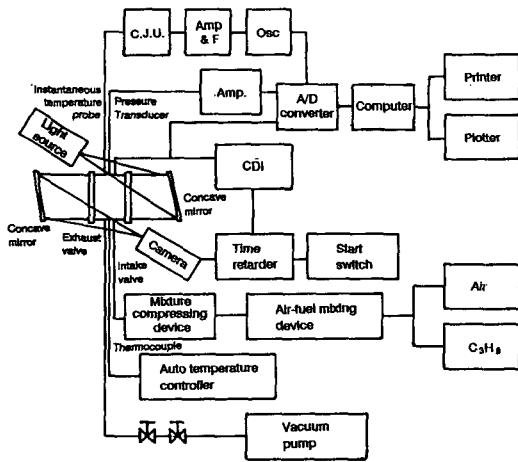


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

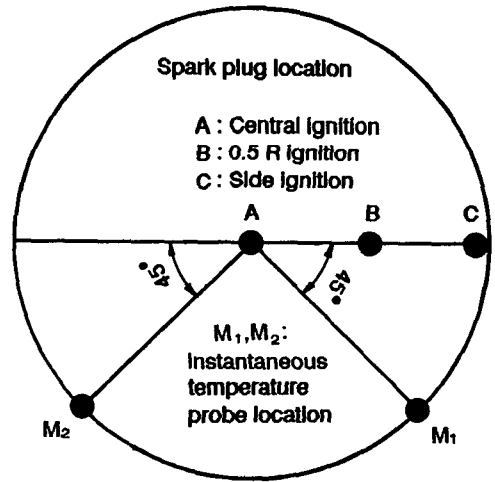


Fig. 3 Spark plug and instantaneous temperature probe location at constant volume combustion chamber

치 및 해석장치로 구성된다. 정적연소기는 전술한 바와 같다. 연료-공기 예혼합기는 체적법에 의해 만들며, 혼합된 예혼합기는 에어실린더를 개조하여 제작한 혼합기 압축장치를 사용하여 임의의 요구압력으로 압축한다. 연소실내의 압력은 압력변환기 (piezo type)로 측정하며, 측정된 압력은 증폭기 (charge amp.)와 A/D 변환기 (12bit, sampling speed 100 KHz)를 통하여 컴퓨터에 입력시킨 후 해석하였다. 연소실내의 연소된 가스를 배출하기 위하여 진공펌프를 설치하였다. 그리고 점화장치는 용량방전 점화장치 (capacitor discharge ignitor)를

사용하였다.

실험변수는 기연가스가 연소실 벽면에 접하는 면적을 변화시키기 위하여 점화위치로 하였다. 점화 위치는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 중심, 반지름의 1/2, 벽면으로부터 2 mm 떨어진 위치의 3지점으로, 이후 이들을 각각 중심점화 (central ignition), 0.5R점화 (0.5R ignition), 벽면점화 (side ignition)로 칭한다.

혼합기는 연료공기당량비 $\phi=1.1$ 인 프로판-공

기 예혼합기를 사용하였고, 연소실의 초기압력은 0.5 bar, 초기온도는 313 K로 고정하였다. 카메라의 셔터속도는 1/2000초, 필름은 Kodak TX-400 흑백필름을 사용하였다.

● 화염의 촬영 방법

화염전파의 가시화에는 솔리렌법을 이용하였다. 솔리렌 장치는 150 W의 크세논(xenon) 광원과 지름 300 mm의 모목거울로 구성된다.

화염전파의 촬영에는 통상의 일반 카메라를 사용하였다. 일반 카메라로는 화염전파 중에 어느 한 순간의 연소상태만을 촬영할 수 있다 그래서 전 연소기간을 모두 촬영하려면 시간을 지연시켜 동일방법으로 반복 실험을 한 후, 시간에 대하여 화염사진을 나열하면 전 화염전파를 촬영할 수 있는 효과가 얻어진다. 여기서 시간의 제어는 자체 제작한 Time controller로 하였다. 스파크 신호 후 설정된 시간후에 카메라가 작동되도록 하였으며, 카메라가 작동되는 시기는 카메라의 플래시 신호로 확인하였다. 이러한 방법으로 화염전파를 촬영하려면 매 실험마다의 재현성이 요구되며, 이 재현성은 연소실험을 하여 다수 측정된 연소실내 가스압력으로 부터 구한 압력표준편차율 $P_v(t)$ 로 확인하였다.

$$P_v(t) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{P(t, i) - \bar{P}(t)\}^2 \right]^{1/2} / \bar{P}(t) \quad (6)$$

여기서 $P(t, i)$ 는 i 번째의 임의시각 t 에서의 압력이며, $\bar{P}(t)$ 는 임의시각 t 에서의 앙상블 평균 압력으로써 $\bar{P}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P(t, i)$ 이다.

Fig. 4는 그 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 압력표준편차율은 시간의 경과에 따라서 약간 변동하나, $P_v(t)$ 의 최대치는 약 3% 정도이므로, 각 실험마다의 재현성에는 문제가 없는 것으로 판단하였다.

● 연소실 벽면 순간온도 측정

전술한 방법에 의한 열손실 추정법의 타당성을 실험적으로 입증하고자, 연소실 벽면에 순간온도 프로브를 삽입하여 순간온도를 측정하였다.

Fig. 5는 순간온도 프로브의 구조를 나타낸다. (12~13) 접점 A는 순간온도를 측정하기 위하여 이온 스퍼터링 증착기를 사용하여 전도성이 뛰어난 금(Au)을 400 Å의 두께로 표면에 증착시켜 전도성 피막을 입힌뒤, 무전해 화학 니켈 도금법으로 10 μm의 니켈 박막을 입혀 박막형으로 제작하였다.

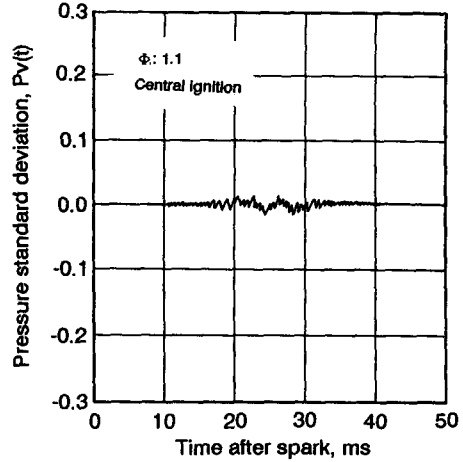


Fig. 4 Pressure standard deviation as a function of time after spark at central ignition

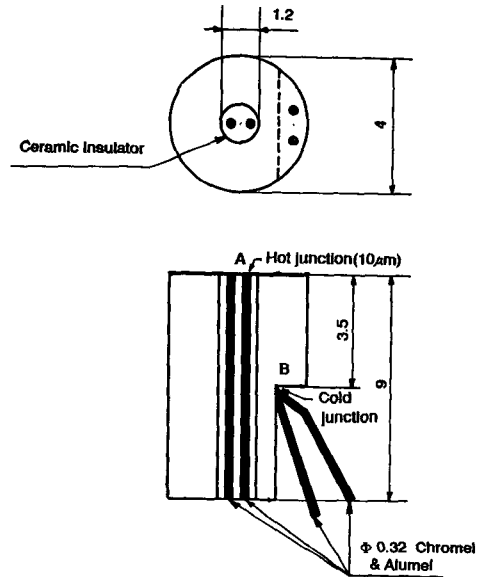


Fig. 5 Details of instantaneous temperature probe

접점 B는 열유속을 구하기 위하여 표면에서 3.5 mm 떨어진 지점에 점용접 (spot welding) 방법으로 접점을 구성하였다. 이 방법으로 제작한 순간온도 프로브를 Fig. 3과 같은 측정위치에 2개 삽입하였다.

4. 연소실 벽면으로의 열손실

4.1 화염의 솔리렌 촬영 결과

Fig. 6은 각각의 점화위치에 있어서 솔리렌 촬영

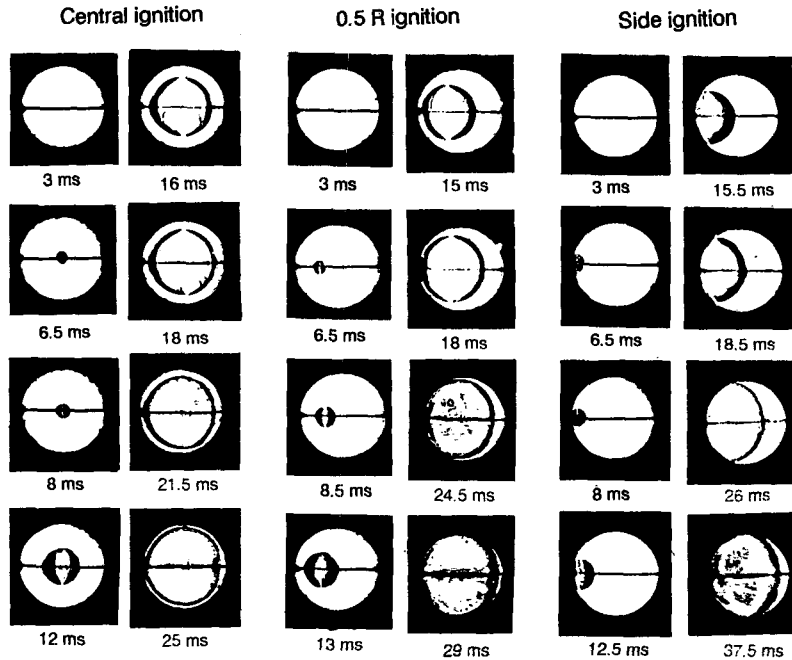


Fig. 6 Schlieren photographs of laminar flame propagation at each spark position

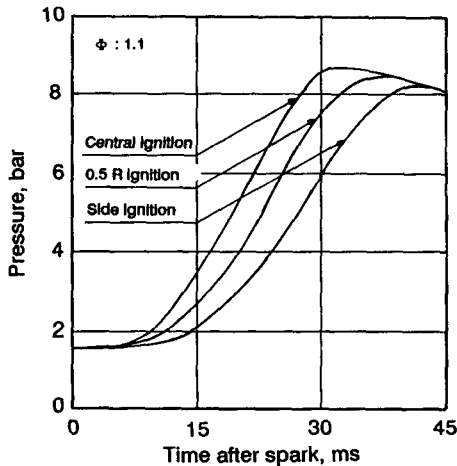


Fig. 7 Pressure as a function of time after spark at each spark plug location

한 화염사진을 시간의 경과에 대하여 나열한 것이다. 이 경우 연료공기당량비, 초기온도 및 초기압력은 모두 동일하다.

화염사진은 전술한 바와 같이 일반 카메라에 의해 촬영한 것인데 고속카메라의 경우와 같은 효과를 나타내고 있으며, 이것으로 보아 정적연소기의 경우 실험의 높은 재현성에 의해서 일반 카메라를

사용하여도 화염전파의 촬영이 가능한 것을 알 수 있다.

또한 화염이 전파하는 형상을 각 점화위치에 대해서 비교하여 보면, 먼저 중심점화의 경우는 점화 후 초기에는 화염이 구형화염에 가까운 형상으로 전파하다가 연소의 중반 이후부터 연소기의 형상에 따라 화염이 벽면에 접하는 형상으로 전파된다. 0.5R 점화의 경우는 초기에 있어서는 중심점화의 경우와 마찬가지로의 경향이지만 화염이 벽면에 접하는 시기가 중심점화의 경우보다 빠르다. 벽면점화의 경우는 화염이 초기부터 벽면에 닿은 상태로 전파된다.

Fig. 7은 점화위치를 변화시킨 경우의 연소실내 압력을 나타낸 것이다. 점화위치가 중심점화로부터 벽면점화로 갈수록 연소실내의 최고압력은 감소한다. 이것은 화염전파거리의 증가에 따른 연소기간의 증가로 인해 벽면으로의 열손실이 현저히 증가하기 때문이다.

그리고 화염사진과 압력경과곡선의 결과로부터, 최대 화염도달거리에 화염이 도달하는 시기는 중심점화의 경우 21 ms, 0.5R점화의 경우 23 ms, 벽면점화의 경우 34 ms이며, 이것은 최고압력이 나타나는 시기의 약 80% 정도인 것을 알 수 있었다.

4.2 연소실 벽면으로의 열손실

전술한 방법으로 화염전파 중 연소실 벽면으로의 열손실 Q_L 을 구하기 위해서는 식(4)에 있는 기연가스의 체적 V_0 와 폴리트로픽 지수 n 을 결정해야 한다. V_0 는 화염사진으로부터 구하였다. n 은 화염전파 중 미연혼합기가 화염면에 의해 폴리트로픽 압축되는 것으로 가정하였으므로 연소실내의 압력과 화염사진에서 구한 미연가스체적으로 부터 결정하였다.

이와같이 구한 폴리트로픽 지수를 각각의 점화위치에 대하여 나타낸 것이 Fig. 8이다. n 은 연소가 진행됨에 따라 약간 감소하는 경향이며, 점화위치가 중심점화로부터 벽면점화로 갈수록 전반적으로

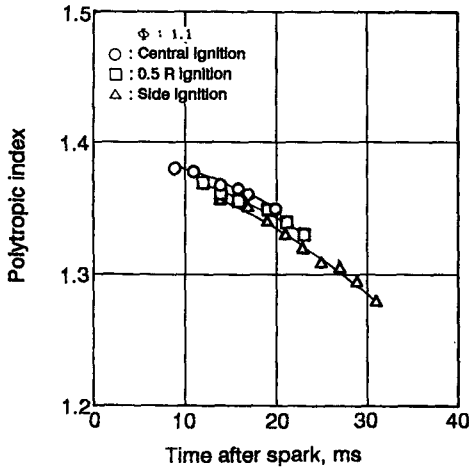


Fig. 8 Polytropic index as a function of time after spark at each spark position

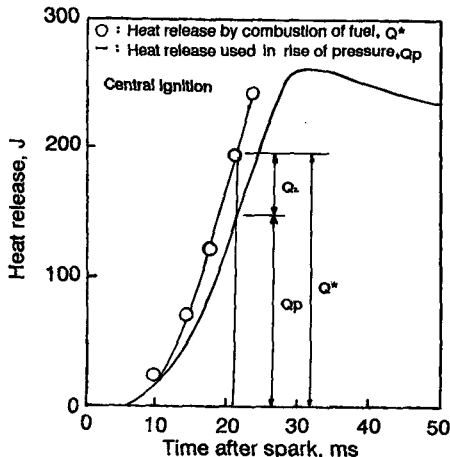


Fig. 9 Heat release as a function of time after spark at central ignition

작은 값을 나타낸다. 중심점화의 경우의 n 이 벽면 점화의 경우보다 크다는 것은 중심점화의 경우가 열손실이 적다는 것을 의미한다. 각 점화 위치에서의 n 은 약 1.28~1.38 정도가 얻어졌다.

Fig. 9는 중심점화에 있어서 연소된 연료의 발생 열량 Q^* 및 압력상승에 이용된 열량 Q_p 를 시간의 경과에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 Q^* 및 Q_p 의 차이가 열손실 Q_L 에 해당된다. Q_L 은 점화후 약 10 ms 이전까지는 미소한 값을 나타낸다. 이 시기는 화염전파의 촬영 결과로부터 화염이 벽면에 도달하는 시기로 판명되었으므로, 열손실은 화염이 벽면에 닿기 시작할때부터 현저히 증가함을 알 수 있었다.

점화위치를 변화시킨 경우, 열손실 Q_L 을 시간의 경과에 대해서 나타낸 것이 Fig. 10이다. 열손실은 기연가스가 벽면에 도달하는 시점으로부터 현저히 증가되므로 열손실이 나타나는 시점은 벽면점화, 0.5R점화, 중심점화 순이지만, 화염전파가 진행됨에 따라 열손실의 크기는 점화후 약 20 ms 부근에서 중심점화, 0.5R점화, 벽면점화의 순으로 역전된다. 이와 같이 역전되는 경향은 중심점화의 경우 화염이 사방으로 균일하게 전파되므로 벽면에 접하는 기연가스의 열전달면적이 벽면점화에 비하여 급격히 증가하는 데 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 발생열량 Q^* 중 열손실 Q_L 이 어느 정도 차지하는가를 파악하기 위하여 각 점화위치에 있어서 Q^* 에 대한 Q_L 의 크기를 나타낸 것이다. 각 점화위치에서 Q^* 에 대한 Q_L 의 크기는 연소초기 부분을 제외하고는 거의 선형적으로 증가하는 경향이다. Q^* 에 대한 Q_L 의 비율은 중심점화로부터 벽면점화로 갈수록 증가하며, 그 값은 중심점화의 경우 약 10%, 0.5 R점화가 약 13%, 벽면점화가 약 17%이다.

이와 같은 열손실 Q_L 에 의해 압력상승으로 이루어지지 못한 압력 P_L 이 연소실내의 압력 P 에 대해 몇 %인가를 각 점화위치에 대해 나타낸 것이 Fig. 12이다. P_L/P 은 점화 위치가 중심점화에서 벽면점화로 갈수록 크지만, 연소 경과에 따라 대체로 일정한 값을 나타낸다. 이 값은 중심점화의 경우 약 11%, 0.5 R점화인 경우 약 15%, 벽면점화인 경우 약 19%이다.

4.3 열손실 추정에 대한 평가

상기와 같이 식(1)에 의해 결정된 열손실 Q_L 의

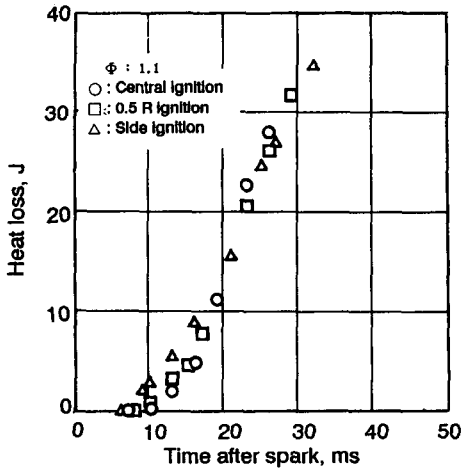


Fig. 10 Heat loss as a function of time after spark at each spark position

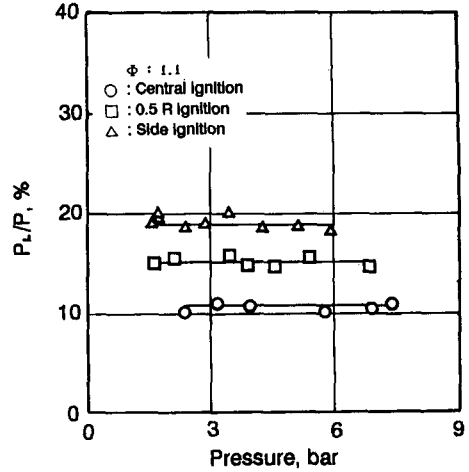


Fig. 12 P_L/P as a function of pressure at each spark position

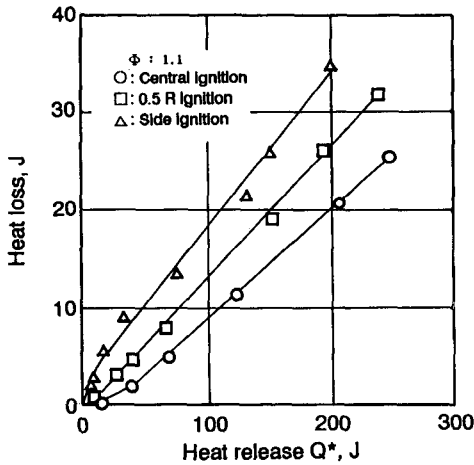


Fig. 11 Heat loss as a function of heat release at each spark position

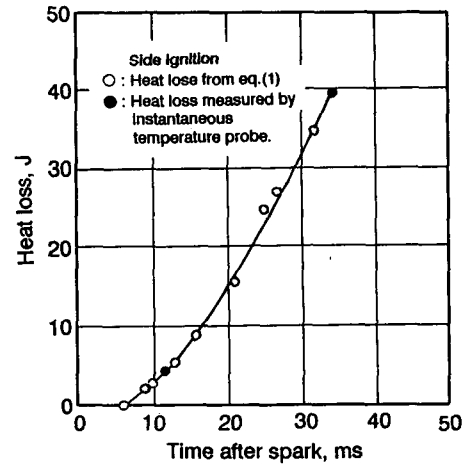


Fig. 13 Heat loss from eq. (1) and measured by instantaneous temperature probe as a function of time after spark at side ignition

타당성을 평가하기 위하여 연소실 벽면에 순간온도 프로브를 삽입하여 실측한 열손실 Q_L^* 와 비교한 것이 Fig. 13이다. Q_L^* 는 1차원 열전달에 관한 Fourier 미분방정식을 기초로 다음과 같은 식으로부터 구하였다. 연소실 벽면에서 열은 벽면의 수직 방향으로만 흐른다고 가정하면 일반적으로 열전도 방정식은 다음과 같이 된다.⁽¹²⁾

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (7)$$

여기서 x 는 내벽면의 수직방향 길이(m), α 는 벽면재질의 열확산 계수(m^2/s)이다. 상식에 측정

된 표면온도와 임의 깊이의 온도를 경계조건으로 하고, 주기함수를 이용하면 거리 x 와 시간 t 에 대한 벽면의 순간온도 $T_w(x, t)$ 는 다음과 같은 연속함수로 나타낼 수 있다.

$$T_w(x, t) = T_w(0) - [T_w(0) - T(\delta)] \frac{x}{\delta} + \sum_{n=1}^N \exp[An \cos(n\omega t - Fx)] + B_n \sin(n\omega t - Fx) \quad (8)$$

여기서

ω : 크랭크 축의 각속도, rad/s

N : Harmonic number

$$T_w(0) = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} T_w(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{2\tau} T_w(t) \cos n\omega t dt$$

$$B_n = \frac{2}{\tau} \int_0^{2\tau} T_w(t) \sin n\omega t dt$$

$$F = \sqrt{\frac{n\omega}{2\alpha}}$$

따라서 상기식으로부터 열유속 $Q_L^*(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} Q_L^*(t) &= -K_w \frac{\partial T}{\partial x}(0, t) \\ &= \frac{K_w}{\delta} [T_w(0) - T(\delta)] \\ &\quad + K_w \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{n\omega}{2\alpha}} \\ &\quad [A_n (\cos n\omega t - \sin n\omega t) \\ &\quad + B_n (\sin n\omega t + \cos n\omega t)] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 K_w 는 벽면 재료의 열전도계수 (W/m^2K)이며, 이 경우 $x = \delta$ 이다.

δ 는 표면으로부터 B junction까지의 깊이로서 $\delta \approx 3.5\text{mm}$ 이다. 또한 상기식으로부터 열손실을 구하는데 있어서 Harmonic number N 은 30으로 취하였다.⁽¹³⁾ 이때 연소기의 벽면이 경화유리와 S45C로 이루어져 있으므로 각각에 해당하는 열전도계수를 고려하여 계산하였다. 또한 식(9)로부터 구한 값은 Fig. 3의 측정점 M_1 과 M_2 에서의 단위면적당의 깊이므로, 화염이 벽면에 접하는 면적은 화염사진으로부터 구하여 열손실을 결정하였다.

그림에서 보는 바와 같이 Q_L^* 와 Q_L 은 잘 일치하고 있으며, 이것은 전술한 방법에 따른 식(1)로 구하는 열손실 Q_L 의 타당성을 입증하고 있다.

5. 열손실과 열전달면적과의 관계

가스로부터 벽면으로의 열손실은 Fig. 9에서 설명한 바와 같이 화염이 벽면에 접하는 시기부터 급격히 증가하므로, 열손실은 기연가스가 벽면에 접하는 면적에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 그러나 열손실 Q_L 과 벽면에 접하는 기연가스의 열전달면적과의 관계를 해석하기 위해서는 열손실 Q_L 이 대류 열전달에 의한 열손실 Q_{Lc} 과 복사열전달에 의한 열손실 Q_{Lr} 로 나누어지므로, 우선 Q_L 중 Q_{Lr} 이 어느 정도인가를 밝혀야 한다. 이를 파악하기 위해서

순간온도 프로브를 Fig. 3의 연소실 벽면 M_1, M_2 지점에 삽입하여 표면과 3.5 mm 깊이의 순간온도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 14에 나타낸다. 이때 접화위치는 벽면점화의 경우이다.

3.5 mm 깊이의 순간온도는 측정위치 및 시간의 경과에 상관없이 동일하다. 그러나 표면에서의 순간온도는 측정위치에 따라 급격히 상승되는 시기가 다르며, 이 시기를 화염사진으로부터 파악해 보면, 화염이 순간온도 프로브에 닿는 시기와 일치함을 알 수 있었다. 따라서 급격한 온도상승이 일어나기 전까지는 복사에 의한 온도상승 즉 복사 열전달에

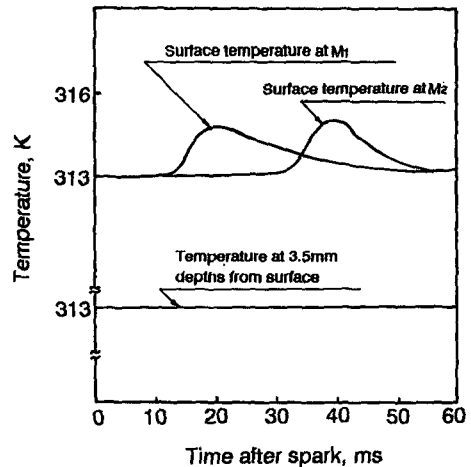


Fig. 14 Temperatures at surface and 3.5mm depths from surface as a function of time after spark

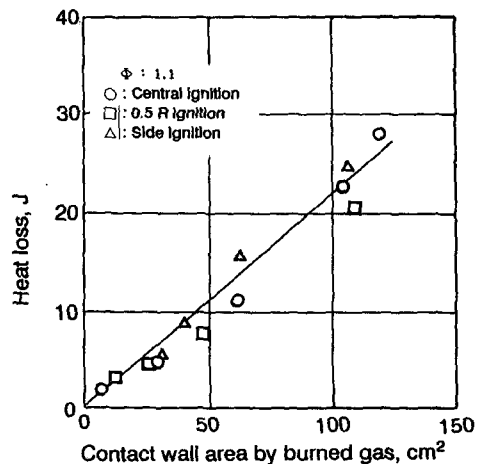


Fig. 15 Heat loss as a function of contact wall area by burned gas at each spark position

의한 영향으로 볼 수 있으며, 급격한 온도상승이 일어나기 시작하는 시기부터는 기연가스로부터 벽면으로의 대류에 의한 온도상승, 즉 대류열전달에 의한 영향으로 볼 수 있다. 상기 결과로부터 복사열전달 Q_{Lr} 은 열손실 Q_L 에 대해 최대 7% 정도임이 밝혀졌다. 이것은 복사열전달에 의한 열손실이 대류열전달에 의한 열손실에 비하여 작다는 것을 의미한다. 그러므로 벽면으로의 열손실 Q_L 은 대류열전달에 의한 열손실이 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 15는 기연가스가 연소실 벽면에 접하는 면적과 열손실의 관계를 각 점화위치에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 열손실은 점화위치에 따라서 약간의 차이는 있으나 대체적으로 점화위치에 관계없이 열전달 면적에 비례하여 증가하는 것으로 볼 수 있다.

열손실은 열전달계수, 열전달면적 및 기연가스와 벽면의 온도차와 같은 인자의 복합적인 영향에 의해 좌우되지만, 열손실이 열전달면적에 비례한다는 것은 기연가스가 벽면에 접하는 열전달면적 A_w 가 화염전파중의 열손실 Q_L 을 지배하는 주요인자라는 것을 나타내는 것이다.

이 경향은 점화위치에 상관없이 기연가스가 벽면에 접하는 단위 열전달 면적당의 열손실이 일정하다는 것을 의미하며, Q_L 과 A_w 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{Q_L}{A_w} \approx 0.21 [J/cm^2] \quad (10)$$

상기 결과는 추후 내연기관의 연소 시뮬레이션에 있어서 기연가스가 벽면에 접하는 면적을 파악함으로써 구하기 힘든 열손실을 대략적으로 추정할 수 있는 수단이 된다. 또한 열손실을 감소시키기 위한 최적연소실형상은 기연가스가 벽면에 닿는 열전달 면적을 최소로 하는 형상이 바람직한 것을 의미하는 것이다.

6. 결론

연소실내의 압력과 화염의 슬리렌 촬영 결과로부터 층류화염전파중 벽면으로의 열손실을 추정하고, 실험에 의해 타당성을 입증함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

열손실은 최대 화염도달거리가 증가함에 따라 증가하나, 연소된 연료의 발생열량에 대한 열손실의

비는 화염이 전파되는 동안 거의 일정하며, 그 값은 중심점화의 경우 약 10%, 0.5 R점화의 경우 약 13%, 벽면점화의 경우 약 17% 정도이다. 그리고 이 열손실로 인한 연소실내 압력의 감소는 중심점화의 경우 약 11%, 0.5 R점화의 경우 약 15%, 벽면점화의 경우 약 19% 정도이다.

또한 열손실 Q_L 은 대류열전달에 의한 열손실이 지배적이고, 점화위치에 상관없이 기연가스가 벽면에 접하는 열전달면적 A_w 에 비례함이 밝혀졌으며, 그 관계는 $(Q_L/A_w) \approx 0.21 [J/cm^2]$ 임을 알 수 있었다. 따라서 내연기관 실린더 벽면으로의 열손실을 감소시키기 위한 최적연소실형상은 화염이 벽면에 닿는 열전달면적을 최소로 하는 형상이 바람직한 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 長尾不二夫, 1977, “內燃機關,” 大光書林, pp. 54~73.
- (2) Heywood, J.B. 1988, “Internal Combustion Engine Fundamentals,” McGraw-Hill Book Co., pp. 371~390.
- (3) Overbye, V.D. and Bennethum, J.E., 1961, “Unsteady Heat Transfer in Engines,” SAE Transaction, Vol. 69, No. 461, pp. 461~494.
- (4) Annand, W.J.D. 1963, “Heat Transfer in the Cylinders of Reciprocating Internal Combustion Engines,” Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Vol. 177, No. 36, pp. 973~990.
- (5) Woschni, G., 1967, “A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine,” SAE 670931, pp. 3065~3083.
- (6) Alkidas, A.C., 1980, “Heat Transfer Characteristics of a Spark Ignition Engine,” ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 102, pp. 189~193.
- (7) 田坂英紀, 御子神隆, 松岡信, 1984, “副室付き定容容器内の豫混合氣燃焼の熱損失と熱發生,” 日本機械學會論文集, 50卷 454號, pp. 1617~1621.
- (8) 吉田正武, 芦刈眞也, 五味努, 1985, “四サイクルガソリン機關の冷却損失に關する研究,” 日本機械學會論文集, 52卷 480號, pp. 3091~3097.
- (9) 一色尙次, 四脇信彦, 上條健, 1972, “密閉用器内の燃焼による熱傳達,” 日本機械學會論文集, 39

- 卷 328號, pp. 3760~3770.
- (10) Enomoto Y. and Furuhashi, S. 1984, "Study on Thin Film Thermocouple Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber Wall in Internal Combustion Engine," JSME No. 453, pp. 1353~1362.
- (11) 古浜 隆一, 水上 浩, 1984, "四サイクルガソリン機關の燃焼室壁への直接熱損失," 日本機械學會論文集(B編), 50卷 456號, pp. 1972~1980.
- (12) 古浜 隆一, 1984, "内燃機關の燃焼室表面瞬間溫度測定用熱電對に關する研究," 日本機械學會論文集, 50卷 453號, pp. 1353~1362.
- (13) 이상준, 김찬주, 송영식, 이종태, 이성열, 1991, "선박용 디젤 기관의 연소실 벽면에서의 비정상 열유동에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집(Ⅱ), pp. 245~248.
- (14) 송영식, 이성열, 1990, "스파크 점화기관의 연소가스 열전달계수의 비교 검토," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 61~64.