

정적 연소기에서 순간온도 프로브의 돌출높이에 따른 열유속에 관한 연구

이 치 우
마산대학 기계자동차공학부

A Study of Heat Flux on the Height of an Instantaneous Temperature Probe in a Constant Volume Combustion Chamber

C. W. Lee

Division of Mechanical and Automotive Engineering, Masan College, Kyungnam 630-729, Korea

Abstract In the production of internal combustion engines, there have been trends to develop the high performance engines with improved fuel efficiency, lighter weights and smaller sizes. This trends help to answer problems related to thermal load and abnormal combustion, etc. in these engines. In order to investigate these problems, a thin film-type probe and its manufacturing method for instantaneously measuring surface-temperatures have been proposed in this study. Instantaneous surface temperature of a constant volume combustion chamber was measured by this probe and heat flux was obtained by Fourier analysis. In order to thoroughly understand the characteristics of combustion, the authors measured the wall temperature of the combustion chamber and computed heat flux through a cylinder wall while varying the protrusion height of the probe have been measured. To achieve the above goals, a instantaneous temperature probe was developed, thereby making possible the analysis of the instantaneous temperature of wall surface and the detection of unsteady heat flux in the constant volume combustion chamber.

(Received May 21, 2003)

Key words: Instantaneous temperature probe, Constant volume combustion chamber, Gold thin-film

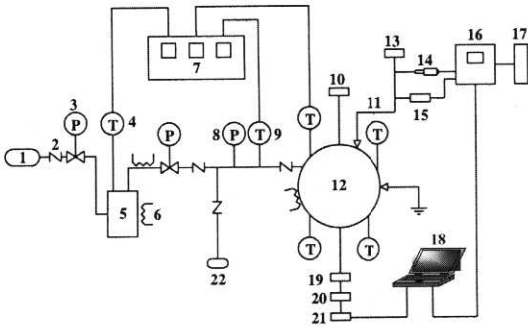
1. 서 론

열처리 과정에서 공급열량의 증가에 따라 열부하도 같이 증가하므로 고온에 노출되는 구성품들에 대해서는 열적 거동을 반영하여 설계하여야 한다. 그러므로 가열로에서의 순간온도를 측정하기 위해서는 우선적으로 고응답성의 순간온도 프로브(instantaneous temperature probe)[1]를 제작하여야 한다. 연소가스 변화에 의해 비정상적으로 변화하는 순간온도를 취득하여 순간열유속으로 변환함으로써 가열로의 벽면과 열처리 재료에 대해서 열부하를 규명하고자 한다.

연소가스로부터 열부하 상태를 명확하게 밝히는 것은 열처리에 의한 품질 및 열효율 향상에 대한 가능성을 제시할 수 있으며, 고온에 노출되는 구성품의 열적 강도를 반영한 최적의 설계를 위해 연소가스로부터 연소가스 및 연소실 각부의 열전도율을 정확하게 측정할 수 없으므로 수열측인 연소실 벽면에 제작한 순간온도

프로브를 삽입하여 측정한 순간온도로부터 내부의 열부하 상태를 확인할 수 있다. 그리고 순간온도 프로브는 기본적으로 열접점부 박막에 접촉하는 순간온도를 측정하려는 목적이다. 열적 물성치가 다른 또는 이종금속에 대한 영향을 고려해야 한다. 그러므로 순간온도 프로브의 모재, 박막의 두께를 고려한 검증이 필요하다. 또한, 검증된 순간온도 프로브는 다양한 혼합비 및 여러 조건에서 순간온도에 대한 신뢰성 및 정확성과 내구성도 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 정적연소기(Constant volume combustion chamber)내에서 순간온도 프로브의 측정 위치 및 돌출높이의 조건에서 혼합기를 연소시킬 때의 경과 시간에 따라 연소실 내벽면의 순간온도를 측정하였다. 이 결과를 이용하여 제 조건에 따른 벽면에서의 최고순간온도, 화염의 이동특성에 따른 순간온도의 분포 및 비정상 순간열유속을 산출하고, 가열로 벽면으로 유출되는 손실 총열량으로서 연소실과의 관계를 연구하



- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. Air compressor | 2. Check valve |
| 3. Pressure gauge | 4. Thermo-couple |
| 5. Surge tank | 6. Heater |
| 7. Temperature controller | 8. Pressure gauge |
| 9. Air inlet / exhaust | 10. Turbulence generator |
| 11. Ignition plug | 12. Combustion chamber |
| 13. Ignition device | 14. High voltage probe |
| 15. High current probe | 16. Oscilloscope |
| 17. X - Y plotter | 18. Computer |
| 19. Pressure transducer | 20. Amplifier |
| 21. A / D converter | 22. Vacuum pump |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치 및 실험조건

본 실험장치[2]는 정적연소기, 점화장치, 공기 공급장치, 연소실 벽면온도 측정장치, 각종 제어 및 계측장치로 구성되어 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 연료가 산화하는 연소과정에서 순간온도를 측정하는 과정은 매우 복잡한 현상들을 수반하기 때문에 65×60 mm, 연소체적 199.1 cc의 정적연소기[3]를 사용하여 실험하였다. 사용연료는 가솔린이며, 연소시 발생하는 순간온도와 순간압력은 250 kHz A/D변환 장치로서 데이터를 취득하였다.

Fig. 2는 압력계, 순간온도 프로브 등을 장착한 정적 연소기이다. 이 때 순간온도 프로브는 압력계를 기준으로 67°, 157°, 247°, 337°의 방사형으로 설치하였다[4].

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브이다.

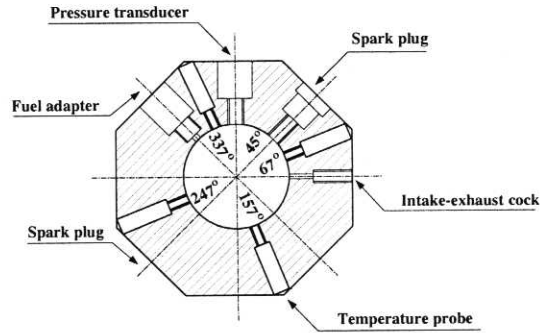


Fig. 2. Schematic diagram of constant volume combustion chamber.

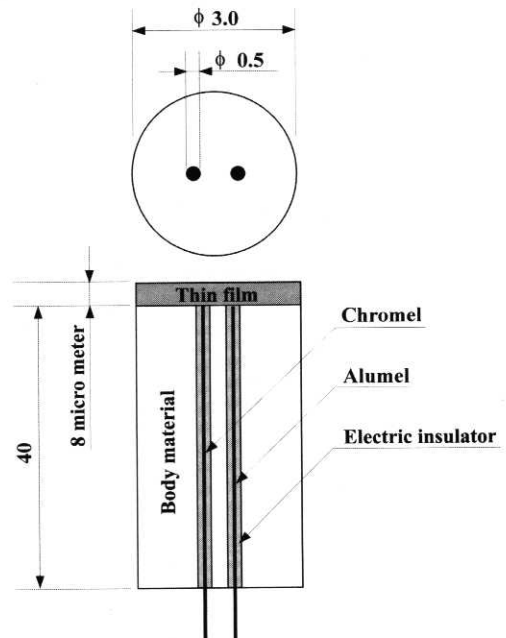


Fig. 3. Schematic of the instantaneous temperature probe used K-type thermocouple.

순간온도 프로브는 Seebeck 효과를 응용한 것으로 접점부의 두께를 최소화하여 연소실 벽면의 순간온도를 시간지연 없이 측정할 수 있도록 열접점부를 5~6 μm의 두께로 금박막(gold thin film)한 다음, 그 위에 연소실 내부의 산화성 분위기에 견딜 수 있도록 1~2 μm 두께의 무전해 니켈도금으로서 내구성을 향상시키고자 하였다. 순간온도 프로브의 모재는 정적연소기와 동일한 재료로서 Al6063을 φ3.0×40 mm로 제작하였

고, 열전대는 $\phi 0.3$ mm의 K-type을 사용하였다. 모재의 축방향으로 $\phi 0.5 \times 40$ mm 두 개의 구멍을 가공한 다음 테프론으로 코팅된 Chromel과 Alumel 열전대 소선을 직접 끼워 넣은 다음 롤러(Roller)에 압착시킴으로써 금으로 증착될 부분은 전기절연 물질에 의한 비절연의 부분이 거의 없는 상태에서 접점부를 형성하였다.

Fig. 4는 순간온도 프로브 접점부의 두께를 계측한 사진이다. 접점부의 두께는 응답성을 결정하는 중요한 인자이므로 본 연구에서는 분해능력(Resolution)이 1.0 nm인 전계방사형 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope)을 사용하여 접점부의 두께를 확인하였다.

Fig. 5는 검정선도상의 온도에 대한 기전력의 기울기 값으로 프로브의 기전력을 온도로 환산하였다. 순간온도 프로브 소선의 길이, 연결부 및 데이터 취득장치 또한

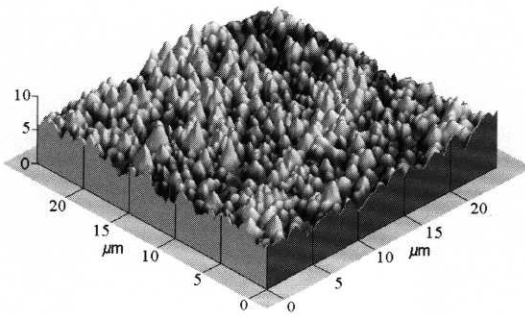


Fig. 4. Photograph showing the measured thickness of the junction.

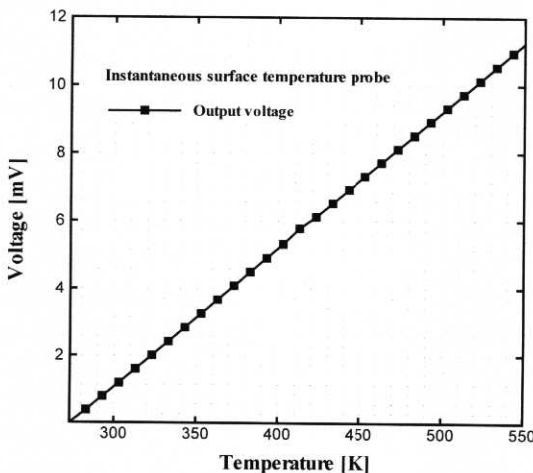


Fig. 5. Calibration chart of temperature probe.

자체저항을 갖고 있으므로 전체를 하나의 저항체로 가정하고, 측정부위인 순간온도 프로브와 표준온도계를 함께 전기로에 넣은 다음 온도차를 크게 가변하면서 표준 온도계의 온도와 순간온도 프로브로부터 취득되는 기전력으로부터 온도환산계수를 결정하고자 하였다. 동일한 방법으로 모든 순간온도 프로브에 대하여 검정을 실시한 기전력에 대한 온도환산계수는 각각 26.6 K/mV였다.

2.2. 실험 방법

탈습된 공기를 363 K의 온도로 가열한 다음 공기 압축기를 이용하여 0.5 MPa의 압력으로 정적연소기의 연소실에 주입시키고, 설정된 양만큼의 가솔린을 분사 시작으로부터 260 ms 후에 점화장치에 의해 점화되도록 하였다. 연소압력 및 연소실 벽면의 순간온도는 정적연소기에 설치된 압력변환기와 순간온도 프로브에 의해서 측정된다. Table 1은 실험의 초기조건을 나타내고, Table 2는 연료분사 후 점화시기[5]까지의 실험조건을 나타내며, 모든 계측 및 제어를 위해 P/C를 사용하였다. 본 실험에서는 동일한 실험조건에서 선행한 압축공기 초기점화온도 353 K일 경우의 연구결과[6]와 비교하고자 하였다.

당량비(Equivalence Ratio) $ER=1.0$, 예혼합기간(Premixed Duration; PD)은 분사된 연료가 충분히 기화된 후 재형성 있는 연소가 이루어지도록 260 ms로 설정하였고, 순간온도 프로브의 장착위치(Position of Probe) $PP=67^\circ, 157^\circ, 247^\circ, 337^\circ$ 에서 순간온도 프로브의 돌출높이(Height of Probe) $HP=0$ mm, 1 mm, 2 mm의 조건으로 실험을 행하였다.

Table 1. Initial conditions of experiment

Parameters	Conditions
Ignition temperature	363 K
Ignition pressure	0.5 MPa
Fuel	Gasoline
Ignition method	CDI

Table 2. Experimental conditions

Parameters	Conditions
Equivalence ratio	1.0
Premixed duration	260 ms
Position of probe	$67^\circ, 157^\circ, 247^\circ, 337^\circ$
Height of probe	0 mm, 1 mm, 2 mm

3. 연소실 벽면의 열유속 계산

열유속 계산을 위해 연소실 벽면에서의 열전달을 1차원 비정상 열전도로 가정하면 다음과 같은 1차원 비정상 열전도방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, x 는 내벽면으로부터 두께방향으로 거리, α 는 벽재질의 열확산계수이다. 위 식의 해는 다음과 같다.

$$T(x, t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-x\sqrt{n\omega/2\alpha}} \cdot [A_n \cos(n\omega t - x\sqrt{n\omega/2\alpha}) + B_n \sin(n\omega t - x\sqrt{n\omega/2\alpha})] \quad (2)$$

내벽면($x=0$)에서의 온도 $T(0, t)$ 는

$$T(0, t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (3)$$

으로 된다. 좌변의 $T(0, t)$ 는 실험으로 측정된 값이므로 우변에서의 T_0, A_n, B_n 은 이를 Fourier 급수로 전개할 때의 계수로서 실험시간 간격이 2τ 일 때 아래와 같다.

$$T_0 = \frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} T(0, t) dt$$

$$A_n = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} T(0, t) \cos(n\omega t) dt$$

$$B_n = \frac{1}{\tau} \int_0^{2\tau} T(0, t) \sin(n\omega t) dt$$

따라서, 내벽면에서 열유속 $q_w(t)$ 는

$$q_w(t) = -k \left[\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right]_{x=0} = \frac{k}{L} (T_0 - T_m) + k \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{n\omega/2\alpha} \cdot [C_n \cos(n\omega t) + D_n \sin(n\omega t)] \quad (4)$$

여기서, $C_n = A_n + B_n$, $D_n = B_n - A_n$, T_m 은 냉접점온도, L 은 벽면 두께 그리고 k 는 열전도율이다. $T(0, t)$ 데이터를 Fourier 급수로 전개[7]하는 데 있어 Gibbs 현상을 벗어난 구간에서 Fourier 급수 전개에 의한 평균온

차는 $1 \times 10^{-5}\%$, 최대오차는 4.7% 이내였다.

4. 실험결과 및 검토

4.1. 순간온도 특성

Fig. 6은 순간온도 프로브의 장착위치(PP) 및 돌출높이(HP)에 따라 주어진 초기조건에서 순간온도의 특성을 알아보기 위하여 연소시 발생하는 순간온도를 500 ms동안 1,000개의 데이터로서 취득한 결과이다. A점은 점화 시기, B점은 순간온도 상승시기, C점은 최고순간온도 발생시기, D점은 관찰 끝부분이다. 본 연구에서는 A점에서 D점까지의 연소에 의한 순간온도의 분포, 연료분사개시부터 점화시기까지를 PD로 구분할 수 있다. A점에서 C점까지의 순간온도 분포로부터 본 연구에서 사용한 순간온도 프로브 응답특성의 재현성 및 고응답성을 확인하였다. 이는 제작과정에서 적열방전에 의한 친수화 처리로 인하여 모재의 오염도를 줄여 박막을 형성하였고, 또한 기존의 전기절연 물질인 세라믹의 경우 전기절연의 성능은 우수하나 금 증착시 박막과의 친화성이 없으므로 연소실 내의 고압과 고온의 상태에 노출되면 금 박막과 세라믹의 분리가 진행되는 것으로 인하여 측정되는 순간온도에 대한 신뢰성 문제 및 내구성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, 금으로 증착될 부분은 전기절연 물질에 의한 비절연의 부분이 거의 없는 상태이므로 금 박막의 두께를 얇게 증착할 수 있어 응답성과 내구성을 향상시키고, 신뢰할 수 있는 순간온도

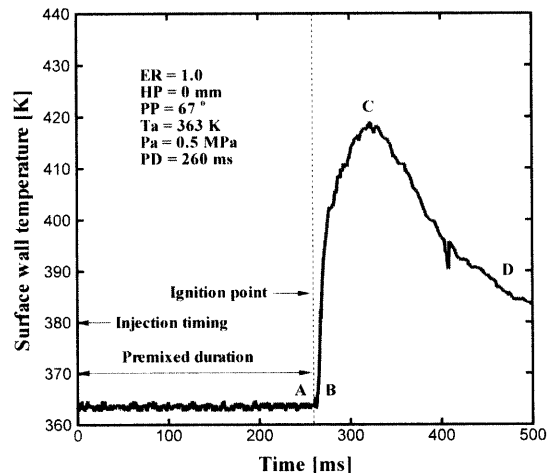


Fig. 6. Typical temperature signal at surface wall of constant volume combustion chamber.

를 취득할 수 있었다. 이 때 금박막의 두께[8]는 선행된 연구결과를 참고하였다.

4.2. 연소실 벽면의 온도 변화

Fig. 7은 이론 혼합비 $ER=1.0$, $HP=0$ mm의 연소 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 $PP=67^\circ$ 에서 438 K, $PP=157^\circ$ 에서 423 K, $PP=247^\circ$ 에서 435 K, $PP=337^\circ$ 에서는 442 K으로 나타났다. 압축공기의 온도를 353K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 5K정도 높은 순간온도를 보였지만 위치에 따른 순간온도의 분포는 거의 동일한 경향으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 434 K이며, 가장 높은 최고순간온도의 $PP=337^\circ$ 와 가장 낮은 최고순간온도의 $PP=157^\circ$ 와의 온도차는 19 K으로 나타났다. $PP=67^\circ$ 에서 보다는 $PP=337^\circ$ 에서 최고순간온도가 4 K 정도 높은 값을 보인다. 이는 $PP=67^\circ$ 의 위치에 설치된 순간온도 프로브와 점화 플러그는 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해[9]하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 $ER=1.0$, $HP=1$ mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 $PP=67^\circ$ 에서 460 K, $PP=157^\circ$ 에서 442 K, $PP=247^\circ$ 에서 453 K, $PP=337^\circ$ 에서는 460 K으로 나타났다. 화염전파에 의한 온도분포는 $HP=0$ mm에서와 동일하게 $PP=337^\circ$, 67° , 247° , 157° 의 순으로 동일한 정성적인 경향을 보이며, 최고순간온도는 $ER=1.0$, $HP=0$ mm일 때 보다는 평균 20 K 정도 높은 454 K으로 나타났다. 압축공기의 온도를 353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 4 K 정도 높은 순간온도를 보였지만 위치에 따른 순간온도의 분포는 거의 동일한 경향으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 $PP=337^\circ$ 와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 $PP=157^\circ$ 와의 온도차는 18 K으로 나타났다. 이는 $HP=0$ mm와 비교하여 온도차가 거의 없으므로 연소실 벽면으로부터 $HP=1$ mm 돌출높이에 따라 전체적으로 평균 20 K 정도의 순간온도가 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 9는 $ER=1.0$, $HP=2$ mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 $PP=67^\circ$ 에서 512 K, $PP=157^\circ$ 에서 507 K, $PP=247^\circ$ 에서 508 K,

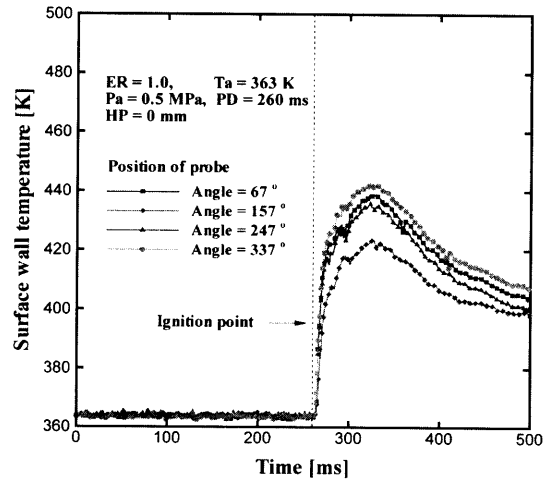


Fig. 7. Surface temperature of wall at $ER=1.0$ and $HP=0$ mm.

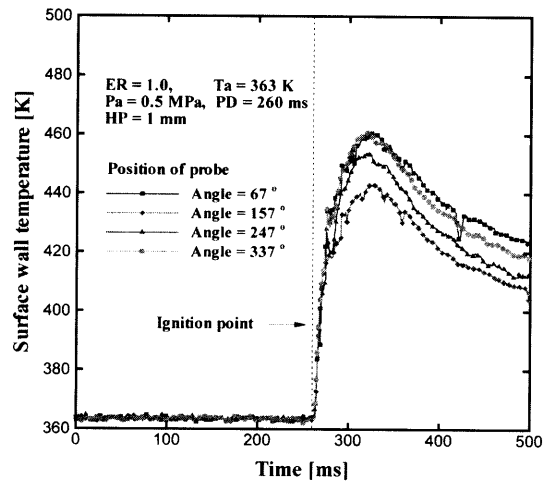


Fig. 8. Surface temperature of wall at $ER=1.0$ and $HP=1$ mm.

$PP=337^\circ$ 에서는 523 K으로 나타났다. 화염전파에 의한 온도분포는 $HP=0$ mm, $HP=1$ mm에서와 동일한 $PP=337^\circ$, 67° , 247° , 157° 의 순으로 동일한 정성적인 경향을 보이며, 최고순간온도는 $ER=1.0$, $HP=1$ mm 일 때 보다는 평균 59 K 높고, $HP=0$ mm일 때보다 평균 79 K 높은 513 K으로 나타났다. 즉, 벽면으로부터 연소가스 중심쪽으로 $HP=2$ mm 접근함에 따라 전체적으로 평균 79 K 정도 높게 순간온도가 증가함을 알 수 있다. 하지만 가장 높은 최고순간온도의 $PP=337^\circ$ 와

가장 낮은 최고순간온도의 $PP=157^\circ$ 와의 온도차는 16 K으로 크게 차이났다. 그리고 $HP=2$ mm부터는 연소가스 화염의 영향으로 인하여 $HP=0$ mm, $HP=1$ mm에서와 같이 온도분포가 일정하지 않았다. 압축공기의 온도를 353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 3 K 정도 높은 순간온도를 보였지만 위치에 따른 순간온도의 분포는 거의 동일한 경향으로 나타났다.

Fig. 10은 $ER=1.0$, $PP=337^\circ$ 주어진 돌출높이(HP)의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할

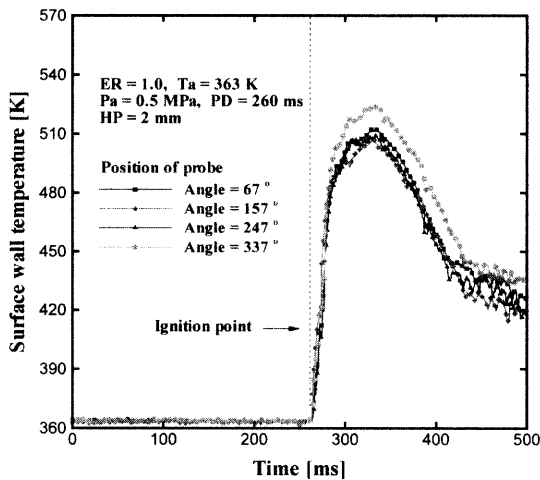


Fig. 9. Surface temperature of wall at $ER=1.0$ and $HP=2$ mm.

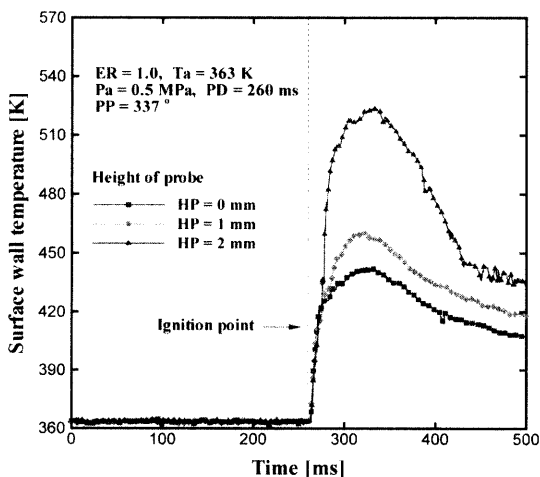


Fig. 10. Surface temperature of wall at $ER=1.0$ and $PP=337^\circ$.

때의 최고순간온도를 비교하여 나타낸 것이다. $HP=0$ mm에서 최고순간온도는 442 K이며, $HP=1$ mm에서 $HP=0$ mm보다도 18 K 높은 460 K이고, $HP=2$ mm에서는 $HP=1$ mm보다도 63 K 높고, $HP=0$ mm보다는 81 K 높은 523 K으로 나타났다. 이는 $HP=0$ mm에서 $HP=2$ mm 동안의 최고순간온도 변화폭은 $HP=0$ mm에서 $HP=1$ mm에 비해 76% 증가한 것으로 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상승하고, 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 $ER=1.0$, $HP=0$ mm, $HP=1$ mm, $HP=2$ mm, 주어진 측정위치(PP)의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 비교하여 나타낸 것이다. 가장 높은 순간온도는 $HP=2$ mm, $PP=337^\circ$ 이었으며, 돌출높이 증가에 따라 순간온도는 정성적으로 증가하지만 $HP=2$ mm부터 급격한 순간온도의 증가를 보였다.

4.3. 연소실 벽면의 열유속 변화

Fig. 12는 이론 혼합비 $ER=1.0$, $HP=0$ mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 비정상 순간 열유속을 나타냈다. 점화가 이루어지면 순간온도는 급격히 상승하면서 연소실 벽면으로의 손실 열량이 빠져나가고 있다. 순간열유속은 측정위치에 따라 차이가 있지만 순간온도와 유사한 형태로 나타났다. $ER=1.0$, $HP=0$ mm의 연소조건에서 연소시켰을 때 260~480 ms 동안 벽면으로의 열손실을 의미하는 총열량(전 연소기간의 적산치)은 $PP=67^\circ$ 에서 97,867 kJ/m², $PP=157^\circ$ 에서 83,339 kJ/m², $PP=247^\circ$ 에서 94,006 kJ/m², $PP=337^\circ$ 에서 02,904 kJ/m²으로

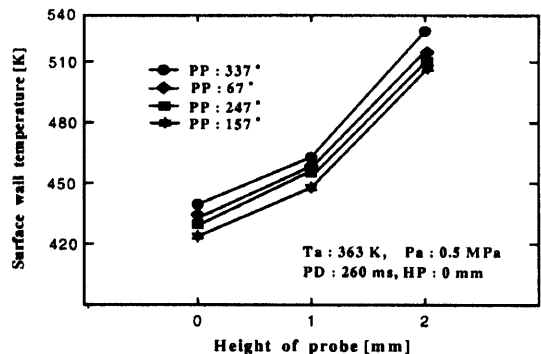


Fig. 11. Surface temperature of wall at HP and PP.

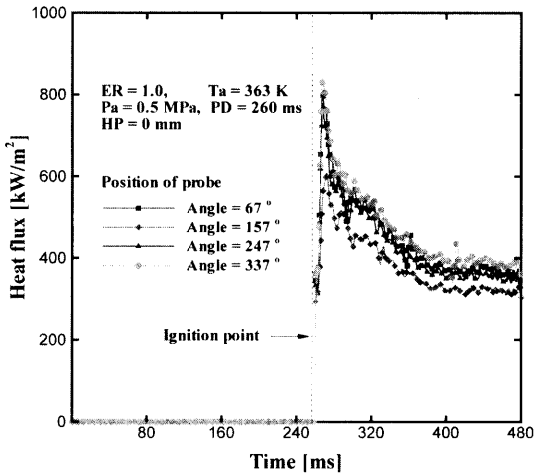


Fig. 12. Unsteady heat flux of wall at ER=1.0 and HP=0 mm.

연소실 벽면의 열부하의 상태를 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 점화 플러그와 근접한 거리이지만 점지 전극이 화염의 진행 방향을 방해하기 때문에 PP=67°에서 보다도 PP=337°에서 총열량이 5,037 kJ/m²의 큰 값으로 차이났다.

Fig. 13은 ER=1.0, PP=337°, 주어진 돌출높이(HP)의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때 최고순간온도와 온도의 시간분포로부터 비정상 순간 열유속을 나타냈다. 돌출높이(HP)의 증가에 따라 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 HP=0 mm에서 102,940 kJ/m², HP=1 mm에서 119,885 kJ/m², HP=2 mm에서는 170,669 kJ/m²으로 나타났다. HP=1 mm에서는 HP=0 mm 보다도 16,981 kJ/m² 정도 높게 나타났고, HP=2 mm에서는 HP=1 mm 보다 50,784 kJ/m² 정도 높고, HP=0 mm일 때 보다는 67,765 kJ/m² 정도 높게 나타났다. 이는 HP=0 mm에서 HP=2 mm 동안의 손실 총열량 변화폭은 HP=0 mm에서 HP=1 mm에 비해 75% 증가하였다.

Fig. 14는 ER=1.0, PP=67°, 157°, 247°, 337°, 주어진 돌출높이(HP)의 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 구한 비정상 순간 열유속을 합산하여 손실 총열량 증가비율을 나타냈다. 돌출높이 HP의 증가에 따라 손실 총열량은 거의 선형적으로 증가하였다. 특히, HP=2 mm에서는 높은 손실 총열량을 보였다. 앞에서 언급한 바와 같이 연소실 내의 순간 온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상

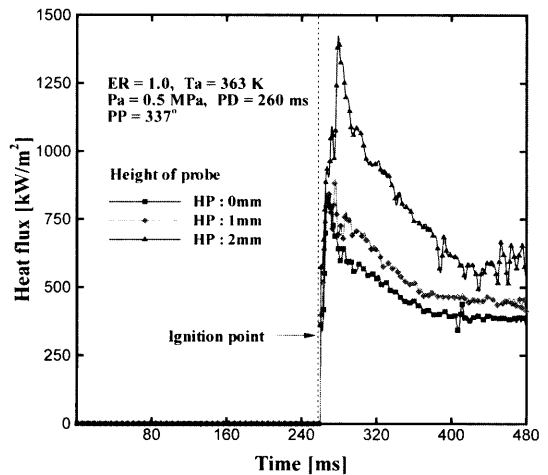


Fig. 13. Unsteady heat flux of wall at ER=1.0 and PP=337°.

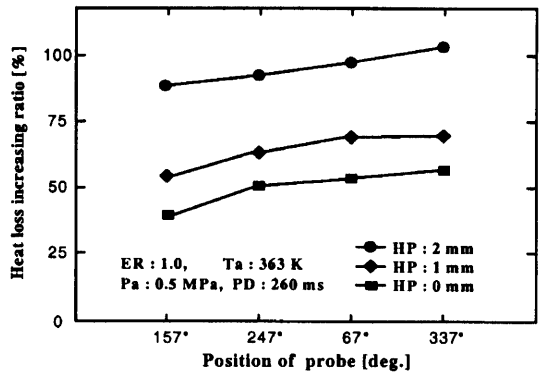


Fig. 14. Total heat loss at equivalence ratio and probe position.

승하고, 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

정적연소기 내에서 비정상 열부하를 해석하기 위하여 순간온도 프로브를 제작하고, 순간온도 프로브의 위치와 돌출높이가 순간온도 및 순간 열유속에 미치는 영향에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 압축공기의 온도를 353 K의 조건으로 연소시킨 연구결과와 비교해서 평균 HP=0 mm에서는 5 K, HP=1 mm, 2 mm에서는 4 K 높은 최고순간온도를 보였다.
- 2) ER=1.0에서 HP=0 mm, HP=1 mm, HP=2 mm, PP=67°, 157°, 247°, 337°의 연소조건에서 혼합기를

연소시킬 때 연소실 순간온도의 분포는 주어진 HP 조건에 대하여 $PP=337^{\circ}$, 67° , 247° , 157° 의 순으로 동일한 정성적인 경향으로 나타났다.

3) 주어진 연소조건에서 $HP=0\text{ mm}\sim HP=2\text{ mm}$ 동안 연소실 벽면으로 열손실을 의미하는 전 연소기간 동안의 총열량 변화폭은 $HP=0\text{ mm}\sim HP=1\text{ mm}$ 에 비해 73% 증가하므로 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다

참고문헌

1. Enomoto and Furuhamu, Bulletin of JSME, 28(235) (1985) 8.
2. Eichelberg, 日本機械學會, 39(317) (1974) 324.
3. C. Arocoumanis and C. S. Bae, SAE (No.930868), 1993.
4. 多田, Bulletin of the JSAE, 7 (1976) 1.
5. 윤수한, 전대수, 하종률, KSME, 8(1) (2000) 1.
6. 이치우, 김지훈, 김시범, KSME, 9(4) (2001) 103.
7. 김시범, 이치우, 삼성자동차 산학협동연구과제, 1998.
8. 榎本 良輝, 武蔵工業大學部機械工學科 學位論文, 1987.
9. 전대수, 이태원, 윤수한, 하종률, KSME, 8(1) (2000) 1.