

정적연소기에서 순간온도를 이용한 열유속에 관한 연구

Study on the Heat Flux Using Instantaneous Temperature in the Constant Volume Combustion Chamber

이 치 우*, 김 지 훈**, 하 종 룰***, 김 시 범***
C. W. Lee, J. H. Kim, J. Y. Ha, S. P. Kim

ABSTRACT

In the present study, the internal combustion 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 probe was made, and the measuring system was established. The instantaneous surface temperatures in the constant volume combustion chamber were measured with this system and the heat flux was obtained by Fourier analysis.

Maximum instantaneous temperatures were obtained after 55~60ms from ignition and they increased as equivalence ratio and varied differently as the position of probe. Total heat loss during combustion time was affected by the equivalence ratio and differed widely as the position of probe.

주요기술용어 : Instantaneous surface temperature probe(박막형 순간온도 프로브), Constant volume combustion chamber(정적연소기), Gold thin film(금 박막), Wall heat flux(벽면 열유속)

1. 서 론

최근 내연기관에 대하여서는 저연비와 배출가스 저감을 위한 많은 연구가 진행되고

* 회원, 마산대학 자동차과
** 회원, 동아대학교 대학원
*** 회원, 동아대학교 기계공학과

있다. 이에 대처하기 위해서 연료공급 및 점화시기의 정밀전자제어가 필수적이다. 또한 수요자의 고출력에 대한 요구에 부응하기 위한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 고출력으로 인한 공급열량의 증가는 출력이 증대하는 반면 열부하도 같이 증가하므로 그에 따른 연소실 내부와 구성품들에 대하여 열적 거동이 반영된 최적의 설계가 되어

야 한다. 연소실 구성부품들은 높은 온도에 노출되어 있으며, 그 온도의 분포가 일정하지 않다. 따라서, 연소실 벽면은 열응력에 의한 피로파괴를 일으키는 온도 이하로 유지되어야 한다. 알루미늄의 경우 573K이하의 상태를 유지해야 하고, 연소실 벽면은 윤활유의 산화 등으로 인해 점성이 저하되므로 이를 방지하기 위해 약 453K보다 낮게 유지해야 한다.

연소시 발생하는 가스온도의 변화에 의해 비정상적으로 변화하는 연소실 벽면의 순간온도는 응답성이 빠른 박막형 순간온도 프로브(instantaneous surface temperature probe)를 이용하여¹⁾ 측정할 수 있다. 연소실내 연소가스로부터 연소실 벽면으로의 열손실 상태를 명확하게 규명하는 것은 내연기관의 열부하 대책 및 열손실 저감을 통한 열효율 향상을 위해 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 정적연소기(constant volume combustion chamber)내에서 박막형 순간온도 프로브의 측정위치 및 주어진 당량비 조건에서 혼합기를 연소시킬 때의 경과시간에 따라 연소실 내벽면의 순간온도를 측정한다. 이 결과를 이용하여 제 조건에 따른 연소특성의 해석, 연소실 벽면에서의 최고순간온도, 화염의 이동특성에 따른 순간온도의 분포 및 비정상 순간열유속 등을 산출하여 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량을 밝히고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 실험 장치

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

Fig.1은 본 연구에 사용한 실험장치의 개략도이다. 연료가 산화하는 연소과정에서 순간온도를 측정하는 과정은 매우 복잡한 현

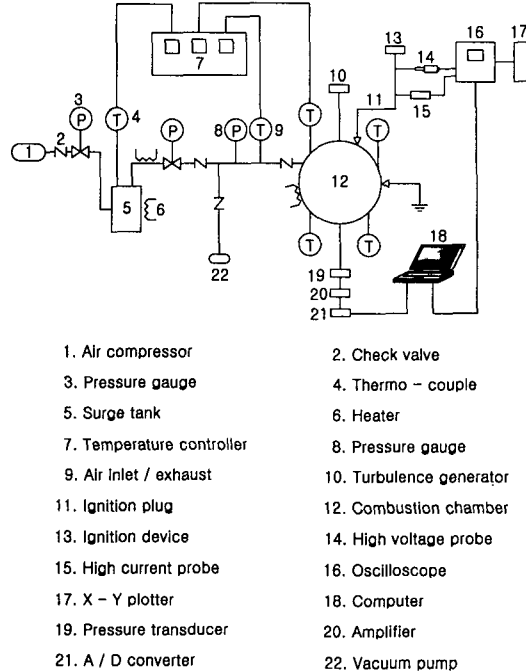


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

상들을 수반하기 때문에 65×60mm, 연소체적 199.1cm³의 정적연소기²⁾를 사용하여 그 현상을 밝히는 연구를 수행하였다. 사용연료는 가솔린이며, 연소시 발생하는 순간온도와 순간압력은 250kHz 16bit A/D변환 장치로써 데이터를 취득하였다.

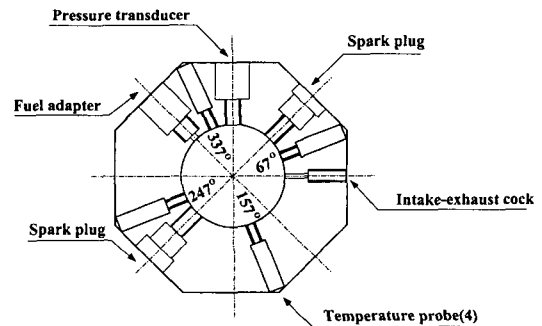


Fig. 2 Schematic diagram of constant volume combustion chamber

Fig.2는 압력계, 스파크 플러그 및 박막형 순간온도 프로브 등을 장착한 정적연소기의 구성도이다. 박막형 순간온도 프로브의 장착 위치(Position of Probe; PP)는 압력계를 기준으로 67°, 157°, 247°, 337°의 방사형으로 설치하였다. 본 연구에서 사용한 박막형 순간온도 프로브는³⁾ Seebeck 효과를 응용한 것으로 접점부의 두께를 최소화하여 연소실 벽면의 순간온도를 시간지연 없이 측정할 수 있도록 열접점부를 0.2 μm 두께의 금(gold)으로써 접점한 다음 그 위에 연소실 내부의 산화성 분위기에 견딜 수 있도록 8 μm 두께의 무전해 니켈도금으로 박막을 형성하였다⁴⁾. 박막형 순간온도 프로브의 모재는 정적연소기와 동일한 재료로서 Al6063을 φ3.0×40mm로 제작하였다. 모재에 축방향으로 φ0.5×40mm인 구멍을 두 개 가공한 다음 테프론으로 절연한 열전대(0.3mm K-type) 소선을 직접 끼워 넣은 후 롤러에서 압착시켜 폴리싱하였다. 금으로 증착될 부분에는 전기절연 물질에 의한 비절연 부분을 최소화하여 박막을 형성하기 위함이었다. 박막형 순간온도 프로브 소선의 길이, 연결부 및 데이터 취득장치 또한 자체저항을 갖고 있으므로 전체를 하나의 저항체로 가정하고, 측정부위인 박막형 순간온도 프로브와 표준온도계를 함께 전기로에 넣은 다음 온도차를 크게 변화시키면서 표준온도계의 온도와 박막형 순간온도 프로브에서 취득되는 기전력으로부터 온도환산계수를 결정하였다.

2.2 실험 방법

제습된 공기를 353K으로 가열한 다음 공기 압축기를 이용하여 0.5MPa의 압력으로 정적연소기의 연소실에 주입한 상태에서 설정된 양만큼의 가솔린을 분사한다. 분사시작으로부터 260ms⁵⁾ 후에 점화장치에 의해 점화되도록 하였고, 연소압력 및 연소실 벽면의 순간온도는 정적연소기에 설치된 압력계

와 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)은 분사된 연료가 충분히 기화된 후 재현성 있는 연소가 이루어지도록 260ms로 설정하였고, 당량비(Equivalence Ratio; ER)는 ER 1.0을 기준으로 희박한 영역인 ER 0.9, 0.8, 0.7과 농후한 영역인 ER 1.1, 1.2, 1.3의 조건에서 순간온도를 측정하였지만 ER 0.8과 ER 1.2의 조건으로 비교하였다. 박막형 순간온도 프로브의 장착위치는 전술과 같고, 프로브의 돌출높이(Height of Probe; HP)는 0, 1, 2mm의 조건에서 순간온도를 측정하였지만 본 논문에서는 연소실 표면인 HP 0mm의 조건에서만 언급하였다.

Table 1 Initial conditions of experiment

Parameters	Conditions
Fuel	Gasoline
Ignition method	CDI
Ignition pressure	0.5MPa
Initial temperature	353K

Table 2 Experimental conditions

Parameters	Conditions
Equivalence ratio(ER)	0.8, 1.0, 1.2
Position of probe(PP)	67, 157, 247, 337°
Height of probe(HP)	0mm
Premixed duration(PD)	260ms

3. 연소실 벽면의 열유속 계산

열유속 계산을 위해 연소실 벽면에서의 열전달을 1차원 비정상 열전도로 가정하면 다음과 같은 1차원 비정상 열전도방정식이

로 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 다음⁶⁾과 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 전개하는 데 있어 Gibbs 현상을 벗어난 구간에서 Fourier 급수 전개에 의한 평균 오차는 $1 \times 10^{-5} \%$, 최대오차는 4.7% 이내였다.

4. 결과 및 검토

4.1 순간온도 특성

Fig.3은 당량비(ER) 및 박막형 순간온도 프로브의 장착위치(PP)에 따라 주어진 초기 조건에서 순간온도의 특성을 알아보기 위하여 연소시 발생하는 순간온도를 500ms동안 1,000개의 데이터를 취득한 결과이다. A점은 점화시기, B점은 순간온도 상승시기, C점은 최고순간온도 발생시기, D점은 관찰 끝부분이다. 본 연구에서는 A점에서 D점까지를 연소에 의한 순간온도의 분포, 연료분사개시부터 점화시기까지를 예혼합기간 PD로 표시하였다.

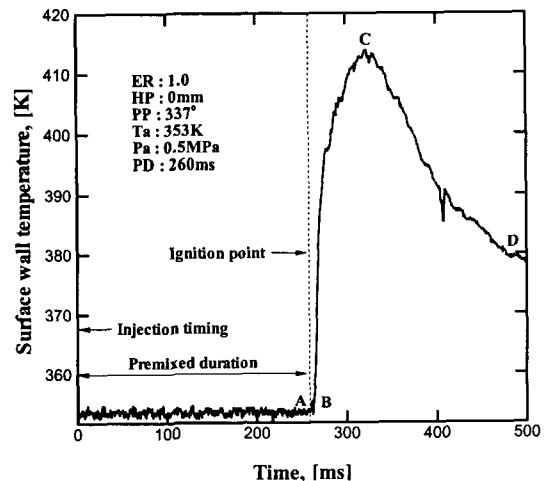


Fig. 3 Typical temperature signal at surface wall of constant volume combustion chamber

예혼합기간이 지난후 그림의 A시점에서 혼합기에 점화하면 약 5~10ms 정도의 시간 지연을 보인후에 B시점에서부터 순간온도가 상승하기 시작한다. B시점에서 상승하기 시작한 순간온도는 315~320ms 근방에서 최고 순간온도를 나타냈다. 즉, 점화시기로부터 최고순간온도에 도달하기 위해서는 약 55~60ms 정도의 시간이 소요된다. 최고순간온도를 나타낸 C시점에서 순간온도는 다시 감소하기 시작하며, 데이터는 D시점까지 취득하였다.

그림에서 표시한 순간온도의 시간변화로 부터 본 연구에서 사용한 박막형 순간온도 프로브 응답특성의 재현성 및 고 응답성을 확인할 수 있었다.⁷⁾ 이는 제작과정에서 적열방전에 의한 친수화 처리로 인하여 모재의 오염도를 줄여 박막을 형성한 것이 정도 향상에 크게 기여한 것으로 생각된다.

4.2 연소실 벽면의 온도 변화

Fig.4는 ER 1.0, HP 0mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의

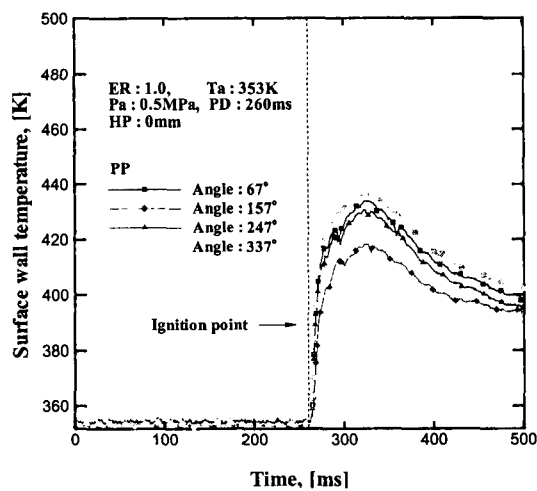


Fig. 4 Surface temperature of wall at ER 1.0 and HP 0mm

시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 PP 67°에서 433K, 157°에서 418K, 247°에서 429K, 337°에서는 437K으로 나타났다. 최고순간온도의 평균은 429K이며, 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP 337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP 157°에서의 온도차는 19K으로 나타났다. PP 67°는 PP 337°보다 스파크 플러그와 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기²⁾ 때문에 PP 67°에서 보다도 PP 337°에서는 4K만큼 높은 최고순간온도를 나타낸 것으로 판단된다.

Fig.5는 희박 혼합비 ER 0.8, HP 0mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 희박 혼합비 조건에서의 연소특성 특히, 계측위치에 따른 화염의 온도변화를 밝히기 위한 것이다. 최고순간온도는 PP 67°에서 413K, 157°에서 407K, 247°에서 409K, 337°에서는 415K으로 나타났고, ER 1.0에서와 동일한 PP 337, 67, 247, 157°의 순으로 정성적인 경향을 보였다. 최고순간온도의 평균은 이룬

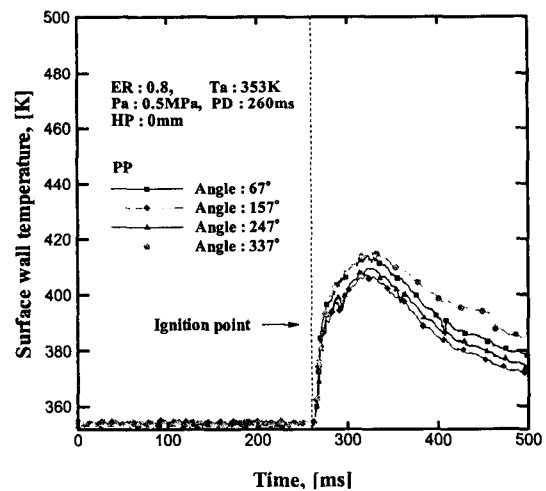


Fig. 5 Surface temperature of wall at ER 0.8 and HP 0mm

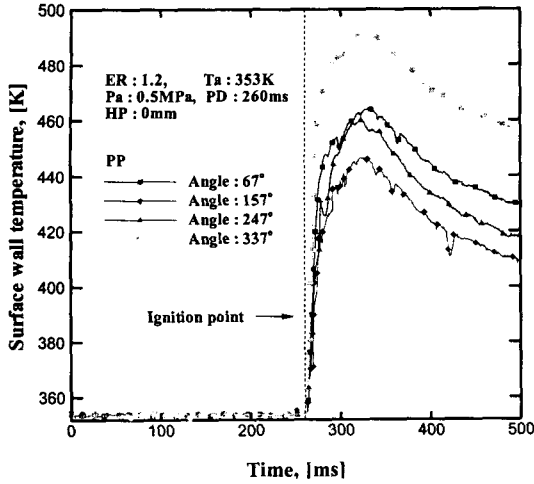


Fig. 6 Surface temperature of wall at ER 1.2 and HP 0mm

혼합비 ER 1.0보다 18K 감소한 411K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 PP 337°에서와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸 PP 157°에서의 온도차는 8K으로 이른 혼합비 ER 1.0과 비교하여 근소한 값이다. 이러한 경향은 연소 가능한계까지 혼합비가 희박해질수록 현저하게 나타났다. 화염 온도의 시간변화 특성으로는 화염이 연소실 전면으로 전파된 후 PP 337°에 위치한 프로브에서의 온도가 시종 가장 높은 값을 보이고, PP 157°조건에서 가장 낮은 값을 보였다.

Fig.6은 농후 혼합비 ER 1.2, HP 0mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 최고순간온도는 PP 67°에서 463K, 157°에서 446K, 247°에서 459K, 337°에서는 491K으로 나타났고, ER 1.0과 ER 0.8에서와 동일한 PP 337, 67, 247, 157°의 순으로 정성적인 경향을 보였다. 최고순간온도의 평균은 이른 혼합비 ER 1.0보다 35K 증가하였고, 희박 혼합비 ER 0.8보다는 54K 증가한 465K으로 나타났다. 가장 높은 최고순간온도를 나타낸 337°와 가장 낮은 최고순간온도를 나타낸

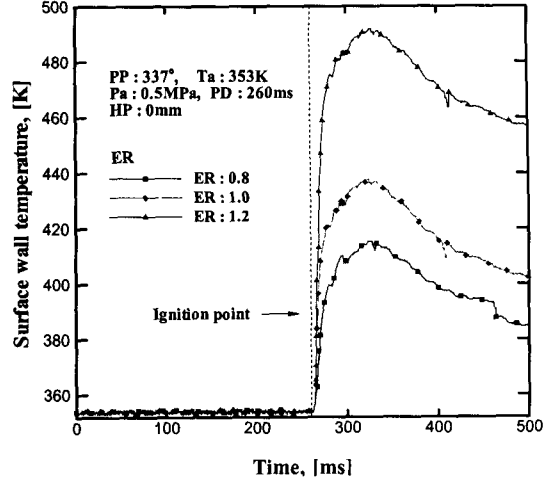


Fig. 7 Surface temperature of wall at PP 337° and HP 0mm

157°와의 온도차는 45K으로 프로브 위치에 따른 최고순간온도 변화폭은 크게 차이가 났다. 이러한 현상은 혼합비가 농후할수록 현저하게 나타났고, 프로브 위치에 따른 온도차도 크게 차이가 났다. 이는 절대온도의 값이 타 당량비에 비해 상대적으로 높기 때문에 화염의 이동에 따른 열손실도 그만큼 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig.7은 HP 0mm, PP 337°에서 희박 혼합비 ER 0.8, 이른 혼합비 ER 1.0 및 농후 혼합비 ER 1.2의 연소조건으로 화염이 측정부를 통과할 때의 순간온도의 시간분포를 나타낸 것이다. 본 그림은 당량비 증가에 따른 화염온도의 시간경과를 비교하기 위한 것으로 최고순간온도는 ER 0.8에서 415K, ER 1.0에서 437K, ER 1.2에서는 491K으로 나타났다. 이른 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 ER 1.2에서 55K 증가하였고, ER 0.8에서는 22K 감소하였다. 이것을 백분율로 나타내면 이른 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 최고순간온도는 ER 1.2에서 12% 증가하였고, ER 0.8에서는 5% 감소하여 나타났다.

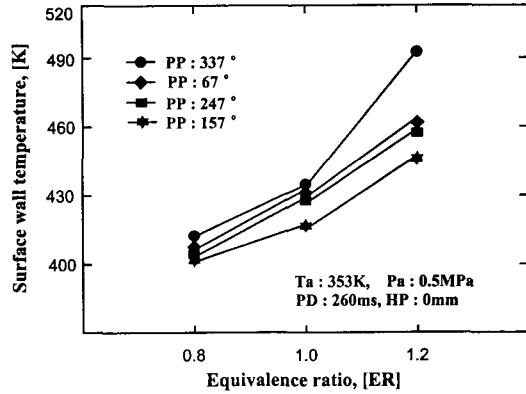


Fig. 8 Surface temperature of wall at equivalence ratio and probe position

Fig.8은 4곳의 온도측정점과 HP 0mm에서 주어진 당량비 조건으로 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도를 계측하여 비교한 것이다. 가장 높은 순간온도는 ER 1.2, PP 337°이었으며, 당량비 증가에 따른 공급 열량의 증가에 의해 연소실 벽면의 순간온도는 정성적으로 증가하지만 ER 1.2, PP 337°의 경우 예측할 수 있는 온도보다도 더 높은 결과의 순간온도를 나타냈다. 이는 강력한 화염이 형성되는 연소중기에 화염면이 계측부를 통과하기 때문으로⁵⁾ 판단된다.

4.3 연소실 벽면의 열유속 변화

Fig.9는 이론 혼합비 ER 1.0, HP 0mm의 연소조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 산출한 비정상 순간열유속을 나타냈다. 점화에 의해 순간온도는 급격히 상승하고, 연소실 벽면으로 순간열유속에 의해 열전달이 급격히 이루어지고 있다. 순간열유속은 측정위치에 따라 그 차이가 있지만 순간온도와 유사한 형태의 정성적인 경향으로 나타났다. ER 1.0, HP 0mm의 연소조건에서 연소시켰을 때 260~480ms

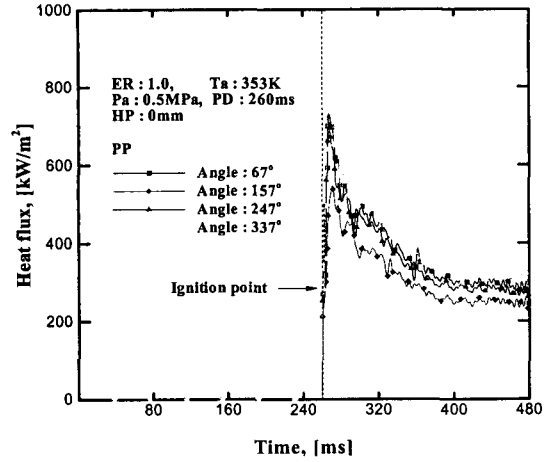


Fig. 9 Unsteady heat flux of wall at ER 1.0 and HP 0mm

동안 벽면으로의 열손실을 의미하는 손실 총열량(계측 연소기간의 적산치)은 PP 67°에서 36,337kJ/m², 157°에서 30,007kJ/m², 247°에서 34,694kJ/m², 337°에서는 38,613kJ/m²으로 연소실 벽면의 열부하 상태를 알 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 PP 67°는 PP 337°보다 스파크 플러그와 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기 때문에 해당위치에서의 화염온도가 낮은 PP 67°에서 보다는 PP 337°에서의 손실 총열량이 8,606kJ/m²만큼 높은 값을 보였다.

Fig.10은 HP 0mm, PP 337°에서 각 당량비 조건으로 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도를 이용해서 산출한 비정상 순간열유속을 나타냈다. 당량비 증가에 따른 연소실 벽면으로 유출되는 손실 총열량은 ER 0.8에서 29,956kJ/m², ER 1.0에서 38,613kJ/m², ER 1.2에서는 70,231kJ/m²으로 나타났다. 이론 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 ER 1.2에서 31,618kJ/m² 증가하고, 희박 혼합비 ER 0.8에서는 8,657kJ/m² 감소하였다. 즉, 이론 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 ER 1.2에서 182% 증가하였고, ER 0.8에서는 22% 감소

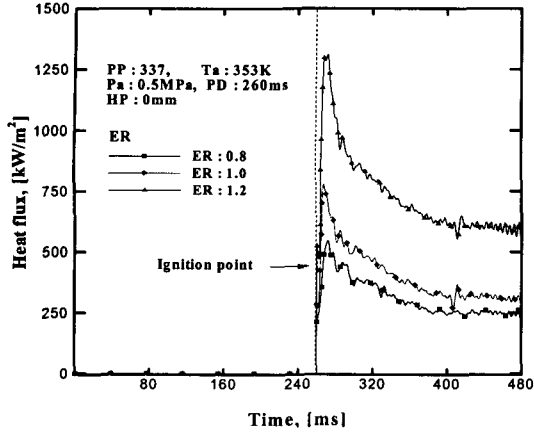


Fig. 10 Unsteady heat flux of wall at PP 337° and HP 0mm

하므로 연소실 벽면에서의 손실 총열량은 당량비에 큰 영향을 미친다. 또한 화염온도가 높아지는 ER 1.2의 농후한 혼합비 조건에서 손실 총열량이 높아지는 것을 알 수 있다. 이는 희박 혼합비 조건일수록 냉각손실은 감소함을 의미한다.

Fig.11은 4곳의 온도측정점과 HP 0mm, 주어진 혼합비 조건에서 화염이 측정부를 통과할 때의 화염온도로부터 비정상 순간열유속을 합산하여 손실 총열량 증가비율로서 나타냈다. 당량비 증가에 따라 손실 총열량은 거의 직선적으로 증가하였다. 특히, 농후 혼합비 ER 1.2, PP 337°에서 높은 손실 총열량을 보였다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 당량비 증가에 따른 강력한 초기화염 덩어리가 측정부 근방에서 연소를 행하기 때문에 그 만큼 벽면으로 유출되는 손실 총열량도 급격히 증가한 것으로 판단된다. 평균 열손실 증가비율은 이론 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 ER 1.2에서 27% 증가하였고, ER 0.8에서는 15% 감소하여 나타났다. 따라서, 연소실 벽면으로의 열손실을 의미하는 전 연소기간동안 손실 총열량은 당량비에

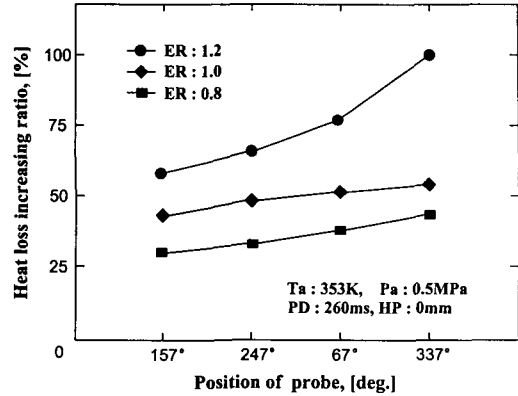


Fig. 11 Heat loss increasing ratio at equivalence ratio and probe position

큰 영향을 미치고, 화염전과 끝부분으로 갈수록 감소함을 알 수 있었다.

5. 결론

정적연소기내에서 비정상 열부하를 해석하기 위하여 박막형 순간온도 프로브를 제작하고, 당량비 및 박막형 순간온도 프로브의 장착 위치에 따라 연소실 벽면에서의 순간온도 및 순간열유속에 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) 화염이 측정부를 통과할 때의 최고순간온도분포는 박막형 순간온도 프로브 장착위치에 대하여 시종 PP 337, 67, 247, 157°의 순으로 나타났다.
- 3) PP 67°는 337°보다 스파크 플러그와 근접한 거리이지만 접지전극이 화염의 진행 방향을 방해하기 때문에 손실 총열량은

- 67°에서 보다는 337°에서 8,606kJ/m²만큼 높은 값을 보였다.
- 4) 평균 열손실 증가비율은 이론 혼합비 ER 1.0을 기준으로 해서 ER 1.2에서 27% 증가하였고, ER 0.8에서는 15% 감소하여 나타났다. 따라서, 연소실 벽면으로의 열손실을 의미하는 계측 연소기간동안 손실 총열량은 당량비에 큰 영향을 받고, 화염전파 끝부분으로 갈수록 감소함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Enomoto, Furuhamo, "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) 하종률 외 4인, "IDI형 정적연소기에서 점화시기 및 연락공형상이 연소특성에 미치는 영향", KSAE 논문집 Vol.4 No.3 No. 96370066, pp.220-231, 1996.
- 3) 多田, "Temperature Measurement in Rotor Bearing of Rotary Engine", Bulletin of the JSAE paper No.7, pp.11-12, 1976.
- 4) 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", 博士學位論文, 武蔵工業大學 工學部 機械工學科, 1987.
- 5) 하종률 외 3인, "희박연소를 위한 혼합기의 성층급기와 유동에 관한 연구", KSME 논문집 제8권 1호, pp.1-9, 2000.
- 6) 윤수한, "정압연료분사장치와 부실식정적연소기를 사용한 메탄올의 연소특성에 관한 연구" 박사학위논문, 동아대학교, 1995.
- 7) 김시범, 이치우, "4사이클 DOHC 엔진의 실린더 헤드에서 냉각손실을 고려한 열해석", 삼성자동차 산학협동연구과제, 1998.