

연소실 순간온도 측정에 있어서 돌출높이에 따른 실험적 연구

이치우* · 김지훈** · 김시범***

**Study on the Heat Flux Using Instantaneous Temperature
as Height of Probe in the Combustion Chamber**

C-W Lee* · J-H Kim** · S-P Kim***

Key words : Instantaneous surface temperature probe(박막형 순간온도 프로브), Constant volume combustion chamber(정적연소기), Wall heat flux(벽면 열유속)**Abstract**

The gasoline engine tends to high performance, fuel economy, small-sized. Therefore, it is necessary to solve the problems on thermal load, abnormal combustion, etc in the engine. Thin film instantaneous temperature measurement probe was made. And the manufactural method of probe was established. The instantaneous surface temperatures in the constant volume combustion chamber were measured by this probe and the heat flux was obtained by Fourier analysis. The authors measured the wall temperature of combustion chamber and computed the heat flux through the cylinder wall in order to understand the combustion characteristics depending on height of probe. For achieving this goal, the thin film instantaneous temperature probe was developed for analyzing the instantaneous surface wall temperature and unsteady heat flux on the constant volume combustion chamber.

1. 서 론

자동차 내연기관에 대한 연구는 고출력을 요구하면서 동시에 배출가스 저감과 저연비를 얻을 수 있는 기관을 요구하고 있다. 저연비를 위한 자동차의 경량화 및 고출력으로 인한 공급열량의 증가는 출력이 증대하는 반면 열부하도 같이 증가하므로

그에 따른 연소실 내부와 구성품들에 대한 열적 거동이 반영된 설계가 되어야 한다. 따라서, 연소실 내의 가스온도 변화에 의해 비정상적으로 변화하는 순간온도 및 순간열유속을 측정하기 위하여 응답성이 빠른 박막형 순간온도 프로브(instantaneous surface temperature probe)를 제작하고자 한다.¹⁾

* 회원, 마산대학 자동차과(원고접수일 : 2000년 12월)

** 회원, 동아대학교 대학원

연소실내 연소가스로부터 연소실벽까지 열손실 상태를 명확하게 규명하는 것은 내연기관의 열부하 대책 및 열손실 저감에 의한 열효율 향상에 대한 가능성을 제시할 수 있으며, 연소실 구성부품의 열적 강도를 반영한 최적의 설계를 위해 연소가스로부터 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 연소실내의 연소가스 및 연소실 각부의 열전도율을 정확하게 측정할 수 없으므로 수열측인 연소실 벽면에 제작한 박막형 순간온도 프로브를 삽입하여 측정된 순간온도로부터 연소실 내부의 열부하 상태를 확인할 수 있다. 그리고 박막형 순간온도 프로브는 기본적으로 열접점부 박막에 접촉하는 순간온도를 측정하려는 목적이다.²⁾ 열적 물성치가 다른 또는 이종금속에 대한 영향을 고려해야 한다. 그러므로 박막형 순간온도 프로브의 소재, 박막의 두께를 고려한 검증이 필요하다. 검증된 박막형 순간온도 프로브는 다양한 혼합비 및 여러 조건에서 순간온도에 대한 신뢰성 및 정확성과 내구성도 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 정적연소기(constant volume combustion chamber)내에서 박막형 순간온도 프로브의 측정위치 및 들출높이의 조건에서 혼합기를 연소시킬 때의 경과시간에 따라 연소실 내벽면의 순간온도를 측정하였다. 이 결과를 이용하여 제 조건에 따른 연소특성의 해석, 벽면에서의 최고순간온도, 화염의 이동특성에 따른 순간온도의 분포 및 비정상 순간열유속을 산출하고, 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량으로서 열손실과의 관계를 연구하고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 실험 장치

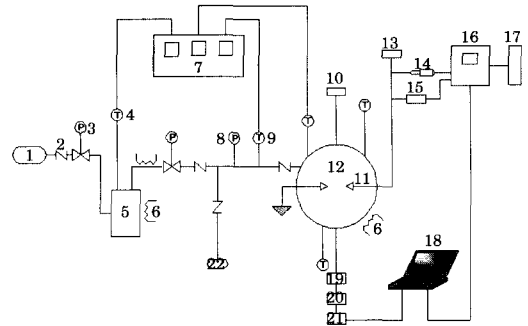
본 실험장치는 정적연소기, 점화장치, 공기 공급장치, 연소실 벽면온도 측정장치, 각종 제어 및 계측장치로 구성되어 있다.

Fig.1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 연료가 산화하는 연소과정에서 순간온도를 측정하는 과정은 매우 복잡한 현상들을 수반하기 때문에 65×60mm, 연소체적 199.1cm³의 정적연

소기³⁾를 사용하여 실험하였다. 사용연료는 가솔린이며, 연소시 발생하는 순간온도와 순간압력은 250kHz A/D변환 장치로써 데이터를 취득하였다.

Fig.2는 압력계, 박막형 순간온도 프로브 등을 장착한 정적연소기의 사진이다. 이 때 박막형 순간온도 프로브는 압력계를 기준으로 67°, 157°, 247°, 337°의 방사형으로 설치하였다

Fig.3은 본 연구에서 사용한 박막형 순간온도 프



- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 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. Tubulence 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

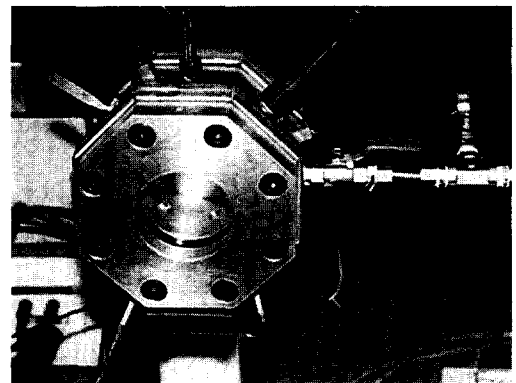


Fig.2 Picture of constant volume combustion chamber

로브이다.⁴⁾ 박막형 순간온도 프로브는 Seebeck 효과를 응용한 것으로 접점부의 두께를 최소화하여 연소실 벽면의 순간온도를 시간지연 없이 측정할 수 있도록 열접점부를 $0.2\mu\text{m}$ 의 두께로 금(gold)으로써 박막한 다음, 그 위에 연소실 내부의 산화성 분위기에 견딜 수 있도록 $8\mu\text{m}$ 두께의 무전해 니켈도금으로 접점을 형성하였다.⁵⁾ 박막형 순간온도 프로브의 모재는 정적연소기와 동일한 재료로서 Al6063을 $\phi 3.0 \times 40\text{mm}$ 로 제작하였고, 열전대는 $\phi 0.3\text{mm}$ 의 K-type을 사용하였다. 모재의 축방향으로 $\phi 0.5 \times 40\text{mm}$ 두 개의 구멍을 가공한 다음 테프론으로 코팅된 Chromel과 Alumel 열전대 소선을 직접 끼워 넣은 다음 롤러(Roller)에 압착시킴으로 금으로 증착될 부분은 전기절연 물질에 의한 비절연의 부분이 거의 없는 상태에서 박막을 형성하였다. 박막형 순간온도 프로브 소선의 길이, 연결부 및 데이터 취득장치 또한 자체저항을 갖고 있으므로 전체를 하나의 저항체로 가정하고, 측정부 위인 박막형 순간온도 프로브와 표준온도계를 함

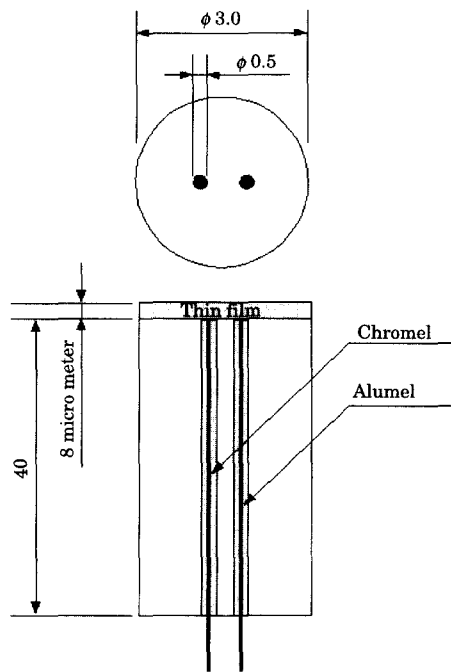


Fig. 3 Schematic of the thin film instantaneous temperature probe used K-type thermocouple

께 전기로에 넣은 다음 온도차를 크게 가변하면서 표준온도계의 온도와 박막형 순간온도 프로브로부터 취득되는 기전력으로부터 온도환산계수를 결정하였다.

2.2 실험 방법

탈습된 공기를 353K의 온도로 가열한 다음 공기 압축기를 이용하여 0.5MPa의 압력으로 정적연소기의 연소실에 주입시키고, 설정된 양만큼의 가솔린을 분사 시작으로부터 260ms 후에 점화장치에 의해 점화되도록 하였다. 연소압력 및 연소실 벽면의 순간온도는 정적연소기에 설치된 압력변환기와 박막형 순간온도 프로브에 의해서 측정된다. Table 1은 실험의 초기조건을 나타내고, Table 2는 연료분사 후 점화시기까지의 실험조건을 나타내며, 모든 계측 및 제어를 위해 P/C를 사용하였다.

예혼합기간(Premixed Duration;PD)는 분사된 연료가 충분히 기화된 후 재현성 있는 연소가 이루어지도록 260ms로 설정하였고,⁶⁾ 박막형 순간온도 프로브의 장착위치(Position of Probe;PP) 67° , 157° , 247° , 337° 와 박막형 순간온도 돌출높이(Height of Probe;HP)는 0mm, 1mm, 2mm의 조건에서 실험을 행하였다.

순간온도 데이터를 Fourier 급수로 전개하는 데 있어⁷⁾ Gibbs 현상을 벗어난 구간에서 Fourier 급수 전개에 의한 평균오차는 $1 \times 10^{-5}\%$, 최대오차는 4.7% 이내였다.

Table 1 Initial conditions of experiment.

Parameters	Conditions
Fuel	Gasoline
Ignition method	CDI
Ignition pressure, Pa	0.5MPa
Ignition temp., Ta	353K

Table 2 Experimental conditions.

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

3. 결과 및 검토

3.1 순간온도 특성

Fig.4는 박막형 순간온도 프로브의 장착위치 PP 및 돌출높이 HP에 따라 주어진 초기조건에서 순간온도의 특성을 알아보기 위하여 연소시 발생하는 순간온도를 500ms동안 1,000개의 데이터로써 취득한 결과이다. A점은 점화시기, 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 박막형 순간온도 프로브 응답특성의 재현성 및 고 응답성을 확립하였다. 이는 제작과정에서 적열방전에 의한 친수화 처리로 인하여 모재의 오염도를 줄여 박막을 형성하였고, 또한 기존의 전기절연 물질인 세라믹(ceramic)의 경우 전기절연의 성능은 우수하나, 금 증착시 박막과의 친화성이 없으므로 연소실내의 고압과 고온의 상태에 노출되면 금 박막(gold thin film)과 세라믹의 분리가 진행되는 것으로 인하여 측정되는 순간온도에 대한 신뢰성 문제 및 내구성에 영향⁶⁾을 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 순간온도를 취득할 수 있었다.

3.2 연소실 벽면의 온도 변화

Fig.5는 이론 혼합비 ER 1.0, HP 0mm의 연소 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 67°에서 433K, 157°에서 418K, 247°에서 429K, 337°에서는 437K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 429K이며, 가장 높은 최고순간온도의 337°와 가장 낮은 최고순간온도의 157°와의 온도차는 19K으로 나타났다. 67°에서 보다는 337°에서 최고순간온도가 4K 정도 높은 값을 보인다. 이는 67°의 위치에 설치된 박막형 순간온도 프로브와 점화 플러그는 근접한 거리이지만 점지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기⁷⁾ 때문인 것으로 판단된다.

Fig.6은 ER 1.0, HP 1mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 67°에서 455K, 157°에서 438K, 247°에서 449K, 337°에서는 456K으로 나타났다. 화염전파에 의한 온도분포는 HP 0mm에서와 동일하게 337°, 67°, 247°, 157°의 순으로 동일한 정성적인 경향을 보

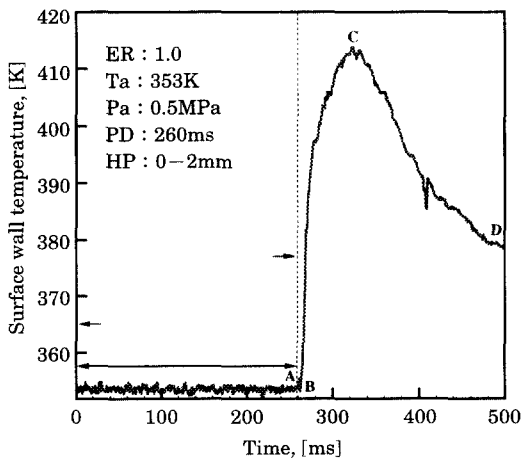


Fig. 4 Typical temperature signal at surface wall of constant volume combustion chamber

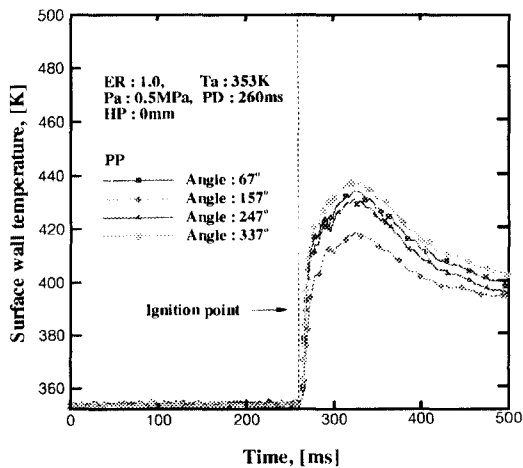


Fig. 5 Surface temperature of wall at ER 1.0 and HP 0mm

이며, 최고순간온도는 ER 1.0, HP 0mm일 때 보다도 평균 21K 정도 높은 449K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 337°와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 157°와의 온도차는 18K으로 나타났다. 이는 HP 0mm와 비교하여 온도차가 거의 없으므로 연소실 벽면으로부터 1mm 돌출높이에 따라 전체적으로 평균 21K 정도의 순간온도가 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig.7은 ER 1.0, HP 2mm의 연소조건에서 화염

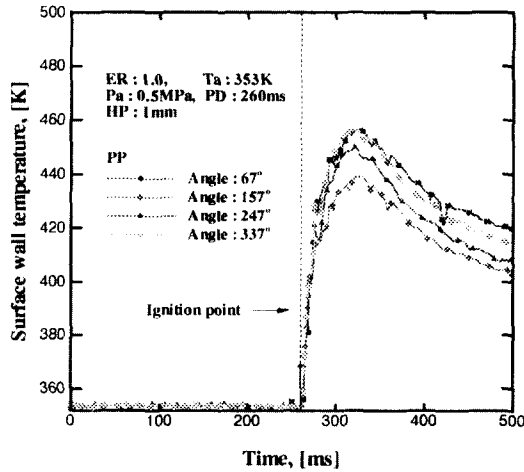


Fig. 6 Surface temperature of wall at ER 1.0 and HP 1mm

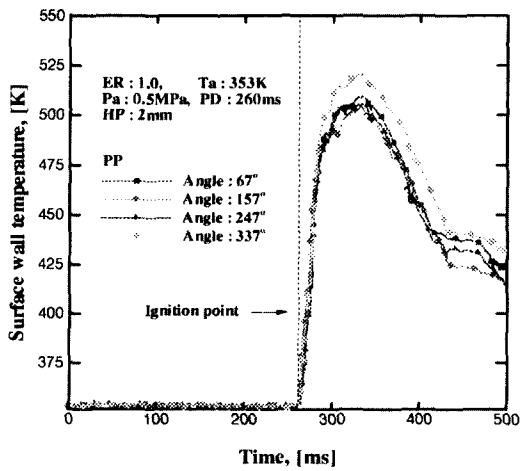


Fig. 7 Surface temperature of wall at ER 1.0 and HP 2mm

이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도와 온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 67°에서 508K, 157°에서 503K, 247°에서 504K, 337°에서는 520K으로 나타났다. 화염전파에 의한 온도분포는 HP 0, 1mm에서와 동일한 337°, 67°, 247°, 157°의 순으로 동일한 정성적인 경향을 보이며, 최고순간온도는 ER 1.0, HP 1mm일 때 보다도 평균 59K 높고, HP 0mm일 때보다 평균 79K 높은 509K으로 나타났다. 즉, 벽면으로부터 연소가스 중심쪽으로 2mm 접근함에 따라 전체적으로 평균 79K 정도 높게 순간온도가 증가함을 알 수 있다. 하지만 가장 높은 최고순간온도의 337°와 가장 낮은 최고순간온도의 157°와의 온도차는 45K으로 크게 차이 났다. 그리고 HP 2mm부터는 연소가스 화염의 영향으로 인하여 HP 0, 1mm에서와 같이 온도분포가 일정하지 않았다.

Fig.8은 ER 1.0, PP 337°, 주어진 돌출높이 HP의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 비교하여 나타낸 것이다. HP 0mm에서 최고순간온도는 437K이며, HP 1mm에서 HP 0mm보다도 19K 높은 456K이고, HP 2mm에서는 HP 1mm보다는 64K 높고, HP 0mm보다는 83K 높은 520K으로 나타났다. 이는 HP 0mm에서 HP 2mm동안의 최고순간온도 변화폭은 HP 0mm에서 HP 1mm에 비해 77% 증가

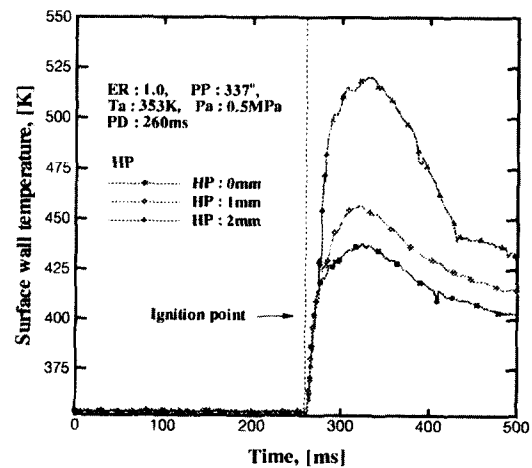


Fig. 8 Surface temperature of wall at ER 1.0 and PP 337°

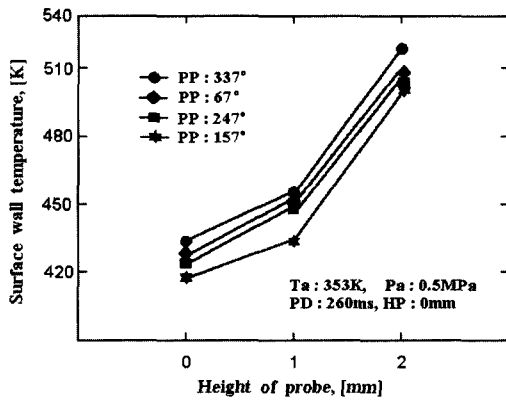


Fig. 9 Surface temperature of wall at HP and PP

한 것으로 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상승하고, 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig.9는 ER 1.0, HP 0mm, 1mm, 2mm, 주어진 측정위치 PP의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 비교하여 나타낸 것이다. 가장 높은 순간온도는 HP 2mm, PP 337° 이었으며, 돌출높이 증가에 따라 순간온도는 정성적으로 증가하지만 HP 2mm부터 급격한 순간온도의 증가를 보였다.

3.3 연소실 벽면의 열유속 변화

Fig.10은 이론 혼합비 ER 1.0, HP 0mm의 연소 조건에서 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 0mm의 연소조건에서 연소시켰을 때 260~480ms동안 벽면으로의 열손실을 의미하는 총열량(전 연소기간의 적산치)은 67°에서 36,337kJ/m², 157°에서 30,007kJ/m², 247°에서 34,694kJ/m², 337°에서 38,613kJ/m²으로 연소실 벽면의 열부하의 상태를 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 점화 플러그와 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기 때문에 67°에서 보다도 337°에서 총열량이 8,606kJ/m²의 큰 값으로 차이났다.

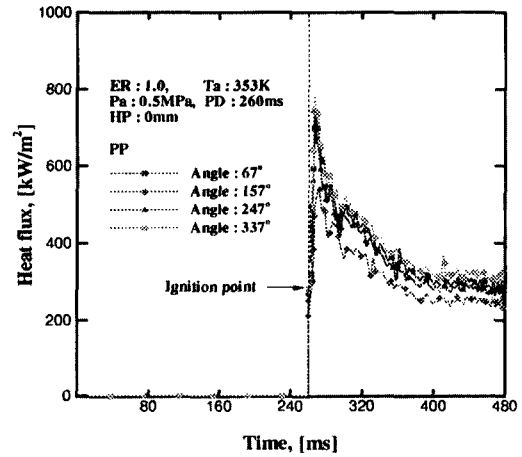


Fig. 10 Unsteady heat flux of wall at ER 1.0 and HP 0mm

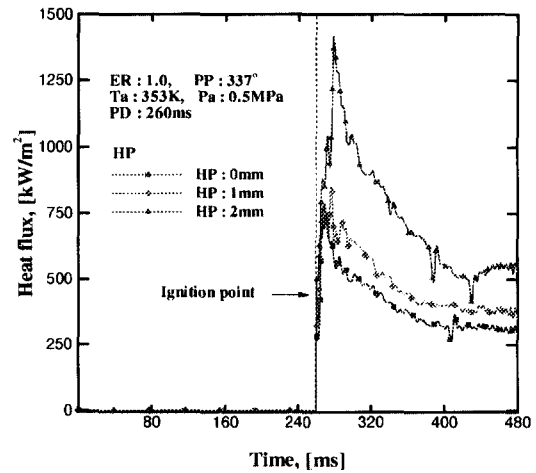


Fig. 11 Unsteady heat flux of wall at ER 1.0 and PP 337°

Fig.11은 ER 1.0, PP 337°, 주어진 돌출높이 HP의 조건에서 연소시킬 때 화염이 측정부를 통과할 때 최고순간온도와 온도의 시간분포로부터 비정상 순간 열유속을 나타냈다. 돌출높이 HP의 증가에 따라 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 HP 0mm에서 38,613kJ/m², HP 1mm에서 46,579kJ/m², HP 2mm에서는 69,765kJ/m²으로 나타났다. HP 1mm에서는 HP 0mm 보다도 7,966kJ/m² 정도 높게 나타났고, HP 2mm에서는 HP 1mm 보다 23,186kJ/m² 정도 높고, HP 0mm

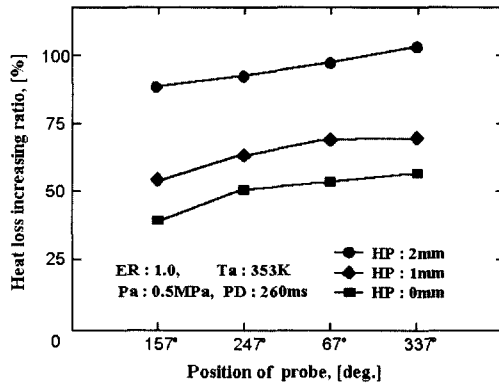


Fig. 12 Total heat loss at equivalence ratio and probe position

일 때 보다는 $31,152\text{kJ/m}^2$ 정도 높게 나타났다. 이는 HP 0mm에서 HP 2mm동안의 손실 총열량 변화폭은 HP 0mm에서 HP 1mm에 비해 74% 증가하였다.

Fig.12는 ER 1.0, PP 67° , 157° , 247° , 337° , 주어진 돌출높이 HP의 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 2mm에서는 높은 손실 총열량을 보였다. 앞에서 언급한 바와 같이 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상승하고, 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

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

- 1) 박막형 순간온도 프로브의 제작 과정에서 적열방전에 의한 친수화 처리로 인하여 모재의 오염도를 줄여 박막을 형성함으로써 응답성과 내구성을 향상시키고, 신뢰할 수 있는 순간온도를 취득할 수 있는 시스템을 구축하였다.

- 2) ER 1.0, HP 0mm, 1mm, 2mm, PP 67° , 157° , 247° , 337° 의 연소조건에서 혼합기를 연소시킬 때 연소실 순간온도의 분포는 주어진 HP 조건에 대하여 PP 337° , 67° , 247° , 157° 의 순으로 동일한 정성적인 경향으로 나타났다.

- 3) HP 0mm에서 HP 2mm동안의 최고순간온도 변화폭은 HP 0mm에서 HP 1mm에 비해 77% 증가한 것으로 연소실내의 순간온도는 벽면으로부터 연소가스로 근접할수록 급격히 상승하는 것을 알 수 있다.

- 4) 주어진 연소조건에서 HP 0mm~HP 2mm동안 연소실 벽면으로 열손실을 의미하는 전 연소기간동안의 총열량 변화폭은 HP 0mm~HP 1mm에 비해 74% 증가하므로 돌출높이에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다

참고문헌

1. Enomoto, Furuham, "Study on Thin Film Thermocouple for Measuring Instantaneous Temperature on Surface of Combustion Chamber Wall in a Internal Combustion Engine", Bulletin of JSME, Vol.28, No.235, pp.8~116, 1985.
2. Eichelberg, "自動車用ガソリン機関の實用時におけるピストン温度", 日本機械學會論文集, 39卷, 317, pp.324~337, 1974.
3. C. Arocoumanis and C. S. bae, "Visualization of Flow/Flame Interaction in a Costant Volume Combustion Chamber", SAE No.930868, 1993.
4. 多田, "Temperature Measurement in Rotor Bearing of Rotary Engine", Bulletin of the JSAE, No.7, pp.11~12, 1976.
5. 榎本 良輝 "自動車エンジンの温度測定および熱損失に関する研究" 武蔵工業大學部機械工學科 學位論文.
6. 河鐘律 外 3人, "회박연소를 위한 혼합기의 성층급기와 유동에 관한 연구", KSME 論文集, 제8권 1호, pp.1~9, 2000.
7. 尹水漢, "정압연료분사장치와 부실식정적연소기를 사용한 메탄올의 연소특성에 관한 연구" 博士學位論文, 東亞大學校, 1995.

8. 김시범, 이치우, "4사이클 DOHC 엔진의 실린더 헤드에서 냉각손실을 고려한 열해석", 삼성자동차 산학협동연구과제, 1998.
9. 河鐘律 外 4人, "IDI형 정적연소기에서 점화시기 및 연락공형상이 연소특성에 미치는 영향", KSME 論文集, Vol.4, No.3, No. 96370066, pp.220~231, 1996.

저 자 소 개



이치우 (李致雨)

1965년 8월생, 1991년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1993년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 1999년 동대학원 기계공학과 수료(공학박사), 1995~현재 마산대학 자동차과 교수, 당학회 회원



김지훈 (金志勳)

1972년 6월생, 1999년 동아대학교 기계공학과 졸업, 2001년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 2001년 동대학원 기계공학과 과정(공학박사), 동아대학교 생산기술 연구소 특별연구원, 당학회 정회원



김시범 (金施帆)

1956년 5월생, 1979년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1981년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 1985년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1984~현재 동아대학교 기계공학과 교수